

Tesis de Doctorado en Ingeniería - Mecánica de los
Fluidos Aplicada

Facultad de Ingeniería - UdelaR

**DINÁMICA GLOBAL DE
SEDIMENTOS FINOS EN
EL RÍO DE LA PLATA**

Mónica Fossati

Tutor: Ismael Piedra-Cueva

Co-tutor: Florence Cayocca

Resumen

Este trabajo se enfoca en el estudio de la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata. La estrategia metodológica aplicada tuvo como base la implementación, y ajuste de un modelo numérico de sedimentos finos confiable y de avanzada en la zona de estudio, el modelo MARS3D (IFREMER). Para esto fue necesario previamente analizar la información de campo disponible para conocer aspectos básicos de la dinámica, y para utilizarla en el desarrollo del modelo numérico. Además, como el modelo de sedimentos finos depende directamente de las condiciones hidrodinámicas fue necesario implementar y ajustar un modelo tridimensional baroclínico de marea en la zona y un modelo de oleaje, determinando también las tensiones de corte de fondo impuestas por ambos forzantes. Al finalizar este trabajo se cuenta con un modelo completo, lo suficientemente testeado y ajustado y por tanto confiable, para ser utilizado como generador de información, y para mejorar el conocimiento de los principales aspectos de la dinámica de sedimentos finos. El modelo ajustado muestra que la dinámica en el Río de la Plata está gobernada por procesos de resuspensión de sedimento de fondo generados por las corrientes de marea y por el oleaje. La importancia de cada uno de estos forzantes se diferencia entre la zona interior-intermedia y la zona exterior del Río de la Plata. En la zona interior e intermedia las mareas dominan dicho proceso a una escala semidiurna generando un valor basal de concentración que en eventos de oleaje aumenta por fuertes erosiones adicionales. En la zona exterior la dinámica es muy diferente, dominada por la resuspensión generada durante las tormentas y el transporte posterior del sedimento en suspensión de gran contenido arcilloso. En esta zona se observa una gran influencia del campo de salinidad en la dinámica. La herramienta desarrollada fue utilizada extensamente para obtener información de la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata realizando simulaciones durante períodos extensos de tiempo de varios años.

Tesis defendida y aprobada en Febrero 2013.

Miembros del Tribunal:

Susana Vinzón, Ángel Menéndez, Francisco Pedocchi.

Agradecimientos

Gracias a todos los que me han transmitido conocimiento y me han apoyado en el desarrollo de esta tesis, y en consecuencia han apuntado a mi desarrollo académico; y a todos los que me han acompañado y enseñado en esta vida, y en consecuencia han permitido mi desarrollo personal:

Ismael P. - Florence C. - Caroline T. - Fabrice A. - Pierre L. H. – Romaric V. -
Frank D. - Valerie G. - Jean F. - Diego M. - Tabaré C. - Mariano R. - Claudia G. -
José L. G. - Francisco P. - Pablo E. - Estela D. –Mariana M. - Guillermo L. -
Christian C. - Pablo S. - Rodrigo M. - Rodrigo A. - Jimena A. - Mariana F. -
Genevieve – Carmen E. - Bachi, Vero, Dani, Agus, Caro y el resto de mis amigas -
Pía C. - Paula A. - Guillaume S. - docentes y alumnos de MCISur -
docentes del IMFIA.-

Y en especial a mi familia:

Papá y Mamá, Rober, Fran, Rosi, Alfo, Mer, Fer, Negro, Magie, Gas,

Mati, Manu y Guille,...

Este trabajo se realizó gracias a los fondos del Proyecto FREPLATA-FFEM y contó con el apoyo de CSIC a través del otorgamiento de una beca de posgrado.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. DINÁMICA DE SEDIMENTOS COHESIVOS EN ZONAS ESTUARINAS (MARCO TEÓRICO)	1
1.1.1. Los sedimentos cohesivos	1
1.1.2. Procesos básicos del transporte de sedimentos cohesivos.....	2
1.1.3. Dinámica de sedimentos cohesivos en estuarios.....	5
1.1.4. Zona de estudio: el Río de la Plata	7
1.1.4.1. Características generales	7
1.1.4.2. Características hidrodinámicas	8
1.1.4.3. Dinámica de sedimentos.....	11
1.2. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE TESIS	13
1.2.1. Justificación y Motivación	13
1.2.2. Objetivos	15
1.2.2.1. Objetivo general	15
1.2.2.2. Objetivos específicos	15
1.2.3. Estrategia general	15
1.2.4. Estructura del documento	16
2. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE CAMPO VINCULADA A LOS SEDIMENTOS FINOS	19
2.1. INTRODUCCIÓN.....	19
2.1.1. Descripción general de la información disponible.....	19
2.1.2. Base de datos Proyecto FREPLATA-FFEM	20
2.1.2.1. Información recolectada	20
2.1.2.2. Períodos de medición	21
2.1.2.3. Estrategia de procesamiento y análisis de la información recolectada.....	21
2.1.3. Esquema del capítulo.....	24
2.2. BOYA OCEANOGRÁFICA.....	24
2.2.1. Descripción general del equipamiento	24
2.2.2. Depuración inicial de los datos de la Boya.....	25
2.2.3. Análisis de los datos de turbidez	26
2.2.3.1. Estadísticos básicos de las series de turbidez	26
2.2.3.2. Síntesis	30

2.2.4. Análisis conjunto turbidez y forzantes	31
2.2.4.1. Descripción del análisis	31
2.2.4.2. Resultados obtenidos	31
2.2.4.3. Síntesis	34
2.2.5. Síntesis datos Boya Oceanográfica.....	35
2.3. PILOTE NORDEN.....	35
2.3.1. Descripción general del equipamiento	35
2.3.2. Depuración inicial de los datos del SMATCH	36
2.3.3. Análisis de los datos de turbidez	36
2.3.3.1. Ajuste relación turbidez/concentración	36
2.3.3.2. Estadísticos básicos de las series de turbidez	37
2.3.3.3. Síntesis	40
2.3.4. Análisis conjunto turbidez y forzantes	40
2.3.4.1. Descripción del análisis	40
2.3.4.2. Resultados obtenidos	40
2.3.4.3. Síntesis	42
2.3.5. Síntesis datos Pilote Norden	43
2.4. TORRE OYARVIDE	43
2.4.1. Descripción general del equipamiento	43
2.4.2. Depuración inicial de los datos del SMATCH	44
2.4.3. Análisis de los datos de turbidez	45
2.4.3.1. Ajuste relación turbidez/concentración	45
2.4.3.2. Estadísticos básicos de las series de concentración	46
2.4.3.3. Síntesis	48
2.4.4. Análisis conjunto turbidez y forzantes	48
2.4.4.1. Descripción del análisis	48
2.4.4.2. Resultados obtenidos	49
2.4.4.3. Síntesis	50
2.4.5. Síntesis datos Torre Oyarvide	52
2.5. CAMPAÑAS OCEANOGRÁFICAS.....	52
2.5.1. Muestras de material en suspensión.....	53
2.5.1.1. Concentración de sedimento en suspensión	53
2.5.1.2. Composición del sedimento en suspensión.....	57
2.5.1.3. Síntesis	61
2.5.2. Muestras de sedimento de fondo	61
2.5.2.1. Contenido de materia orgánica	61
2.5.2.2. Contenido de humedad	63
2.5.2.3. Composición granulométrica.....	65
2.5.2.4. Diagramas triangulares	68
2.5.2.5. Correlaciones.....	71
2.5.2.6. Síntesis	71

2.5.3. Perfiles verticales.....	72
2.5.3.1. Turbidez.....	72
2.5.3.2. Salinidad.....	78
2.5.3.3. Relación perfiles salinidad y turbidez	80
2.5.3.4. Síntesis	82
2.5.4. Síntesis datos Campañas Oceanográficas.....	82
2.6. ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN	83
2.7. DISCUSIÓN GENERAL.....	85

3. MODELACIÓN NUMÉRICA DE LOS FORZANTES HIDRODINÁMICOS: CORRIENTES Y OLEAJE..... 88

3.1. INTRODUCCIÓN.....	88
3.2. MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DE MAREA - MARS	89
3.2.1. Características generales del modelo numérico MARS	89
3.2.2. Sistema de ecuaciones	89
3.2.2.1. Coordenada vertical sigma	90
3.2.2.2. Ecuaciones 3D (modo interno).....	90
3.2.2.3. Ecuaciones 2D integradas en vertical (modo externo).....	92
3.2.2.4. Condiciones de borde	93
3.2.2.5. Parametrización de la turbulencia horizontal	94
3.2.2.6. Parametrización de la turbulencia vertical.....	95
3.2.2.7. Resolución numérica.....	96
3.2.3. Implementación del modelo MARS en el Río de la Plata.....	97
3.2.3.1. Estructura de modelos encajados.....	97
3.2.3.2. Modelo global del Atlántico Sur: rank0	98
3.2.3.3. Modelo local del Río de la Plata: rank1	100
3.2.4. Calibración y validación del modelo	102
3.2.4.1. Metodología utilizada	102
3.2.4.2. Resultados obtenidos	110
3.2.4.3. Síntesis	129
3.2.5. Patrones principales de flujo	129
3.3. MODELO DE OLEAJE EN EL RÍO DE LA PLATA	136
3.3.1. El modelo numérico SWAN	136
3.3.2. Implementación del modelo SWAN.....	138
3.3.2.1. Características generales	138
3.3.2.2. Condiciones de borde: modelo global WW3	139
3.3.2.3. Condiciones de borde: forzante atmosférico	140
3.3.3. Calibración y validación del modelo	141
3.3.3.1. Metodología	141
3.3.3.2. Resultados obtenidos	143
3.3.3.3. Síntesis	147

3.3.4. Análisis de la dinámica del oleaje.....	148
3.4. TENSIONES DE CORTE DE FONDO DE CORRIENTE Y OLEAJE EN EL RÍO DE LA PLATA	153
3.4.1. Formulaciones aplicadas	153
3.4.1.1. Tensión de corte de flujo cuasi-permanente (corrientes).....	154
3.4.1.2. Tensión de corte de flujo oscilatorio (oleaje).....	155
3.4.1.3. Tensión de corte de flujo combinado	156
3.4.2. Metodología.....	157
3.4.3. Resultados obtenidos	158
3.4.3.1. Análisis exploratorio del tipo de régimen.....	158
3.4.3.2. Tensiones de corte en función de la rugosidad de fondo.....	159
3.4.4. Síntesis y discusión.....	160
3.5. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LAS TENSIONES DE CORTE DE FONDO EN EL RÍO DE LA PLATA.....	161
3.5.1. Variación temporal	161
3.5.2. Variación espacial.....	167
3.5.3. Campos estadísticos.....	170
3.6. SÍNTESIS DEL CAPÍTULO	173
4. MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA DINÁMICA DE SEDIMENTOS FINOS	175
4.1. INTRODUCCIÓN.....	175
4.2. MODELO DE SEDIMENTOS FINOS - MARS	176
4.2.1. Ecuaciones gobernantes.....	176
4.2.1.1. Ecuación de transporte.....	176
4.2.1.2. Erosión.....	177
4.2.1.3. Deposición.....	177
4.2.1.4. Velocidad de caída.....	178
4.2.2. Implementación del modelo en el Río de la Plata	179
4.2.2.1. Aportes fluviales de sedimento en suspensión.....	179
4.2.2.2. Condición inicial del sedimento de fondo	180
4.2.2.3. Período previo.....	183
4.2.3. Síntesis - Esquema general de las simulaciones.....	183
4.3. ANÁLISIS PRELIMINARES	184
4.3.1. Simulación sin interacción con el fondo	184
4.3.2. Influencia de la condición inicial de la composición del sedimento de fondo ..	185
4.3.3. Síntesis.....	187
4.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS DIFERENTES PROCESOS DE LA DINÁMICA DE SEDIMENTO	188
4.4.1. Casos analizados.....	188
4.4.2. Resultados obtenidos	190

4.4.2.1. F1 - erosión	190
4.4.2.2. F2 - velocidad de caída.....	192
4.4.2.3. Combinaciones F1 y F2.....	195
4.4.3. Discusión.....	199
4.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD INTEGRADOS	200
4.5.1. Etapa 1.....	202
4.5.1.1. Metodología	202
4.5.1.2. Resultados	203
4.5.1.3. Síntesis	207
4.5.2. Etapa 2.....	208
4.5.2.1. Metodología	208
4.5.2.2. Resultados	209
4.5.2.3. Síntesis	219
4.5.3. Etapa 3.....	219
4.5.3.1. Metodología	219
4.5.3.2. Resultados	222
4.5.3.3. Síntesis	225
4.5.4. Etapa 4.....	226
4.5.4.1. Metodología	226
4.5.4.2. Resultados	227
4.5.4.3. Síntesis	231
4.6. SELECCIÓN DE LA PARAMETRIZACIÓN DEFINITIVA DEL MODELO	231
4.7. VALIDACIÓN DEL MODELO: PERÍODO 2009-2010.....	236
4.7.1. Características generales	236
4.7.2. Resultados obtenidos	237
4.7.2.1. Series temporales.....	237
4.7.2.2. Perfiles de concentración.....	238
4.7.2.3. Composición del material de fondo	241
4.7.3. Síntesis.....	244
4.8. SÍNTESIS DEL CAPÍTULO.....	245
5. ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DE SEDIMENTOS FINOS	248
5.1. INTRODUCCIÓN.....	248
5.2. SIMULACIÓN PERÍODO 2009-2010.....	249
5.2.1. Características generales	249
5.2.2. Variación temporal diaria.....	250
5.2.3. Análisis de la concentración de sedimento en suspensión.....	261
5.2.3.1. Variación temporal anual.....	261
5.2.3.2. Variación espacial mensual.....	268
5.2.4. Análisis del sedimento de fondo: espesor y composición.....	282
5.2.4.1. Variación temporal	282

5.2.4.2. Variación espacial mensual.....	290
5.2.4.3. Variación espacial diaria	294
5.2.5. Dinámica durante condiciones de calma y tormentas	300
5.2.5.1. Condiciones de calma.....	301
5.2.5.2. Condiciones de tormenta	306
5.2.6. Conclusiones	317
5.3. DETERMINACIÓN DE ZONAS DE EROSIÓN Y DEPOSICIÓN PREDOMINANTES	321
5.3.1. Descripción del análisis	321
5.3.2. Resultados obtenidos	322
5.3.3. Síntesis.....	328
5.4. DINÁMICA DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTO FINO POR ZONAS	328
5.4.1. Descripción del análisis	328
5.4.2. Resultados obtenidos	330
5.4.2.1. Sedimento en suspensión	330
5.4.2.2. Sedimento de fondo.....	350
5.4.3. Síntesis	353
5.5. DISCUSIÓN GENERAL.....	354
6. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES	358
7. BIBLIOGRAFÍA	365
ANEXO A. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE CAMPO VINCULADA A LOS SEDIMENTOS FINOS	372
A.1. INFORMACIÓN INDIRECTA DE CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTO FINO EN LA COSTA DE MONTEVIDEO	372
A.2. DEPURACIÓN DE LOS DATOS DEL ADCP DE LA BOYA OCEANOGRÁFICA.....	373
A.3. VINCULACIÓN DE LA SEÑAL DEL PERFILADOR ADCP Y LA MEDIDA DEL SMATCH EN LA BOYA	376
A.4. AJUSTE RELACIÓN TURBIDEZ/CONCENTRACIÓN EN LA BOYA OCEANOGRÁFICA	377
A.5. DEPURACIÓN DE LOS DATOS DEL SPT2 DE TORRE OYARVIDE	378
A.5.1. Período 2 de medición	378
A.5.2. Período 5 de medición	378
ANEXO B. MODELACIÓN NUMÉRICA DE LOS FORZANTES HIDRODINÁMICOS: CORRIENTES Y OLEAJE	380
B.1. VALIDACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO RANK0.....	380
B.2. AJUSTE DEL MODELO OLEAJE – VIENTOS CEP.....	381

B.3. VARIACIÓN ESPACIAL DE LAS TENSIONES DE CORTE DE FONDO	385
C. MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA DINÁMICA DE SEDIMENTOS FINOS	392
C.1. COMPARACIÓN INFORMACIÓN HISTÓRICA Y RECIENTE DE LA COMPOSICIÓN DEL SEDIMENTO DE FONDO	392
C.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS DIFERENTES PROCESOS DE LA DINÁMICA DE SEDIMENTO	394
C.2.1. Configuración ParGlobal.....	394
C.2.2. Configuraciones F1.....	395
C.2.3. Configuraciones F2.....	396
C.2.4. Configuraciones combinaciones F1 y F2.....	398
C.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD INTEGRADOS	401
C.3.1. Configuraciones Etapa 1	401
C.3.2. Configuraciones Etapa 2	405
C.3.3. Configuraciones Etapa 3	410
C.3.4. Configuraciones Etapa 4	411
C.4. VALIDACIÓN DEL MODELO	418
C.4.1. Comparación con medidas indirectas de concentración en Montevideo	418

Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. DINÁMICA DE SEDIMENTOS COHESIVOS EN ZONAS ESTUARINAS (MARCO TEÓRICO)

Los estuarios se definen como cuerpos de agua donde el agua dulce de las descargas continentales de los ríos se encuentra y mezcla con el agua salada de los mares y océanos. Tomando a modo de introducción algunas de las ideas presentadas por Prandle en su libro titulado “Estuaries. Dynamics, Mixing, Sedimentation and Morphology” (Prandle, 2009) es posible afirmar que los estuarios presentan una gran complejidad en su dinámica y son de gran relevancia desde el punto de vista ambiental. Actúan en general como fuente y receptor de diversos contaminantes dependiendo de: a) el origen geográfico de dichos contaminantes (fluvial, marino, interno o incluso atmosférico); b) de la naturaleza biológica y química de los mismos; y c) de las variaciones temporales de la marea, descarga fluvial, vientos y oleaje. Por tanto comprender y poder predecir las concentraciones del sedimento en suspensión en estuarios es relevante debido a su impacto en diversos aspectos, como en la atenuación de la luz y por tanto en la producción primaria, en el transporte de contaminantes absorbidos en los mismos y en la evolución de la batimetría de fondo a través de los procesos de erosión y deposición de los mismos. Aunque la dinámica de sedimentos podría parecer sencilla al describirse como una secuencia de procesos de erosión, suspensión, transporte y deposición, varias complejidades surgen al considerar que en la naturaleza nos encontramos con una mezcla de diversos tipos y tamaños de sedimentos, influenciados por las condiciones hidrodinámicas (corrientes de marea y oleaje) pasadas y presentes, y gobernadas también por procesos químicos y biológicos específicos.

1.1.1. Los sedimentos cohesivos

Los sedimento que podemos encontrar en un cuerpo de agua costero o estuarino se clasifican tradicionalmente según su diámetro de partícula (D_{50}), siendo los valores menores las arcillas ($< 4\mu$), luego se encuentran los limos (tamaños entre 4μ y 63μ), las arenas con su diversa graduación (definidas entre 63μ y 1000μ) y por último se encuentran los elementos de mayor tamaño como gravas o rocas (Prandle, 2009). Los límites de la clasificación de los sedimentos en función del tamaño varían levemente según diversos autores; por ejemplo Mehta and McAnally (2008) utilizan los límites de 2μ y 62μ para definir las arcillas y los limos, respectivamente. La división establecida entre las arenas y los limos es la que separa a los sedimentos cohesivos (arcillas y limos) de los sedimentos no cohesivos (arenas y gravas). La cohesión se refiere a las fuerzas de atracción electroquímicas que actúan entre las partículas. El grado de cohesión de las partículas depende del área superficial específica, es decir, la división entre el área superficial de la partícula y el peso de la misma. Así en función del tamaño y tipo de sedimento la cohesión varía, siendo por ejemplo mayor la cohesión para las partículas de

arcillas minerales que para los limos de mayor tamaño mayores a 40 μ (Mehta and McAnally, 2008).

La propiedad cohesiva de las partículas finas es la gran responsable de que la dinámica en suspensión de las mismas sea tan compleja, y a su vez desafiante para la investigación actualmente. Las partículas muy finas en suspensión se transportan con el flujo horizontal ya que no tienen movimiento propio. No obstante a medida que se incrementa la concentración por la cohesión entre partículas las mismas tienden a agruparse y a flocular en múltiples conjuntos de flocs que pueden sedimentar por gravedad y hasta afectar el flujo turbulento cerca del fondo (Prandle, 2009). Los flocs pueden ser transportados por advección, difusión turbulenta y sedimentación gravitacional. Estos flocs podrán depositarse en el fondo donde las características cohesivas determinan cómo ocurre el proceso de consolidación y afectan las tasas de erosión del material de fondo incluso cuando los porcentajes de materiales finos son leves en relación a materiales más gruesos como arenas finas no cohesivas (Prandle, 2009).

Mehta and McAnally (2008) seleccionan algunos parámetros que consideran básicos para realizar una caracterización gruesa de los sedimentos finos de un determinado cuerpo de agua en el cual los factores bioquímicos no son relevantes: el tamaño de partícula, la velocidad de caída de la partícula, la composición mineral, el contenido orgánico, la capacidad de intercambio catiónica y la salinidad. Mencionan que a pesar de que existen muchos parámetros más que aportarían a la caracterización del sedimento fino de un determinado lugar, los elevados costos de su determinación y la dificultad de hallar formulaciones que los vinculen con los principales procesos de la dinámica, justifican la selección de los más relevantes. En el mismo sentido mencionan la necesidad de contemplar definiciones más abarcativas que la separación según el tamaño en por ejemplo limos y arcillas, ya que en los ambientes naturales encontramos en general una mezcla de los mismos. Estas mezclas se definen como barros ('mud' en inglés) y en general presentan propiedades cohesivas por su contenido de arcilla mineral.

El proceso de floculación también se describe en detalle en Mehta and McAnally (2008). Las partículas finas cohesivas forman flocs mediante el proceso de agregación, definido como el conjunto de mecanismos a partir de los cuales cambia el tamaño, densidad y fuerza del floc, por interacciones del tipo flujo-partícula (o flujo floc) o del tipo partícula-partícula (floc-floc). Una partícula en suspensión está sujeta a fuerzas de gravedad, inercia, flujo medio, fluctuaciones turbulentas y colisiones con otras partículas en suspensión, y en consecuencia se irá agregando en la columna de agua uniéndose con otras partículas y luego separándose de ellas. Si el floc crece lo suficiente entonces caerá al fondo. El diagrama desarrollado por Dyer (en Mehta and McAnally, 2008) muestra la dependencia del tamaño del floc con la concentración del sedimento en suspensión y con el nivel de turbulencia. Por un lado el tamaño del floc se incrementa con la tensión de corte seguido de un decrecimiento, y el tamaño del floc se incrementa con el incremento de la concentración de sedimento en suspensión. A pesar de diversos avances y modelos para representar la floculación todavía restan muchos interrogantes sobre dicho proceso de pequeña escala determinante para la dinámica de sedimentos finos.

1.1.2. Procesos básicos del transporte de sedimentos cohesivos

Las partículas de sedimento cohesivo en suspensión están sujetas a procesos de transporte asociados al flujo y a procesos de intercambio con el material de fondo, erosión y deposición. En Winterwerp and Kesteren (2004) se presenta una descripción detallada de los principales procesos claves que intervienen en la dinámica de los sedimentos cohesivos, es decir, de la floculación, sedimentación (caída) y deposición del sedimento, consolidación de los barros, erosión de los depósitos frescos o consolidados y resuspensión

del material de fondo a la columna de agua, y la interacción entre el sedimento en suspensión y el flujo turbulento.

En la Figura 1.1 se reproduce el diagrama presentado por Mehta and McAnally (2008) donde se señalan los principales procesos vinculados con el transporte de sedimentos finos relevantes para estudiar la dinámica de los mismos y que determinan el perfil vertical de concentración de sedimento cohesivo en suspensión. Estos son la sedimentación y deposición, la consolidación, la erosión y el arrastre, y la difusión turbulenta. Según dichos autores entre la capa móvil de barro fluido y la capa móvil del barro en suspensión ocurren los flujos de arrastre y de sedimentación (caída). Dicho arrastre depende de la energía turbulenta resultante de la generación de los vórtices en la capa límite. En dicho proceso se desestabiliza la interfase entre las zonas de diferente densidad (lutoclina) con generación y rotura de ondas internas que genera una eyección de barro denso a la zona de menor concentración generando como consecuencia un incremento de la concentración del sedimento en suspensión. Dicho barro es transportado en suspensión y sujeto entonces a difusión turbulenta. Entre el barro fluido y el fondo puede ocurrir la erosión, cuya magnitud depende de la tensión de corte de fondo inducida por el flujo. La erosión puede ocurrir por un proceso gradual de desgaste de la superficie (erosión superficial) o por un corte más intenso (erosión en masa) donde cierto espesor de fondo es resuspendido. El material puesto en suspensión puede sedimentar por gravedad, siendo el flujo de sedimentación dependiente de la velocidad de caída y de la concentración del sedimento. El flujo de deposición por su parte va a depender del flujo sobre la zona del fondo, siendo menor cuando mayor es la tensión de corte generada por el flujo en el fondo. La deposición incluye un proceso de reordenamiento en donde las partículas/flocs más rápidas que arriban cerca del fondo por sedimentación quedan sujetas al mismo mientras que el material restante queda en suspensión. Cuando la tasa de deposición es alta se puede formar una capa de barro porque se obstruye la sedimentación. Por otra parte las olas pueden aflojar el suelo y generar una capa de fluido, mediante el proceso de licuefacción. Cuando la acción de las olas cesa el barro fluido comienza a drenar y se vuelve a formar el fondo. La sedimentación obstruida y la consolidación son los procesos que describen la deshidratación del barro, o al denominado fondo parcialmente consolidado. La consolidación refiere al reacomodo físico de las partículas que forman el barro depositado por el peso propio y a la consecuente eliminación del agua intersticial, lo que genera una variación del volumen de poros del suelo.

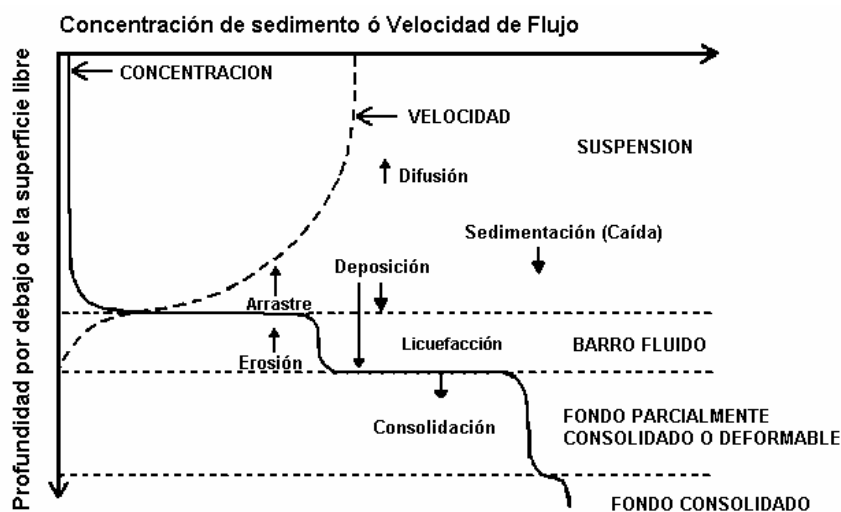


Figura 1.1: Procesos unitarios de transporte que gobiernan la dinámica del perfil de concentración de sedimento según Mehta and McAnally (2008).

Los flocs que se forman en suspensión sedimentan con una velocidad de caída que depende de las propiedades del mismo como tamaño, densidad y forma, las cuales básicamente dependen de la concentración de sedimento en suspensión y por tanto tradicionalmente se han propuesto fórmulas que vinculan la velocidad de caída directamente con la concentración (Krone 1962, en Mehta and McAnally, 2008). Los datos medidos por Thorn (1981), Ross (1988) y Wolanski et al. (1991) presentados en el libro de Winterwerp and Kesteren (2004) muestran que básicamente la velocidad de caída aumenta con la concentración de sedimento en suspensión hasta un valor máximo (de algunos gramos por litro) a partir del cual ocurre lo que se denomina sedimentación obstruida y la velocidad de caída disminuye. La variación del tamaño del floc ha generado el desarrollo de varias formulaciones empíricas, como la fórmula de Van Leussen, que agregan a la velocidad de caída calculada el efecto de la turbulencia (Winterwerp and Kesteren, 2004). Debido al efecto de la salinidad en las fuerzas electroquímicas que afectan la cohesión entre partículas es un tema de investigación actual la dependencia de la velocidad de caída con la salinidad.

Los flocs que arriban al fondo podrán romperse y volver a estar en suspensión si existen condiciones de alta turbulencia o podrán unirse al sedimento de fondo y por tanto depositar. Así, la tasa de deposición es una función de la velocidad de caída, de la concentración y de la tensión de corte cerca del fondo (Mehta and McAnally, 2008). En Winterwerp and Kesteren (2004) se describen en detalle los estudios que se han realizado vinculados a la deposición desde hace muchos años y los paradigmas planteados en cuanto a si la deposición y la erosión ocurren simultáneamente o no. El modelo más utilizado es la formulación de Krone que define que la deposición ocurre para tensiones de corte menores a una tensión crítica de deposición, y que la tasa está dada por la velocidad de caída y la concentración. Posteriormente otros autores como Mehta y Parteniades desarrollaron estudios en laboratorio con el objetivo de representar el decaimiento de la concentración en función del tiempo debido a la deposición del sedimento cohesivo. En Winterwerp and Kesteren (2004) incluso se menciona que físicamente los procesos de erosión y deposición no tienen porqué ser excluyentes y plantea que la deposición depende solamente del flujo de sedimentación en la capa cercana al fondo (dado por la velocidad de caída y la concentración cerca del fondo).

El material depositado en el fondo está sujeto al proceso de consolidación a través del cual el suelo adquiere su estructura y su consecuente resistencia a la posterior erosión. Cuando se trata de mezclas en suspensión de baja concentración, la consolidación por peso propio, debido a la gravedad, comienza en las capas inferiores y avanza hacia la superficie del depósito (Been and Sills, 1981). Debido a que los procesos de deposición y consolidación generalmente ocurren en la dirección vertical, con un movimiento descendente del sedimento y ascendente del agua, forzado principalmente por la gravedad, habitualmente se estudian estos procesos en condiciones de laboratorio utilizando columnas de consolidación (Been and Sills, 1981). En Migniot (1989) se presentan los resultados obtenidos para barros de diversos tipos de cuerpos de agua. El proceso de consolidación por peso propio mencionado puede aproximarse por la ecuación diferencial de Gibson que vincula las propiedades del suelo, tensión efectiva y permeabilidad, con la evolución temporal de la relación de vacíos. A medida que la consolidación aumenta la presión de poros disminuye y aumenta la tensión efectiva. Se ha observado que en las etapas iniciales del proceso de consolidación domina el flujo de agua de poros y la estructura del barro (depósito) es muy débil mientras que en las etapas finales del proceso la tensión efectiva comienza a ser más importante y el flujo por los poros despreciable (Merckelbach and Kranenburg, 2004). El estado de consolidación del suelo determina la resistencia del suelo a los procesos de erosión generados por el flujo.

Aunque se han desarrollado varias formulaciones para representar el proceso de erosión (superficial, en masa o debido al arrastre por inestabilidades internas) no se comprende aún el proceso básico mediante el cual la interfase entre el fondo y la columna de agua responde a las tensiones del flujo (Mehta and McAnally, 2008). Básicamente las formulaciones representan situaciones estacionarias o cuasi estacionarias que se utilizan de forma sucesiva para representar la evolución temporal. El modelo más utilizado, la fórmula de Partheniades, considera que la erosión ocurre en ausencia de deposición y que varía con el exceso de tensión de corte respecto a un valor crítico de erosión. Para fondos con variaciones de densidad (estratificados) se ha observado es posible utilizar la misma formulación pero permitiendo una variación de la tensión de corte crítica de erosión con la profundidad, respondiendo a la idea de que fondos más densos son más difíciles de erosionar (Mehta and McAnally, 2008). Por otra parte los procesos de erosión por arrastre del material barroso desde la capa fluida a la columna de agua ocurren por inestabilidades hidrodinámicas en la interfase entre ambos. Estos procesos en general se parametrizan en función del número de Richardson que caracteriza la estratificación (Mehta and McAnally, 2008).

Los procesos básicos descriptos que intervienen en la dinámica de sedimentos finos presentan en la realidad ciertas interacciones entre ellos que complejiza aún más su estudio. Además, cuando se trata de mezcla de materiales cohesivos con no cohesivos el comportamiento de la misma puede presentar otro tipo de propiedades. A pesar de muchos estudios resta mucho avance para poder entender procesos físicos básicos. Debido a esto, el desarrollo de instrumentos y la realización de mediciones de campo para comprender los fenómenos de cuerpos de agua específicos, el uso y desarrollo de modelos numéricos, y la realización de ensayos de laboratorio, continúan siendo la forma de abordaje de los problemas de ingeniería vinculados a la dinámica de sedimentos finos (Winterwerp and Kesteren, 2004).

1.1.3. Dinámica de sedimentos cohesivos en estuarios

El desarrollo actual de la temática de interés incluye, además de las investigaciones de los procesos elementales mencionados, estudios de los procesos físicos integrados en zonas estuarinas y costeras. Estos últimos se basan en el análisis de casos de estudio, para los cuales a través de la combinación de información de campo, modelos analíticos y modelos numéricos, se desarrollan modelos conceptuales de la dinámica de sedimentos cohesivos en estuarios.

Los procesos hidrodinámicos en los estuarios presentan una gran variabilidad dependiendo de características específicas de los mismos como la descarga fluvial, mareas, viento y de cómo estos forzantes interactúan con la topografía. La forma clásica de clasificar los estuarios se basa en la distribución de salinidad y en las características del flujo dentro del estuario. Los estuarios parcialmente mezclados se caracterizan por la circulación vertical gravitacional con una capa menos densa que fluye superficialmente hacia el mar por encima de una capa más densa que fluye hacia el continente. Por otra parte en los estuarios bien mezclados la mezcla en la columna de agua impide la formación de éstas dos capas con flujo opuesto, aunque existan leves variaciones de densidad en la vertical (Dyer, 1997).

Muchos estudios realizados han mostrado resultados diversos en función de las características de cada estuario. Por ejemplo Officer (1992) afirma que en estuarios grandes son relevantes los efectos laterales, la geometría del estuario, los efectos atmosféricos y las tensiones del viento. Para los estuarios denominados micromareales, donde la marea presenta un rango de variación menor a los 2 m, el agua salada puede penetrar por debajo del agua dulce de los ríos como una cuña salina bien marcada. Estratificaciones fuertes de densidad pueden mantenerse por la descarga fluvial cuando

el viento y la turbulencia inducida por marea no generan una mezcla completa de la columna de agua (Geyer and Farmer, 1989). La interface entre el agua salada y el agua dulce se conoce como haloclina. El efecto del viento en los estuarios también puede ser relevante y su efecto sobre la hidrodinámica también ha sido estudiado. Por ejemplo Elliot (1978) y Wang (1979) observaron un movimiento en dos capas en respuesta al forzante viento, un flujo en la dirección del viento en las capas superficiales y un flujo contrario al mismo cerca del fondo. En los estuarios micromareales y poco profundos la turbulencia inducida por el viento genera un proceso de mezcla y en consecuencia la concentración de sal es prácticamente uniforme en la vertical. Sin embargo esta concentración varía en las direcciones longitudinal y lateral. En algunos casos, el forzante viento puede dominar sobre la circulación gravitacional y así controlar la estructura de salinidad (Geyer, 1997).

Más allá de las características particulares de cada uno, es posible afirmar que en los estuarios tanto los forzantes que provienen del continente (como la descarga fluvial), como los forzantes que provienen del océano (las ondas de marea astronómica y meteorológica, el oleaje y el agua salada de características químicas y biológicas específicas), en conjunto con los forzantes atmosféricos (vientos, precipitación, presiones atmosféricas, etc), actúan generando patrones de circulación y de salinidad determinados dependiendo además de las características batimétricas y geométricas. Además, como bien menciona Dyer en su publicación sobre los procesos de transporte de sedimento en estuarios (Dyer, 1995), los estuarios son la ruta a través de la cual se transporta el sedimento de la cuenca de aporte desde los ríos al mar. El transporte fluvial de sedimentos presenta una dinámica de continua deposición, erosión y transporte en función de la variación del caudal; en general el sedimento más grueso queda atrapado en las planicies de inundación y solamente es removido en períodos de grandes lluvias. La fracción más fina es la que habitualmente ingresa al estuario donde interactúa con el sedimento más viejo del fondo y con el posible sedimento que proviene desde el mar. A la complejidad propia de la dinámica de los sedimentos cohesivos se le suma entonces la complejidad de los procesos hidrodinámicos y químico-biológicos de los estuarios. En consecuencia la concentración de sedimento en suspensión en un estuario en general varía según las condiciones de la marea (rango y ciclo), según el caudal fluvial, las tormentas y las condiciones de mezcla.

En Dyer (1995) se describen varias de las consecuencias de la interacción de ambas dinámicas que confluyen en los estuarios, denominados efectos de retardo ('lag effects') respecto al flujo. Estos efectos surgen porque los sedimentos finos no son trazadores pasivos y por tanto no responden instantáneamente al flujo, en cuyo caso el movimiento de los mismos sería según el patrón del flujo residual. La diferencia de fase entre el flujo y el movimiento de los sedimentos podrá entonces generar patrones de dinámica de sedimentos diferentes a los del flujo residual. Se definen varios tipos de efectos de retardo según las razones que los generan: a) el retardo por umbral ('threshold lag') producto de que el flujo debe superar un umbral (tensión crítica de erosión) para generar resuspensión y cualquier asimetría en las corrientes durante el ciclo de marea generará diferencias en el transporte de sedimentos; b) el retardo por erosión ('erosion lag') producto de la consolidación del suelo y el incremento de la tensión de corte crítica con el tiempo; c) el retardo de mezcla ('scour lag') asociado al tiempo que le lleva al sedimento resuspendido mezclarse hacia las capas superiores y su dependencia con la estratificación, y d) el retardo por caída ('settling lag') se refiere a que una partícula demora cierto tiempo en sedimentar y por tanto en depositarse, y lo hará en una zona diferente a la zona donde resuspendió o comenzó su proceso de caída.

Todos estos aspectos generan que el movimiento de los sedimentos finos no sea evidente, y por tanto resulta complejo determinar patrones generales de transporte de

forma analítica. El máximo de turbidez es uno de los comportamientos más distintivos del transporte de sedimento en los estuarios (Dyer, 1995). Esta es una zona que contiene concentraciones de sedimento en suspensión mayores a las de la zona estuarina de alrededor, hacia el río y hacia el mar. En general se ubica donde la salinidad varía entre 1 y 5 ppm (o en algún lugar hacia el continente desde el límite de la intrusión salina). El flujo de marea es el que mantiene las altas concentraciones y hay un número de procesos que concentran el sedimento en suspensión y previenen que se dispersen las partículas. La circulación gravitacional mencionada anteriormente se ha considerado como uno de los factores determinantes en la formación del máximo de turbidez (Dyer, 1995). Sin embargo se ha observado que los efectos combinados de los efectos de retardo mencionados, asociados a las diferencias en los ciclos de resuspensión, transporte y deposición del sedimento, generadas por la combinación con las corrientes asimétricas de marea, son los que mantienen el máximo de turbidez en zonas estuarinas.

1.1.4. Zona de estudio: el Río de la Plata

1.1.4.1. Características generales

El Río de la Plata (Figura 1.2) está ubicado sobre la costa Este de América del Sur aproximadamente entre los 34° y 36° latitud Sur y 54°50' y 58°30' de longitud Oeste, y vierte en el Océano Atlántico la segunda cuenca de aporte más importante de Sudamérica luego de la cuenca amazónica.



Figura 1.2: Características fisiográficas del Río de la Plata. Modificado de FREPLATA (2004).

Es un cuerpo de agua de gran importancia socio ambiental para los dos países que comparten su jurisdicción, la República Argentina y la República Oriental del Uruguay. En sus márgenes se encuentran las capitales de ambos países, Buenos Aires y Montevideo, y otras ciudades importantes que abarcan casi 40 millones de habitantes

(FREPLATA, 2004), en las cuales se desarrollan actividades industriales, portuarias, pesqueras, entre otras. Sus límites fueron fijados en el Tratado del Río de la Plata en 1973 por los países limítrofes. El límite interior está determinado por el paralelo que pasa por Punta Gorda en la costa uruguaya y por la desembocadura de los ríos Paraná y Uruguay en la costa argentina. El límite exterior con el océano está determinado por una línea recta que une Punta del Este en la costa uruguaya con Punta Rasa en la costa argentina. La superficie total del Río de la Plata se estima en aproximadamente 30.000 Km², la longitud aproximada es 280 Km a lo largo del eje y tiene una sección transversal que aumenta hacia el Sureste desde 2 Km en Punta Gorda, 32 Km entre Colonia y La Plata, 100 Km entre Montevideo y Punta Piedras y 220 Km entre Punta del Este y Punta Rasa. La zona incluida entre Montevideo y Punta Piedras, hasta Barra del Indio y hacia la desembocadura del río Santa Lucía, es lo que se denomina la zona del Frente del Río de la Plata, y coincide con la gran expansión de su sección transversal.

En base a las características físicas el Río de la Plata se divide en dos grandes zonas, la zona intermedia (desde Barra del Indio hacia los tributarios) y la zona exterior (desde Barra del Indio hacia el océano). La zona interior-intermedia está caracterizada por una dinámica fluvial de comportamiento cuasi-bidimensional con influencia de las mareas y el agua es dulce con una turbidez permanente. La zona exterior está caracterizada por una dinámica del tipo estuario con flujo de características tridimensionales. Otras clasificaciones (Boschi, 1988) agregan una zona interior, correspondiente a la zona superior de la zona intermedia hasta que finaliza Playa Honda.

En los últimos años se han realizado grandes avances en lo referente a la caracterización de la zona y al diagnóstico socio-ambiental del Río de la Plata a través del desarrollo de proyectos con fondos internacionales, como ECOPLATA y FREPLATA, durante los cuales se realizaron estudios técnicos y mediciones de campo para avanzar en el conocimiento de la dinámica del cuerpo de agua (Wells and Daborn, 1998; ECOPLATA, 1999; FREPLATA, 2004).

1.1.4.2. Características hidrodinámicas

En el Río de la Plata los principales forzantes que influyen sobre la circulación del agua son la descarga fluvial de sus tributarios, la onda de marea oceánica (astronómica y meteorológica) y los vientos que soplan sobre la superficie del agua, pero las variaciones en los parámetros físico-químicos (particularmente la salinidad) afectan también la circulación al modificar la densidad del agua. El efecto de los forzantes sobre el agua está condicionado, a su vez, por la configuración de la línea de costa y la batimetría de fondo. El aumento, primero paulatino y luego abrupto, en la sección transversal del río tiene gran influencia en sus características hidrodinámicas (FREPLATA, 2004). La marea astronómica en el Río de la Plata es micromareal de régimen diurno con desigualdades semidiurnas y la componente principal de marea es la M₂ (FREPLATA, 2004; Fossati and Piedra-Cueva, 2013). A través de los ríos Paraná y Uruguay proviene más del 97% del ingreso de agua dulce al Río de la Plata, siendo la descarga media aproximadamente 23.000 m³/s. El agua dulce se mezcla con las aguas oceánicas generando una dinámica del campo salino en toda la zona exterior del Río de la Plata.

En los últimos años se han realizado avances importantes en la comprensión de la dinámica global del Río de la Plata, a través de la realización de campañas de medición y del desarrollo de modelos numéricos. Respecto a las mediciones son realizadas en general por el Servicio Hidrográfico Argentino (SHN), el Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA) de Uruguay, ó el Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP). Las publicaciones de referencia vinculadas a mediciones y análisis oceanográficos en la zona de estudio son: la de

Framiñán and Brown (1996) en donde se analiza la dinámica del frente de turbidez a través de datos satelitales; la de Guerrero et al. (1997) donde se presentan los aspectos generales de la dinámica considerando la importancia del campo salino en la zona exterior; y más recientes la publicación de Piola et al. (2003) donde se presenta una caracterización climatológica del campo salino; Sepúlveda et al. (2003) y Framiñán et al. (2008) donde se presentan resultados de mediciones en la zona central del Río de la Plata y se analiza la dinámica de la zona estuarina; Simionato et al. (2005) donde se presenta la dinámica del perfil de velocidades obtenidas a partir del análisis de mediciones con ADCPs en dos puntos del Río de la Plata realizadas en el marco del proyecto FREPLATA; y Acha et al. (2008) que presenta una actualización del modelo conceptual físico y ecológico del Río de la Plata en base a mediciones e información secundaria. Se destacan también los estudios de la dinámica en la costa uruguaya realizados a partir del análisis de las mediciones de dos ADCPs ubicados en la zona por la Intendencia Municipal de Montevideo (IMM) en cooperación con el SOHMA y el IMFIA (Fossati et al., 2009; Mosquera et al., 2012).

También se destaca el análisis de la marea astronómica realizado por Fernández (Fernández, 2011) y el análisis de la marea meteorológica realizado por Santoro (Santoro et al., 2010; Santoro, 2011b), utilizando mediciones de niveles en las estaciones costeras del Río de la Plata y del Frente Marítimo. En la Figura 1.3 se presentan algunos de los resultados obtenidos en dichos trabajos; por un lado la amplitud de las principales componentes de marea astronómica en cada estación del Río de la Plata y la importancia relativa de cada componente por estación, y por otro lado la importancia de la componente meteorológica de marea expresada como el porcentaje de varianza de la serie total de niveles. La componente meteorológica de marea es la generada por el forzante atmosférico y para el Río de la Plata básicamente corresponde a la componente no-astronómica de la marea, siendo generada por la interacción atmósfera-océano en el Atlántico Sur (Santoro, 2011b; Santoro et al., 2012). Se observa que la marea astronómica presenta mayores amplitudes sobre las estaciones ubicadas sobre la costa argentina del Río de la Plata que sobre la costa uruguaya, y que en general hay una disminución de la amplitud. Respecto a la marea meteorológica es relevante (desde el punto de vista energético) en todo el Río de la Plata, con una tendencia a ser de mayor influencia en los niveles de las estaciones ubicadas sobre la costa uruguaya.

En paralelo a los estudios mencionados, la aplicación de diversos modelos numéricos en la región ha permitido complementar los avances en la comprensión de la dinámica de flujo en el Río de la Plata y el Frente Marítimo. Por un lado el IMFIA ha desarrollado durante varios años modelos numéricos de circulación en el área para resolver problemas vinculados a la ingeniería. Varios avances se realizaron aplicando el modelo en elementos finitos RMA integrado en vertical. Por ejemplo se determinaron los principales corredores de flujo en la zona interior e intermedia del Río de la Plata producto de la descarga de los principales tributarios (Piedra-Cueva and Fossati, 2007); se investigó el comportamiento del campo salino y su variación estacional (Fossati and Piedra-Cueva, 2008); y se estudió la circulación de flujo en la Bahía de Montevideo (Santoro et al., in press) y las alteraciones generadas en la misma por descargas térmicas (Fossati et al., 2011). Además, en los últimos años se ha avanzado en el desarrollo y aplicación de la estrategia de modelos de pronóstico aplicando el modelo MOHID en el Atlántico Sur y el Río de la Plata (Santoro et al., 2011a). También el modelo MOHID se aplicó en su versión tridimensional baroclínica para estudiar la circulación general en todo el Río de la Plata y determinar los patrones principales de flujo residual en toda la zona (Fossati and Piedra-Cueva, 2013). En dicho artículo se presenta una caracterización general completa del flujo en el Río de la Plata y el Frente Marítimo. Respecto al flujo residual se destacan condiciones uniformes en la vertical en la zona intermedia con flujo saliente y condiciones de flujo en dos capas en la zona exterior: en las zonas profundas

sobre el fondo la corriente residual ingresa al Río de la Plata con un flujo superficial débil saliente al mismo, mientras que en las zonas poco profundas (costeras, sobre los Bancos y en la Bahía Samborombón) la corriente superficial residual hacia el océano es fuerte con una corriente muy débil sobre el fondo.

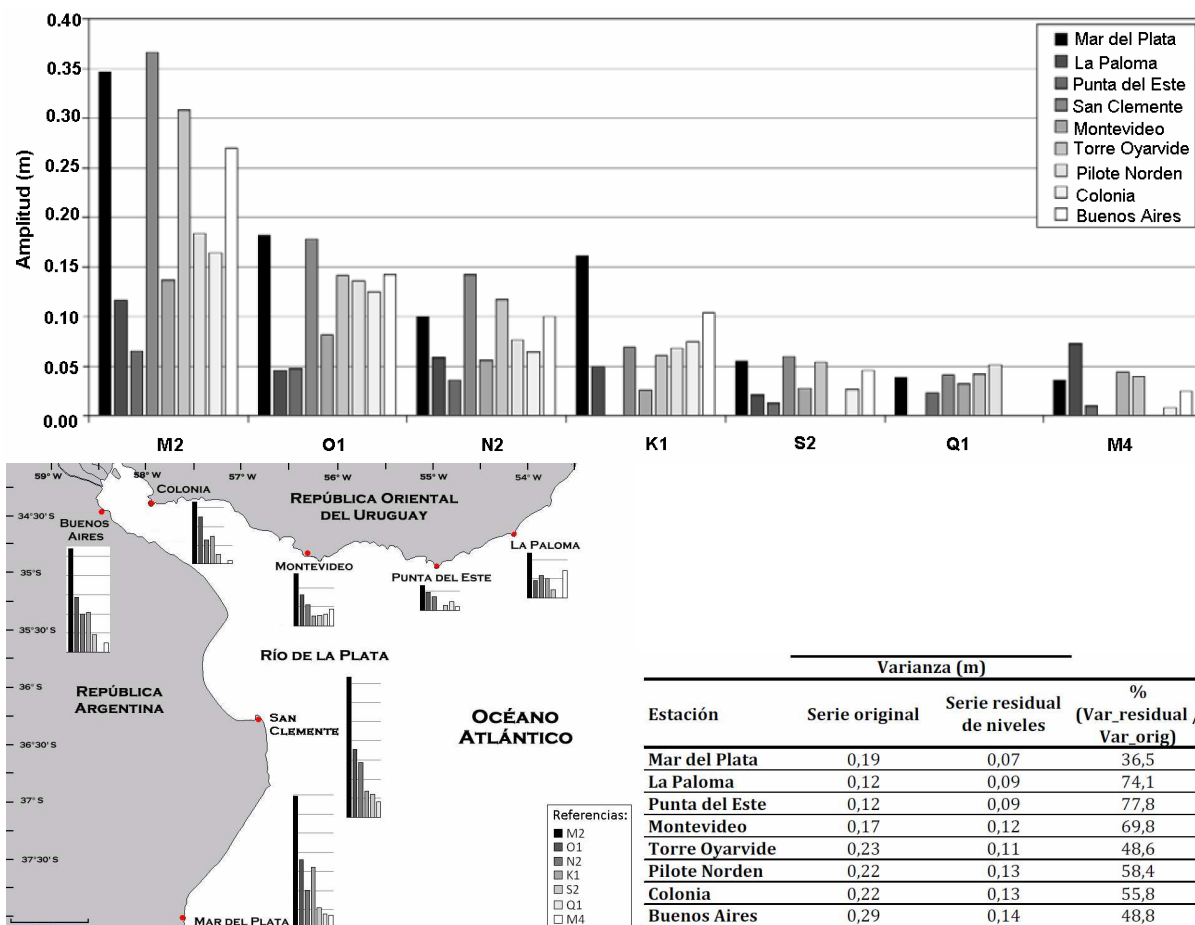


Figura 1.3: Amplitud (m) de las principales componentes de marea astronómica en el Río de la Plata (panel superior); distribución espacial de la importancia relativa de las principales componentes de marea astronómica por estación (panel inferior izquierdo) e importancia por estación de la componente meteorológica de la marea (panel inferior derecho).

Otros grupos de investigación también han aplicado exitosamente modelos numéricos en la zona de estudio y han logrado avances importantes principalmente en el análisis de procesos de gran escala y en la determinación de climatologías. Por ejemplo el grupo del CIMA de la UBA de Argentina estudió diferentes aspectos de la circulación global en el Río de la Plata utilizando el modelo HAMSOM 3D en su versión barotrópica con densidad constante (Simionato et al., 2004a y 2004b; Simionato et al., 2006). Por otro lado diversos aspectos ecológicos en la zona del frente del Río de la Plata se estudiaron utilizando el modelo tridimensional baroclínico ECOM (Simionato et al., 2008). Por otra parte se han realizado otros esfuerzos de avances en la modelación para el estudio de la circulación en la plataforma del Océano Atlántico (Palma et al., 2004; Palma et al., 2008; Glorioso and Flather, 1995); aunque normalmente la resolución de los mismos en la zona del Río de la Plata es baja.

En relación a la dinámica del campo salino existen varios trabajos que han analizado el tema, ya sea a través de mediciones de campo o modelación numérica (Guerrero et al., 1997; Boschi, 1988; Piola et al., 2003; Sepúlveda et al., 2003; Fossati

and Piedra-Cueva, 2008, Framiñan et al, 2008), además de los estudios realizados en el marco de los Proyectos ECOPLATA y FREPLATA mencionados anteriormente. Básicamente el campo salino se extiende desde la zona del frente hasta la zona de plataforma, y presenta mayor variabilidad sobre el sector norte del Río de la Plata, es decir, sobre el Canal Oriental. La ubicación del mismo depende principalmente del caudal fluvial y de los vientos, siendo también muy variable la estratificación vertical del campo salino. En general el Río de la Plata se encuentra en condiciones de estuario parcialmente mezclado (es decir, con estratificación vertical) pero la turbulencia de los vientos frecuentes modifica fácilmente las condiciones de mezcla.

1.1.4.3. Dinámica de sedimentos

Durante los últimos años pocos avances se han realizado en lo que respecta al estudio de la dinámica y transporte de sedimentos en el Río de la Plata. En relación a la geomorfología y caracterización de los sedimentos, en el capítulo 1 del informe (Wells and Daborn, 1998) realizado por López Laborde, se presenta una exhaustiva revisión de la información histórica, incluyendo los trabajos de Urien y Ottman, y las mediciones realizadas por los servicios hidrográficos de ambos países (SHN y SOHMA) en el marco del proyecto “Estudio para la Evaluación de la Contaminación en el Río de la Plata” realizado por la Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP). También el trabajo realizado por el IMFIA (Guarga et al., 1992) para la CARP incluye algunos aspectos interesantes sobre la dinámica de sedimentos en la zona.

Surgen entonces las unidades geomorfológicas del Río de la Plata que se presentaron en la Figura 1.2. Una descripción detallada de las mismas se encuentra en el capítulo 1 de la publicación mencionada (Wells and Daborn, 1998), presentando aquí los principales aspectos. Playa Honda se define como la prolongación subacuática del Delta del río Paraná, y es una extensa área de bajos fondos atravesada por canales; el sistema fluvial Norte son una serie de surcos generados por la acción erosiva de los ríos Uruguay y Paraná Bravo. En la zona intermedia superior contra la costa uruguaya se encuentra el Canal del norte; hacia el sur el Banco Grande de Ortiz, una amplia meseta con pronunciada pendiente hacia el sur y limitada por la isóbata de 6 m; y hacia la margen argentina se encuentra la Gran Hoya del Canal Intermedio, es decir, una fosa de mayor profundidad. El canal Oriental es de gran extensión y corresponde a una depresión del terreno que se extienden en rumbo este-oeste desde el Canal Norte hasta las proximidades de Punta del Este donde su dirección cambia hacia el noreste. Barra del Indio es una planicie suave que va desde Montevideo hasta Punta Piedras. Sobre la costa argentina se define la franja costera Sur; hacia el exterior la zona profunda denominada Rada Marítima (o Canal Marítimo); el Umbral de Samborombón entre ambos; y el Alto Marítimo que contiene los Bancos Inglés, Arquímedes y Rouen.

En relación a los sedimentos superficiales de fondo y su composición (en porcentajes de arenas, limos y arcillas), existe información de la distribución espacial en todo el Río de la Plata presentada en (Wells and Daborn, 1998) extraída del trabajo de López Laborde. Las arenas predominan en el inicio del Río de la Plata, los limos predominan en la región intermedia y los limos arcillosos se encuentran hacia la zona exterior. En su análisis realizado en (Wells and Daborn, 1998) López Laborde menciona que es posible diferenciar dos facies de sedimentos, que estarían texturalmente interconectadas y formadas por sedimentos de diámetro medio decreciendo hacia el sudeste del Río de la Plata. Por un lado a lo largo de la costa norte se encontraría una asociación de arenas y arenas limosas desde la descarga de los ríos Uruguay y Paraná Guazú hacia Playa Honda, que pasarían a arenas limosas y limos en el Banco Grande de Ortiz, hasta limos, limos arcillosos e incluso arcillas limosas hacia el exterior. Por otro lado a lo largo de la costa sur desde la desembocadura del Paraná las Palmas se observan texturas más finas, que luego se extienden sobre la costa con una sola unidad

compuesta por limos arenosos que pasan luego gradualmente a arcillas limosas hacia el exterior.

En relación a las características principales del sedimento en suspensión y su dinámica se cuenta con menos información histórica que para el sedimento superficial de fondo. En el capítulo 2 del informe de ECOPLATA (Wells and Daborn, 1998) se presentan algunos datos de base sobre la dinámica del sedimento en suspensión. Básicamente los valores de concentración de sedimento en suspensión pueden alcanzar valores de 300 mg/l sobre la superficie y entre 200 y 500 mg/l en el fondo, y en la zona interior e intermedia se observa de forma permanente cierta turbidez en el agua. En la zona denominada del Frente (Barra del Indio) y en la zona exterior no es permanente sino ocasional la observación de sedimentos en suspensión, y se ha observado una gran variabilidad y por tanto una dinámica compleja en esta zona. En esta zona se ha observado principalmente en las imágenes satelitales lo que se denomina el frente de turbidez y la distribución espacial de la pluma de turbidez superficial. El estudio más exhaustivo del frente de turbidez es el realizado por Framiñán and Brown (1996) en el que determinaron las posiciones más frecuentes del frente utilizando imágenes satelitales tomadas entre 1986 y 1990, además de un análisis de la variación del mismo según las estaciones del año; obteniendo como principales resultados que la distribución media del frente de turbidez parecería estar relacionada con la topografía de fondo, siguiendo la isóbata de 5 m en la costa sur y la geometría de Barra del Indio en la zona central y norte. A pesar de que en dicho trabajo se menciona indistintamente máximo de turbidez y frente de turbidez, estrictamente se definió el frente de turbidez pues se trabajó con el mayor gradiente observado en la disminución de la intensidad de la imagen detectada por el satélite. Se considera que, aplicando estrictamente la definición de máximo de turbidez presentada anteriormente según la bibliografía internacional (Dyer, 1995), todavía no está claro si existe un máximo de turbidez en el Río de la Plata permanente, ó si solamente se observa en algunas zonas o en determinadas condiciones.

Recientemente investigadores del Instituto Nacional del Agua de Argentina (INA) han desarrollado varios estudios de la dinámica de sedimentos en la zona interior del Río de la Plata junto con un análisis de los aportes sólidos de los principales tributarios (Sarubbi, 2007; Menéndez et al., 2009; Ré et al., 2009). El trabajo de tesis de grado realizado por Sarubbi (Sarubbi, 2007) presenta una cuantificación de los principales aportes del río Paraná al Río de la Plata y un análisis del avance del delta. Menciona que el mayor aporte de sedimento al Río de la Plata proviene del río Paraná, al cual le aporta el Río Bermejo alrededor del 70% de su carga sólida. El río Paraná Inferior transporta una carga total de sedimentos en suspensión de aproximadamente 145 millones de toneladas anuales, repartida en función del tamaño de las partículas en 45 millones t/año (31%) de arcillas, 90 millones t/año (62%) de limos y 10 millones t/año (7%) de arenas. La carga de lavado estaría conformada por los limos y las arcillas, que representan aproximadamente el 90% de la carga total suspendida con una concentración media de alrededor de 250 mg/l; y la carga de fondo la conforma la arena transportada principalmente por arrastre (alrededor de 15 millones de toneladas al año). En el Delta del río Paraná se deposita prácticamente toda la arena transportada y una parte de los limos y arcillas, mientras que en los canales superiores del Río de la Plata se depositarían los limos más gruesos, aproximadamente 23 millones de toneladas anuales. En Menéndez et al. (2009) se plantea un modelo conceptual de transporte de sedimentos en el Río de la Plata interior e intermedio en función del análisis según la textura de sedimentos de fondo y sedimentos descargados por los principales tributarios, considerando los 3 corredores de flujo de los ríos Paraná Palmas, Guazú y Uruguay. Para el corredor las Palmas se plantea que la fracción gruesa de la carga en suspensión que ingresa al Río de la Plata (arenas finas y limos gruesos) deposita en su desembocadura aportando al avance del delta, luego hay una leve deposición en la zona de Playa Honda,

y la misma disminuye con la distancia a lo largo de la zona intermedia, donde los sedimentos de fondo están compuestos por limos principalmente, y donde la carga en suspensión de los mismos disminuye a medida que aumenta el dominio de las arcillas. En el corredor Guazú se plantea una deposición inmediata inicial de la fracción más gruesa arenosa que aporta al avance del delta, y una deposición posterior en la zona de Playa Honda; en la zona intermedia se esboza que las tasas de deposición serían bajas pues la textura de sedimento de fondo presenta mayor contenido arcilloso. En el corredor Uruguay luego de una deposición inicial de las arenas, las velocidades altas mantendrían el sedimento en suspensión sobre el sistema Fluvial Norte con leves tasas de deposición, y la posterior expansión del ancho luego de la ciudad de Colonia sería lo que permite la formación del Banco Grande de Ortiz.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE TESIS

1.2.1. Justificación y Motivación

En términos generales comprender las particularidades de la dinámica de sedimentos finos en cualquier estuario o zona costera se considera relevante por varios aspectos vinculados a la gestión ambiental. Por un lado la capacidad de que algunos contaminantes se adhieran a los sedimentos finos genera que para determinar las características del transporte y dispersión de los primeros necesariamente deban entenderse los mecanismos de transporte de los sedimentos finos. Por otro lado, para la planificación de actividades de navegación y dragado es imprescindible determinar las tasas de sedimentación y cómo es la dinámica en lugares específicos. Por otra parte, cuando la concentración de sedimento en suspensión es alta, ésta puede limitar la penetración de luz y productividad, un factor determinante para entender los ciclos biológicos en la zona y por tanto realizar una buena gestión del cuerpo de agua con el objetivo de proteger la biodiversidad. De manera similar los sustratos de fondo barrosos son habitats de diversas comunidades biológicas y por tanto sus ciclos se relacionan (Dyer, 1995). En síntesis hay una gran variedad de conflictos ambientales y sociales que se vinculan con la dinámica de sedimentos cohesivos, como la sedimentación en canales de navegación, problemas de calidad de agua, gestión sustentable de estuarios y zonas costeras, entre otros (Winterwerp and Kesteren, 2004).

El Río de la Plata no es ajeno a las problemáticas planteadas. El diagnóstico ambiental de dicho cuerpo de agua realizado en FREPLATA (2004) determinó que por ejemplo las concentraciones de metales pesados en los sedimentos superficiales del fondo del Río de la Plata interior e intermedio aumentan progresivamente hacia la zona del Frente, consistentemente con el transporte y sedimentación progresiva de las partículas finas. También se determinaron en los sedimentos de algunos de los afluentes de la Bahía Samborombón niveles de mercurio elevados y en los sedimentos de la Bahía de Montevideo y de sus afluentes (arroyos Miguelete y Pantanoso) se encontraron serios problemas de contaminación por metales pesados (plomo y cromo). Comprender cómo se transportan los sedimentos en todo el Río de la Plata y las zonas de deposición predominantes, resulta entonces determinante para gestionar los problemas de contaminación mencionados. Más allá de los problemas de contaminación en las franjas costeras de jurisdicción exclusiva de cada uno de los países limítrofes, del proyecto (FREPLATA, 2004) queda claro que en el cuerpo principal del Río de la Plata se observan aportes de contaminantes de origen transfronterizo, y señala como zona de atención la zona del Frente de gran importancia ecológica por la dinámica del frente salino. Resulta evidente entonces la necesidad de comprender la dinámica de sedimentos en la zona, cuantificando los procesos, y determinando los principales factores que la influyen y determinan. Otro tema relevante para el comercio exterior de Argentina y

Uruguay (FREPLATA, 2004) son las vías navegables del Río de la Plata para la navegación marítima, y para el transporte fluvial a través de los ríos Paraná y Uruguay que dependen de las mismas. La navegación en la zona se realiza a través de un sistema de canales naturales y dragados. Las condiciones de sedimentación y de transporte de sedimentos finos en toda el área serán relevantes tanto para los trabajos de diseño de los canales así como también para diseñar las actividades de mantenimiento y vertido de los barros dragados.

A pesar que desde hace muchos años hay interés de las instituciones y de la academia de mejorar el conocimiento de la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata, leves avances pudieron realizarse sin contar con información de campo diseñada específicamente para avanzar en el conocimiento, más allá de mejoras en otros sentidos como modelos analíticos o modelos numéricos. Durante los años 2005 y 2006 el IMFIA desarrolló el proyecto de investigación PDT S/C/OP/19/04 “Modelación hidrosedimentológica del Río de la Plata” financiado por DINACYT/DICYT/CONICYT (Piedra-Cueva et al., 2006). El objetivo del mismo fue la evaluación y predicción de tasas de sedimentación en las vías navegables del Río de la Plata, a través de la implementación de un modelo numérico hidrodinámico y de transporte de sedimentos finos tridimensional. A pesar del gran esfuerzo realizado en implementar y calibrar un modelo hidrodinámico tridimensional de buena resolución en la zona de estudio (Fossati and Piedra-Cueva, 2006), el avance en la dinámica de sedimentos fue considerablemente menor al esperado por la falta de mediciones para ajustar el modelo.

La oportunidad actual de avanzar en el conocimiento de la dinámica de sedimentos cohesivos en el Río de la Plata surge en respuesta directa a la participación del IMFIA en el proyecto FREPLATA-FFEM (FREPLATA, 2011) desarrollado entre 2008 y 2011. Dicho proyecto se tituló “Estudio de la dinámica hidro-sedimentológica del Río de la Plata: observación y modelación numérica de los sedimentos finos”, fue financiado por el Fondo Francés para el Medioambiente (FFEM) y se llevó a cabo en el marco del Proyecto FREPLATA “Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo: Prevención y Control de la Contaminación y Restauración de Hábitats” (PNUD/GEF/RLA/99/G31). En el proyecto participó un diverso grupo de trabajo formado por personal del Servicio de Hidrografía Naval – SHN (Argentina), del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera – CIMA (Argentina), del Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero - INIDEP (Argentina), del Instituto Nacional del Agua - INA (Argentina), del Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada – SOHMA (Uruguay) y del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Universidad de la República (Uruguay). Además, se contó con el apoyo y guía estratégica de varios investigadores relevantes en el área del Instituto Francés de Investigación para la Explotación del Mar – IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer). El proyecto comprendió básicamente dos grandes componentes, la realización de campañas de campo para medir las principales variables vinculadas con la hidrosedimentología del Río de la Plata y el trabajo en el modelo numérico MARS desarrollado por IFREMER. En particular desde el IMFIA participamos en la planificación de las mediciones, en el seguimiento de las mismas, y en todas las actividades de discusión y desarrollo de la estrategia de modelación, en forma conjunta y coordinada con investigadores de Argentina (CIMA, INA) y especialistas del IFREMER.

El principal avance logrado en el proyecto fue la generación de una nueva y extensa base de datos de información vinculada a sedimento en suspensión y sedimento de fondo en todo el Río de la Plata (Moreira et al., 2010). Por otro lado también se iniciaron trabajos de modelación numérica (Fossati et al., 2010) de la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata con la aplicación del modelo tridimensional MARS

desarrollado en el laboratorio IFREMER de Francia (Lazure and Dumas, 2008) que incluso había sido implementado en otros estudios en el Río de la Plata (Huret et al., 2005). Más allá de los buenos resultados parciales los tiempos del proyecto no fueron suficientes para desarrollar las etapas finales de desarrollo del modelo numérico y análisis de los resultados, y por tanto dichas etapas constituyen la base de éste trabajo de tesis. Durante el mismo la cooperación con los investigadores del IFREMER fue esencial y gran parte del trabajo se realizó durante dos estadias de trabajo en la sede del laboratorio ubicada en la ciudad de Brest, Francia, realizadas durante 2010 y 2011.

1.2.2. Objetivos

1.2.2.1. Objetivo general

Comprender los principales aspectos de la dinámica global de sedimentos finos del Río de la Plata y sus factores determinantes, identificando las principales estructuras del transporte y la zonificación de los mismos, en base al desarrollo de un modelo numérico de avanzada en la zona incluyendo la mayor cantidad de información de campo de calidad existente.

1.2.2.2. Objetivos específicos

- 1) Determinar las principales características de la dinámica de sedimento fino en el Río de la Plata a partir de la depuración, procesamiento y análisis de la información de campo recolectada recientemente en el marco del Proyecto FREPLATA-FFEM.
- 2) Mejorar el modelo hidrodinámico tridimensional MARS del Río de la Plata, forzante del modelo de sedimentos finos, a través de la calibración considerando la información de campo reciente.
- 3) Implementar y validar el modelo de oleaje SWAN del Río de la Plata, forzante del modelo de sedimentos finos, generando los mecanismos de intercambio de información con el modelo MARS.
- 4) Determinar las características principales de los patrones espaciales de las tensiones de corte generadas por las corrientes de marea y por el oleaje en el fondo del Río de la Plata.
- 5) Implementar y validar el modelo MARS de sedimento finos para el Río de la Plata utilizando la nueva información de campo existente.
- 6) Determinar las principales características de la dinámica global de sedimentos finos en el Río de la Plata en base a los resultados obtenidos con el modelo numérico ajustado.

1.2.3. Estrategia general

Se contemplan en este trabajo las principales recomendaciones y sugerencias de la bibliografía sobre el estudio de la dinámica de sedimentos. Dyer (1995) por ejemplo destaca que la predicción de los patrones de sedimento futuros y de las tasas de sedimentación depende de un complejo de procesos interactivos. Por un lado los modelos requieren una buena base hidrodinámica acoplada con una correcta especificación de los umbrales de erosión, de las tasas de velocidad de caída, y de la consolidación del sedimento. A su vez, la modificación de la turbulencia y de las propias tensiones de corte que puede ocurrir en zonas de capas de barro de alta concentración es un efecto de los sedimentos sobre el flujo que debería incluirse. La floculación es también un proceso importante ya que responde a una interacción directa entre el flujo y las propiedades del sedimento. Menciona además que en zonas poco profundas las olas y las corrientes podrán en conjunto ser importantes, y por tanto los modelos deberán ser

tridimensionales. Debido a la influencia del tiempo en las reacciones del sedimento a las variaciones de flujo los modelos promediados temporalmente (en ciclos de marea) deben evitarse. A su vez, en relación a la modelación del transporte de sedimento, una de los aspectos más relevantes en relación al flujo es la capa límite de fondo a través de la cual el flujo principal influye sobre el fondo (Nielsen, 1992). Claramente los modelos matemáticos que representan las ecuaciones que gobiernan los principales procesos vinculados a la dinámica de sedimentos finos son herramientas con mucho potencial, pues permiten integrar en el espacio y en el tiempo las diversas componentes, permitiendo a su vez cuantificar balances y campos medios. No obstante estos modelos deben ser calibrados y validados, siendo necesario e imprescindible contar con mediciones del cuerpo de agua a estudiar (Waeles et al., 2008).

La estrategia general utilizada en este trabajo consiste en el desarrollo y ajuste de un modelo numérico de sedimentos finos en la zona de estudio que represente los procesos básicos de la dinámica y que incluya los principales forzantes hidrodinámicos del sistema. Para esto se requiere trabajar en aspectos directamente vinculados a los sedimentos finos, es decir, el estudio de los procesos básicos, el análisis de información de campo incluyendo en el modelo los principales aspectos surgidos del mismo, y el trabajo concreto en el desarrollo y ajuste del modelo de sedimentos. Sin embargo, es clave además contar con una correcta representación de los forzantes hidrodinámicos del sistema (mareas y oleaje) ya que la calidad del modelo de sedimentos depende directamente de la calidad de la representación del flujo en la zona de estudio. Parte de la estrategia entonces ha sido trabajar intensamente en los modelos hidrodinámicos de marea y de oleaje para obtener una calidad adecuada en la representación de los forzantes. Otro aspecto clave de la estrategia aplicada ha sido la de continuar con el trabajo iniciado en el Proyecto FREPLATA-FFEM, realizando una revisión de los principales aspectos desarrollados durante el mismo, tomando como base los considerados aceptables y mejorando los que se consideraron débiles.

En otro orden se realizaron en laboratorio algunos ensayos de columna de consolidación de sedimento de fondo (barro) extraído en diversas zonas del Río de la Plata (Fossati et al., 2012). El objetivo de los mismos fue estudiar el fenómeno de consolidación de barros (de la zona de estudio) sumergidos en condiciones ideales, y obtener medidas para calibrar posteriormente un modelo simple 1D vertical de consolidación que pudiera ser acoplado al modelo MARS. En los ensayos realizados se determinó la curva de consolidación o compactación de las diversas muestras ensayadas, es decir, la variación de la altura del depósito a lo largo del tiempo. En particular, se definieron tres objetivos específicos para ser estudiados con las series de ensayos realizados: la influencia de la concentración inicial del depósito, la influencia de la composición sedimentológica y la influencia de las variaciones de salinidad en las curvas de consolidación del sedimento del Río de la Plata. A pesar de que los ensayos fueron exitosos, la estrategia de modelación numérica de los sedimentos finos aplicada en éste trabajo no incluyó el proceso de consolidación de los barros de fondo en el modelo MARS, y por tanto aún no fueron utilizadas las medidas recolectadas para ajustar el modelo unidireccional de consolidación.

1.2.4. Estructura del documento

El documento se estructura básicamente en función de los 6 objetivos específicos planteados para alcanzar el objetivo general, conteniendo además del capítulo de introducción (Capítulo 1), conclusiones (Capítulo 6) y bibliografía (Capítulo 7), cuatro capítulos principales. En cada uno de los capítulos se presenta la metodología específica empleada en cada etapa, los principales aspectos teóricos involucrados y los principales resultados obtenidos.

El Capítulo 2 responde al objetivo específico 1 y se refiere concretamente al análisis de la información de campo vinculada con los sedimentos finos recientemente obtenida en el marco del Proyecto FREPLATA-FFEM. El proceso realizado incluye una depuración inicial de los datos crudos recolectados, su procesamiento y el posterior análisis. Se cuenta con información de la columna de agua registrada de manera continua en las tres zonas del Río de la Plata durante varios meses. Por otro lado se cuenta con información discreta en la columna de agua y del sedimento de fondo en 26 estaciones de control distribuidas en toda la zona de interés. Analizando con cuidado esta información se obtiene una caracterización general de la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata en base a mediciones. Algunos aspectos complementarios a los desarrollados en este capítulo se presentan en el Anexo A.

El Capítulo 3 presenta la metodología, desarrollo y resultados obtenidos en relación a la modelación de los forzantes hidrodinámicos del sistema, es decir, corrientes de marea y oleaje, y a la determinación de las tensiones de corte de fondo. Se responde de esta manera a los objetivos específicos 2, 3 y 4 del trabajo. Inicialmente se presenta la estrategia de modelación hidrodinámica planteada, definida básicamente durante el Proyecto FREPLATA-FFEM, formada por dos modelos: un modelo regional del Atlántico Sur de baja resolución bidimensional barotrópico (rank0), y un modelo tridimensional baroclínico del Río de la Plata y Frente Marítimo de mayor resolución (rank1). Básicamente en este trabajo se mejoró el modelo hidrodinámico enfocado en la zona de estudio a través del ajuste de parámetros y formulaciones vinculadas con la turbulencia vertical y la tensión de corte del viento, utilizando mediciones de corrientes, salinidad y niveles en el área. La segunda parte del capítulo refiere a la implementación y ajuste del modelo de oleaje SWAN en el dominio de cálculo definido para el modelo hidrodinámico rank1. Para la calibración y validación del modelo se utilizaron datos de oleaje medidos en dos puntos del Río de la Plata (Hidroviá, Montevideo) y se utilizan como condiciones de borde las características del oleaje obtenido del modelo global WW3 implementado en IFREMER. Por último, se determinan las tensiones de corte de fondo generadas por las corrientes de marea y por el oleaje en todo el Río de la Plata, realizando además en análisis de las características espaciales de las mismas. Algunos aspectos complementarios a los desarrollados en este capítulo se presentan en el Anexo B.

El Capítulo 4 se centra en la implementación y en el ajuste del modelo de sedimentos finos MARS implementado en el área, respondiendo directamente al 5^{to} objetivo específico planteado en este estudio. Los principales procesos incluidos en el modelo comprenden la advección y dispersión de los sedimentos cohesivos según la hidrodinámica de marea, la velocidad de caída de las partículas (considerando el efecto de la floculación), y los procesos de intercambio con el sedimento de fondo erosión y deposición. No se considera en la implementación realizada el proceso de consolidación del sedimento de fondo. Se definieron dos tipos de sedimento finos en el modelo, limos y arcillas, y se utiliza como condición inicial del sedimento de fondo información histórica de la composición en todo el Río de la Plata. Se realizaron una gran diversidad de análisis de sensibilidad de los resultados del modelo a los principales parámetros del mismo, parametrizaciones de las velocidades de caída, tasas de erosión y tensiones críticas de erosión y deposición, entre otros. Se utilizaron para ajustar el modelo las mediciones continuas de turbidez realizadas en el marco del Proyecto FREPLATA-FFEM, así como también los datos medidos, durante las campañas oceanográficas de dicho Proyecto, de perfiles verticales de turbidez y composición de sedimento de fondo. Como resultado se obtiene un modelo de sedimentos finos que representa correctamente las principales características de la dinámica de sedimentos finos en todo el Río de la Plata en situaciones de calma (dominadas por la marea) y en situaciones de tormenta (dominadas por el oleaje). Algunos aspectos complementarios a los desarrollados en este capítulo se presentan en el Anexo C.

Por último, en el Capítulo 5 se presenta el análisis de los resultados obtenidos con el modelo, respondiendo al objetivo específico 6. A partir de la simulación del período de tiempo de dos años (2009-2010) se analiza en detalle las características del sedimento en suspensión en las tres zonas del Río de la Plata, analizando la variación temporal y espacial (horizontal y vertical). Los resultados muestran una zonificación de la dinámica en función de la importancia relativa de los forzantes marea y oleaje, y de la influencia del campo salino. Los procesos de intercambio entre la columna de agua y el fondo son relevantes en todo el dominio de cálculo. Por otro lado se analiza la evolución temporal y espacial del sedimento de fondo, determinando las principales zonas con tendencia a la deposición y a la erosión en la zona de estudio. A partir de los análisis de la dinámica de sedimentos se dividió el Río de la Plata en 10 zonas y se utilizó el modelo para determinar la evolución temporal del sedimento originario de cada zona, tanto en suspensión como en fondo a través de los procesos de erosión. Como resultado se obtiene una cuantificación de cómo son los intercambios de sedimento fino entre las diversas zonas del Río de la Plata, lo que constituye un gran insumo para la gestión ambiental de dicho cuerpo de agua. A partir del análisis integrado de todos los resultados se obtiene una nueva determinación de cómo es la dinámica global de sedimentos finos en el Río de la Plata.

Capítulo 2

2. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE CAMPO VINCULADA A LOS SEDIMENTOS FINOS

2.1. INTRODUCCIÓN

Debido a la complejidad de los procesos que intervienen en la dinámica de sedimentos cohesivos, contar con información de campo que permita entender la particularidad de cada caso es sumamente imprescindible. Por tanto el estudio y análisis de datos disponibles relacionados con los sedimentos finos en el Río de la Plata es determinante para entender su dinámica. No obstante las mediciones no son sencillas y requieren mucho esfuerzo, principalmente en cuerpos de agua de alta complejidad como lo es el Río de la Plata.

2.1.1. Descripción general de la información disponible

Se cuenta actualmente con una extensa cantidad de información de diversa índole recolectada recientemente en el marco del proyecto internacional FREPLATA-FFEM (FREPLATA, 2011). La diversidad en la información generada, su simultaneidad y la gran cobertura espacial requiere que la misma sea procesada y analizada con mucho cuidado para extraer la mayor cantidad de información posible de calidad, que aporte a la mejora del conocimiento de la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata. La mayor parte de este capítulo se refiere al análisis de dicha información.

Por otro lado, se cuenta con información del perfil de concentración de sedimento en suspensión determinado indirectamente a partir del retorno de la señal acústica de un perfilador ADCP instalado en la costa de Montevideo durante los últimos años (Bellón et al., 2010). En el Anexo A.1 se resumen los principales aspectos de la dinámica de sedimentos finos que se desprenden del análisis de dichos datos y que complementan la extensa base de datos del Proyecto mencionado anteriormente en la zona costera de Montevideo.

En otro orden, se realizaron ensayos en laboratorio con sedimento de fondo extraído de diversas zonas del Río de la Plata para estudiar el proceso de consolidación de los mismos (Fossati et al., 2012). Se presentan en este capítulo sintéticamente los principales resultados obtenidos en los mismos, de interés para la caracterización general aquí realizada.

2.1.2. Base de datos Proyecto FREPLATA-FFEM

2.1.2.1. Información recolectada

En el proyecto FREPLATA-FFEM se definieron dos tipos de estrategias para la generación de información. Por un lado la medición continua de variables en determinadas ubicaciones fijas y por otro lado la medición puntual reiterada durante campañas oceanográficas en una gran red de puntos en el área de estudio.

Para las mediciones continuas se instalaron varios equipos de medición en estructuras fijas existentes (Pilote Norden y Torre Oyarvide) y en una Boya oceanográfica (Boya). En la Boya se instaló el equipo SMATCH que contiene sensores para medir temperatura, conductividad, turbidez, presión y oxígeno disuelto en un punto de la columna de agua, una estación meteorológica y un perfilador acústico de corrientes ADCP. En las estaciones fijas de Pilote Norden y Torre Oyarvide se instalaron dos equipos que registran en un punto de la columna de agua, un SMATCH con sensores de temperatura, conductividad y turbidez, y un equipo denominado SP2T que registra presión y temperatura. En la Figura 2.1 se presenta la ubicación de los puntos donde se instalaron equipos para la medición continua. Los equipos fueron distribuidos en diversas zonas, por un lado la Boya se ubica en la zona exterior central del Río de la Plata de características estuarinas, Torre Oyarvide se ubica en la zona intermedia sobre la costa argentina del Río de la Plata y Pilote Norden se ubica en la zona interior del Río de la Plata, zona dominada por la dinámica fluvial con influencia de la marea.

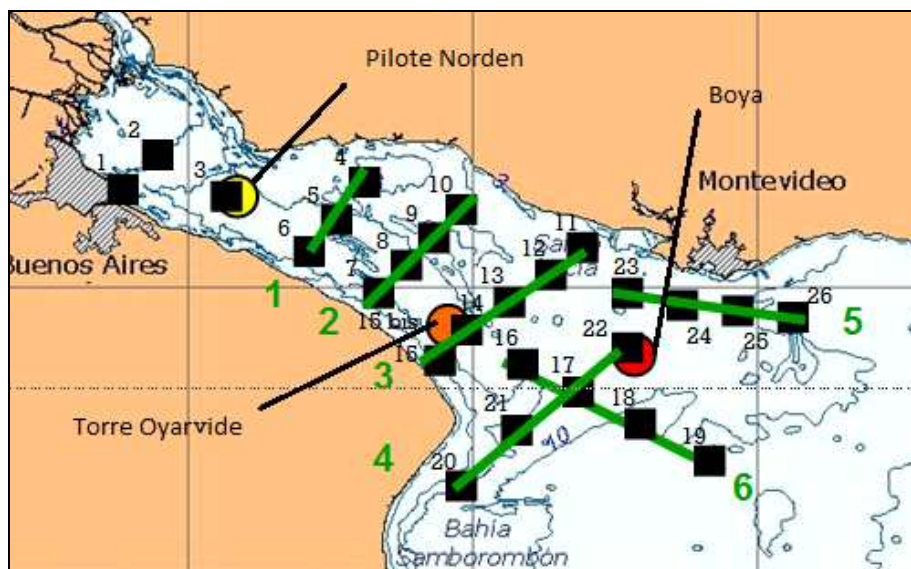


Figura 2.1: Ubicación de las estaciones de medición donde se extrajeron datos durante el Proyecto FREPLATA-FFEM (extraído de FREPLATA, 2011).

Por otro lado, las mediciones puntuales refieren a medidas realizadas en 26 estaciones de medición (que incluyen las 3 ubicaciones anteriores) con un CTD que registra a lo largo de la columna de agua conductividad, temperatura y presión, al cual se le acoplaron un turbidímetro y un fluorómetro. Además, en estas 26 estaciones se recolectaron muestras de agua para determinar características del sedimento en suspensión y del sedimento de fondo, las cuales fueron analizadas posteriormente en laboratorio. Durante las campañas se realizaron también las tareas de mantenimiento de los equipos fijos instalados en Pilote Norden, Torre Oyarvide y en la Boya. En la Figura 2.1 se presenta un esquema de la ubicación de los puntos de medición mencionados anteriormente. Cada una de las estaciones se identifica con un número. Son

de destacar las estaciones #22, #15bis y #3, las cuales corresponden a la Boya Oceanográfica, la estación fija Torre Oyarvide y la estación fija Pilote Norden.

La recolección de la información y el mantenimiento y operación de los equipos estuvieron a cargo de los servicios hidrográficos de Argentina y Uruguay, SHN y SOHMA, respectivamente. En determinadas tareas participaron además técnicos de IFREMER y del CIMA. La información discreta recolectada en cada campaña en las estaciones de medición fue publicada por los servicios en informes técnicos a partir de los cuales se extrajo la información para procesar y analizar en este trabajo. Por otra parte, se obtuvieron todas las series temporales de datos crudos medidas en los equipos fijos sin ningún tipo de preprocesamiento, lo que requirió de su realización para este estudio.

2.1.2.2. Períodos de medición

La primera campaña del proyecto se realizó a fines del 2009 durante la cual, además de realizar las mediciones en todas las estaciones, se instaló la Boya en el Río de la Plata y se dejaron sus equipos funcionando. También durante dicha campaña se instalaron los equipos en las estaciones fijas Pilote Norde y Torre Oyarvide. Luego durante el 2010 en cada campaña sucesiva se realizó el mantenimiento de los equipos fijos. En cada una de las campañas durante varias horas la embarcación se instalaba cerca de las mismas para permitir realizar tareas de extracción y reemplazo de equipos, verificación del funcionamiento, etc, con la correspondiente suspensión en la toma de mediciones. Esta discontinuidad de las series de medidas se toma en cuenta en los análisis realizados en este capítulo para dividir la base de datos en distintos períodos de tiempo. De esta forma por un lado se tiene la información puntual recolectada durante las campañas y por otro lado mediciones continuas en los 3 puntos fijos en los períodos de tiempo entre campañas. En la Tabla 2.1 se presentan las fechas de los distintos períodos y campañas de medición, así como también la nomenclatura utilizada en este estudio para hacer referencia a cada uno. Se realizaron 6 campañas en total que determinan 5 períodos de medición entre las mismas.

Nombre	Abreviación	Mes	Fechas
<i>Campaña 1</i>	<i>C1</i>	<i>nov-09</i>	<i>23/11 al 28/11</i>
			<i>dic-09</i>
Período 1	P1	ene-10	
		feb-10	
<i>Campaña 2</i>	<i>C2</i>	<i>mar-10</i>	<i>17/3 al 20/3</i>
		abr-10	
Período 2	P2	may-10	
<i>Campaña 3</i>	<i>C3</i>	<i>jun-10</i>	<i>23/6 al 26/6</i>
Período 3	P3	jul-10	
<i>Campaña 4</i>	<i>C4</i>	<i>ago-10</i>	<i>23/8 al 27/8</i>
Período 4	P4	sep-10	
<i>Campaña 5</i>	<i>C5</i>	<i>oct-10</i>	<i>25/10 al 28/10</i>
Período 5	P5	nov-10	
<i>Campaña 6</i>	<i>C6</i>	<i>dic-10</i>	<i>15/12 al 17/12</i>

Tabla 2.1: Períodos de tiempo definidos para el análisis de la información recolectada en el Proyecto FREPLATA-FFEM.

2.1.2.3. Estrategia de procesamiento y análisis de la información recolectada

Los distintos tipos de datos recolectados durante el Proyecto FREPLATA-FFEM fueron primero depurados y luego analizados de forma independiente. Para cada una de las estaciones fijas de medición (Boya, Torre Oyarvide y Pilote Norden) se depuraron y analizaron los datos registrados por los equipos instalados. Por otra parte, los diversos tipos de datos recolectados en las campañas oceanográficas se analizaron

individualmente por un lado y por otro lado de manera integrada analizando la variación temporal. Se procesó de esta forma la información del CTD, la información obtenida en laboratorio de las muestras de agua y los datos sobre el sedimento de fondo.

Habitualmente para determinar la concentración de sedimento fino se mide la turbidez (o turbiedad) del agua, es decir, la falta de transparencia de la misma debido a la presencia de partículas en suspensión. Se utilizan sensores específicos que registran turbidez en NTU, y en general se realiza una calibración con muestras de sedimento en suspensión para obtener la relación, en general lineal, entre turbidez y concentración. La curva de calibración es específica del equipo y puede variar con la composición del material en suspensión. Esta tarea no se realizó durante el trabajo de medición para ninguno de los turbidímetros de los equipos tipo SMATCH instalados en Pilote Norden, Torre Oyarvide y la Boya. Tampoco fue realizada para el turbidímetro del CTD utilizado durante las campañas oceanográficas. Por tanto toda la información disponible fue obtenida en valores de turbidez NTU sin ninguna curva de ajuste para concentración de sedimento. No obstante, por la importancia de contar con información de concentración y para poder comparar con el modelo numérico, se intentan en este trabajo buscar estrategias alternativas para poder disponer de información de concentración a partir de las mediciones de turbidez.

2.1.2.3.1. Series temporales

Respecto a las series temporales registradas en las estaciones fijas (Boya, Torre Oyarvide y Piote Norden), la depuración de los datos se realizó a partir de un chequeo de la calidad de las series obtenidas, identificando y descartando valores extremos erróneos registrados. Cada período de medición fue analizado en forma independiente considerando además el intercambio de algunos equipos. Como resultado de la depuración se obtienen las series de mediciones consideradas válidas que se utilizan para analizar el comportamiento de la dinámica global de sedimento fino y para ajustar el modelo numérico. Las series depuradas fueron utilizadas para realizar una determinación de los principales parámetros estadísticos de las series de turbidez medidas, de forma de conocer los valores habituales de dicha variable en las diversas zonas del Río de la Plata.

Por otra parte, se realizó un análisis integrado de variabilidad de las mediciones con la variabilidad temporal de los forzantes, analizando especialmente las desviaciones que muestran las señales respecto al comportamiento más frecuente o habitual, y su correlación con los forzantes. Como no se cuenta con mediciones directas de corriente y oleaje en cada punto fijo, la variabilidad temporal de los forzantes (tensiones de corte de fondo) se determinó con los modelos numéricos utilizados en este trabajo. La tensión de fondo total comprende la componente generada por las corrientes de marea y la componente generada por el oleaje. Otros trabajos han desarrollado análisis similares para entender la dinámica sedimentológica en cuerpos de agua fluviales y estuarinos (Nichols, 1993). El objetivo de este análisis es identificar en la señal de turbidez la respuesta a diversos forzantes, como por ejemplo, las tensiones de corte de fondo generadas por eventos de mayor energía. En esos casos la respuesta observada en la señal es un incremento de la turbidez. Además, se analizó la correlación con la oscilación de niveles en los casos donde la información está disponible. No obstante es importante considerar la complejidad en la interpretación de mediciones de campo y en la separación de los efectos sobre las señales de turbidez de los distintos procesos, advección por ejemplo versus procesos locales como caída o erosión de fondo (Dyer, 1995).

2.1.2.3.2. Muestras de sedimento en suspensión y de sedimento de fondo

Los datos obtenidos de las muestras de sedimento en suspensión y de sedimento de fondo extraídas durante las campañas oceanográficas del Proyecto FREPLATA-FFEM

fueron analizados en primer lugar considerando dos componentes, la variabilidad espacial y la variabilidad temporal. Por un lado se analiza la distribución espacial obtenida en cada campaña y por otro lado se analiza la variabilidad de cada una de las variables medidas en las diversas campañas.

Por otra parte, se realizó una caracterización del sedimento del Río de la Plata utilizando los diagramas triangulares habituales según el tamaño de grano. La fase sólida de los sedimentos se caracteriza según la distribución de tamaño de partículas, distinguiéndose entre las fracciones arcilla, limo, arena y grava; siendo la última muy baja cuando se trata de sedimentos cohesivos. Las fracciones de arcilla y limo constituyen lo que se denomina barro o finos. Es común en la rama de mecánica de suelos y sedimentología clasificar los suelos en el denominado triángulo arena-limo-arcilla, en el cual se grafican en sentido horario los porcentajes de cada material en los tres lados de un triángulo. La clasificación se restringe a sedimentos compuestos enteramente por tamaños de grano menores a 2 mm (Flemming, 2000). En el artículo (Flemming, 2000) se presentan las principales clasificaciones de sedimentos cohesivos según los diagramas de distribución de material de grano. Los más comunes y utilizados han sido los sistemas de clasificación propuestos por Shepard y Folk. Más recientemente Flemming propuso dos nuevas clasificaciones, una considerando las fracciones de arena y barro y otra considerando la relación entre fracción de arena, limo y arcilla. En la Figura 2.2 se presentan los diagramas triangulares de las 4 clasificaciones mencionadas.

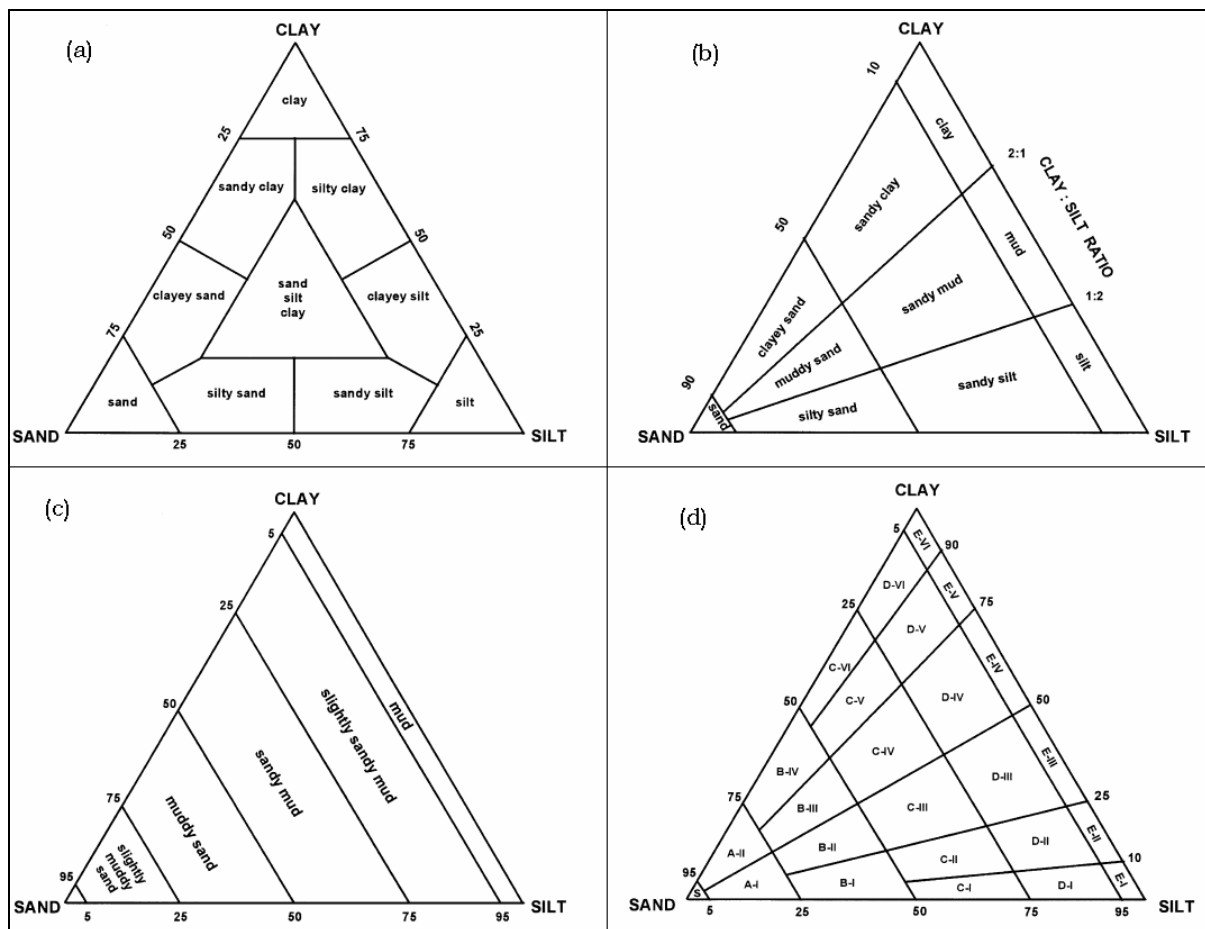


Figura 2.2: Diagramas triangulares utilizados para la clasificación de sedimentos según textura: (a) Shepard, (b) Folk, (c) Flemming en base a la relación contenido de arena y barro, y (d) Flemming en base a la relación del contenido de arena, limo y arcilla. Extraído de (Flemming, 2000).

El diagrama definido por Shepard define las 10 clases de sedimentos más utilizadas en función de la combinación de las fracciones de las tres componentes y el material predominante. El diagrama de Folk clasifica en cambio en 7 clases. Las críticas a estas clasificaciones refieren a que los límites son amplios entre los diversos tipos y así mezclas de sedimento distintas se clasifican igual. Así surgen las clasificaciones interrelacionadas propuestas por Flemming. Por un lado en el esquema simple con dos componentes (arena y finos) se distinguen 6 clases partiendo de arena (menos del 5% de contenido de finos) hasta finos (más del 95% de contenido de finos), permitiendo una mayor resolución para la tendencia de las texturas en función de la relación arena y finos. Este esquema es la base para el esquema más complejo donde se diferencia según arena, limo y arcilla, con mayor resolución en las clases definidas a medida que las proporciones de finos son mayores, definiendo 25 clases. La clasificación de Flemming propuesta en base a la relación del contenido de arena y barro se denomina Flemming I mientras que su clasificación más completa en base a la relación del contenido de arena, limo y arcilla se denomina Flemming II.

2.1.2.3.3. Perfiles CTD

Los datos de perfiles de turbidez y salinidad recolectados con el CTD en las estaciones monitoreadas durante las campañas oceanográficas del Proyecto FREPLATA-FFEM fueron analizados considerando la variabilidad espacial y la variabilidad temporal. Además, se determinó la correlación entre ambos perfiles y se analizó la forma de los perfiles normalizados con el objetivo de identificar comportamientos similares.

2.1.3. Esquema del capítulo

Las secciones siguientes del capítulo se dividen en función del tipo de dato registrado, depurado y analizado. En primer lugar se analizan las mediciones continuas registradas en la Boya Oceanográfica. En segundo lugar se presentan los análisis realizados a la información medida en Pilote Norden y luego en Torre Oyarvide. Seguidamente se analizan los diferentes tipos de información recolectada en las campañas oceanográficas. Por último se presentan sintéticamente los ensayos de laboratorio realizados para estudiar el proceso de consolidación de los barros del Río de la Plata. Al final del capítulo se presenta una discusión sobre los principales aspectos de la dinámica de sedimento finos que se desprenden de la información analizada.

2.2. BOYA OCEANOGRÁFICA

2.2.1. Descripción general del equipamiento

Según lo descripto en el Informe del SHN (SHN, 2010a) la Boya oceanográfica se instaló el día 26 de noviembre de 2009 en las proximidades del banco "Arquímedes" en el Río de la Plata, 34°59.338' latitud Sur, 57°20.435' longitud Oeste (35° 12' 0,00" S y 56° 24' 0,00" W), en una zona de 8 m de profundidad media. La Boya fue construida por la firma NKE de Francia y acoplada a la misma se instalaron tres equipos de medición. Por un lado un equipo SMATCH que cuenta con diversos sensores para la medición de parámetros oceanográficos (temperatura, conductividad, fluorescencia, presión, oxígeno disuelto y turbidez). Por otra parte se instaló también una estación meteorológica automática Vaisälä que registra dirección e intensidad del viento, presión atmosférica, temperatura del aire, humedad y precipitación. Por último, se instaló en la Boya un perfilador acústico de corrientes (ADCP) marca "RDI", modelo WorkHorse. La Boya a su vez, cuenta con un sistema de transmisión que permite la recepción a distancia de los datos salvo para la información del ADCP que se almacena en memorias del equipo. Además, la Boya cuenta con una baliza luminosa que responde a las normas de seguridad para los buques en navegación y una batería provista de un panel solar para

la alimentación de estos dos sistemas. Según la información suministrada por el SHN los sensores fueron calibrados en laboratorio previo a su instalación. Durante la instalación inicial se seteó el ADCP de frecuencia 1200 KHz para registrar información de corrientes y olas (procesadas a partir de la velocidad orbital). El perfilador acústico fue programado para medir el campo de corrientes en la columna de agua bajo la Boya cada 0,5 m (observando hacia abajo) y almacenar la información en dos memorias internas.

Es importante destacar que la Boya es un elemento flotante sobre la superficie libre de agua y está amarrada al fondo a través de dos cadenas unidas a dos muertos de hormigón para mantenerla en una misma ubicación. Esto significa que se supone la Boya tiene un movimiento solidario al movimiento de la superficie libre en relación a las oscilaciones verticales con estanqueidad en la dirección horizontal. Los equipos que trabajan sumergidos, el SMATCH y el ADCP, se instalan sobre una barra cada uno que se sujeta por su parte superior al piso de la Boya y deja los equipos en el agua en posición vertical. De esta manera dichas mediciones también están sujetas a la movilidad oscilatoria de la Boya. En la Figura 2.3 se muestra una foto de la Boya y un esquema de su sistema de amarre.

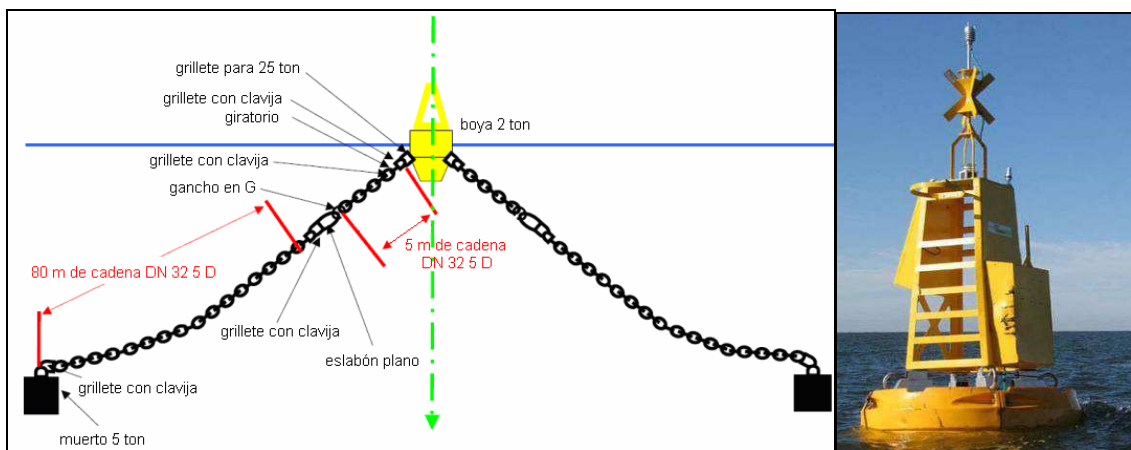


Figura 2.3: Esquema del amarre de la instalación de la Boya (panel izquierdo) e imagen de la Boya ya instalada (panel derecho). Imágenes extraídas de Moreira et al., 2010.

El equipo ADCP instalado tiene la capacidad de registrar oleaje. No obstante la experiencia de dicha medición solidaria al movimiento de la Boya en una zona de fuerte movimiento del agua no fue exitosa y los pocos datos recolectados fueron descartados directamente en campo por su mala calidad. Esto significa entonces que no se cuenta con mediciones del oleaje en la zona de la Boya.

2.2.2. Depuración inicial de los datos de la Boya

Por la relación directa con los sedimentos finos en la zona en este trabajo se procesaron, depuraron y analizaron todos los datos medidos por el SMATCH y por el ADCP. La descripción de la depuración y análisis de los datos registrados por el ADCP, así como también el análisis de dichos resultados se presenta en el Anexo A.2. Los datos del eco de la señal del ADCP fueron procesados en este trabajo con el objetivo de explorar la posibilidad de poder utilizarlos para obtener indirectamente el perfil de turbidez ya que se cuenta con las medidas del SMATCH para su calibración. No obstante no se obtuvo un buen ajuste entre la señal procesada del eco y la turbidez medida por el SMATCH, ni siquiera analizando separadamente eventos de aumento de señal de turbidez (Anexo A.3). Los datos medidos por la estación meteorológica fueron procesados y depurados por otro organismo participante del Proyecto (INIDEP de Argentina). Dicha

información atmosférica es utilizada en los análisis de este trabajo como información complementaria para analizar los datos medidos en la columna de agua.

Respecto a la depuración de los datos medidos por el SMATCH, se depuraron los registros de turbidez y salinidad de agua del período de tiempo comprendido entre el 27 de noviembre 2009 y el 16 de diciembre de 2010. El análisis se realizó considerando los 5 períodos de medición definidos según la suspensión de la toma de datos y el recambio de equipos. La coherencia en la variabilidad temporal de las series registradas es uno de los primeros elementos que fueron tomados en cuenta. De esta manera fueron descartados registros que mostraron comportamientos erróneos. Además, por la simplicidad del registro, la serie de presión registrada por el SMATCH se tomó como referencia para la identificación de períodos de tiempo de mediciones defectuosas. A pesar de que los sensores son independientes se clasificaron como dudosos los datos medidos en todos los sensores al identificar comportamientos erróneos en las medidas de presión. Además, las series registradas por el SMATCH se contrastaron con las medidas obtenidas durante las campañas de mantenimiento realizadas para analizar su coherencia. La clasificación obtenida de la depuración de los datos se presenta en la Tabla 2.2; se observa los datos fueron divididos en datos válidos y en datos dudosos. Otro tipo de análisis efectuados a los datos permitirá mejorar o ratificar esta clasificación.

Nombre	Clasificación final	Fechas
Período 1	Registros válidos	27/11/2009 al 21/01/2010
	Registros dudosos	22/01/2010 al 18/03/2010
Período 2	Registros dudosos	18/03/2010 al 24/06/2010
Período 3	Registros válidos	25/06/2010 al 25/08/2010
Período 4	Registros válidos	25/08/2010 al 22/09/2010
	Registros dudosos	22/09/2010 al 25/10/2010
Período 5	Registros válidos	25/10/2010 al 19/11/2010
	Registros dudosos	19/11/2010 al 16/12/2010

Tabla 2.2: Clasificación de los registros de turbidez y salinidad registrados por los equipos instalados en la Boya luego del proceso de depuración.

Durante los Períodos 1 y 2 de medición se utilizó en la Boya el equipo SMATCH n° 20039 y fue seteado para registrar datos cada una hora. En cambio durante los Períodos 3, 4 y 5 de medición se utilizó el otro equipo SMATCH disponible, el n° 20038, el cual también fue seteado para registrar datos con una frecuencia de medición horaria.

2.2.3. Análisis de los datos de turbidez

2.2.3.1. Estadísticos básicos de las series de turbidez

En este punto se presentan las principales características de las series de turbidez medidas por los equipos SMATCH utilizados en la Boya. Para cada uno de los cinco períodos de medición estudiados se calculan estadísticos básicos y se representan gráficamente. A partir de cada serie temporal de turbidez se analizan los boxplots; los cuales permiten visualizar de forma compacta varias características de los datos, como ser mediana, primer y tercer cuartil, y los valores máximos y mínimos; además de los valores extremales que se separan del comportamiento medio de la serie. Por otra parte se determinó la distribución de frecuencias de la serie obteniendo los rangos de mayor probabilidad de los valores medidos. El análisis de estos resultados en cada período por separado y en conjunto, permite conocer el comportamiento de la turbidez del agua medida en la ubicación de la Boya. Es importante mencionar que el equipo se ubica

aproximadamente 2,5 m por debajo de la superficie libre, lo que lo ubica en la zona media superior de la columna de agua.

La serie de turbidez registrada en la Boya durante el Período 1 comprende 2309 datos luego de la depuración inicial y sus principales parámetros estadísticos se presentan en la Figura 2.4. Se observa predominan en la serie valores bajos de turbidez, con el 50% de los valores menores a 20 NTU y el 17% de los valores entre 20 y 40 NTU. No obstante se observan registros de altos valores de turbidez alcanzados durante eventos que se observan durante el período. Por ejemplo el rango comprendido entre 100 y 120 NTU tiene una frecuencia asociada del 4% y solamente el 13% del tiempo se supera el valor de 100 NTU. El valor medio de turbidez es igual a 42 NTU y el valor máximo 472 NTU.

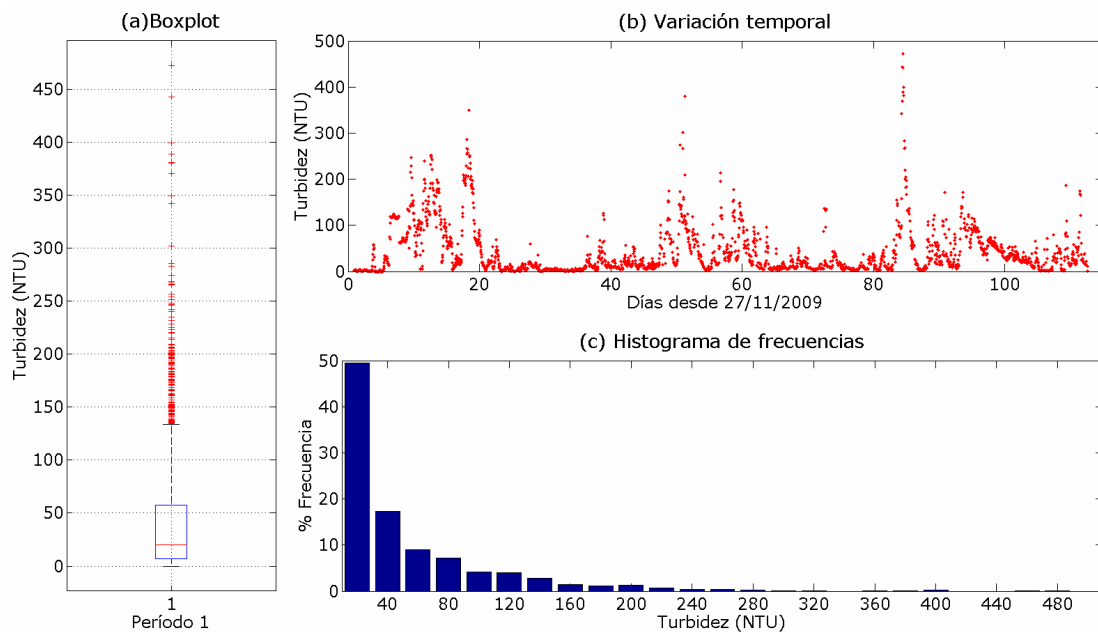


Figura 2.4: (a) Variación temporal, (b) boxplot y (c) histograma de frecuencia de ocurrencia determinado para la serie depurada de turbidez medida en la Boya durante el Período 1 de medición (27/11/2009 al 18/03/2010).

La serie de turbidez registrada en la Boya durante el Período 2 incluye 2339 datos y sus principales parámetros estadísticos se presentan en la Figura 2.5. Se observa que durante este período se registraron valores bajos de turbidez y la variabilidad es baja. El 52% aproximadamente de los datos son menores a 20 NTU y el 96% de los valores son menores a 40 NTU. El valor medio de turbidez es igual a 20 NTU y el valor máximo 88 NTU. Al comparar estos resultados con los obtenidos para la serie de turbidez registrada por este mismo equipo (n° 20039) durante el Período 1 se observa principalmente un comportamiento diferente de las series. A pesar de que el porcentaje de frecuencia asociado a valores bajos de turbidez es similar la tendencia de la variabilidad temporal es muy diferente. Durante el período 1 se observa una señal de un valor basal con pulsos de variación de turbidez que por ejemplo podrían estar asociadas al aumento de turbidez por resuspensión de material de fondo. Durante el inicio del período 2 se observa el mismo tipo de señal pero luego hay un cambio en el comportamiento y la señal muestra muy leves fluctuaciones con una escala temporal del evento mucho mayor.

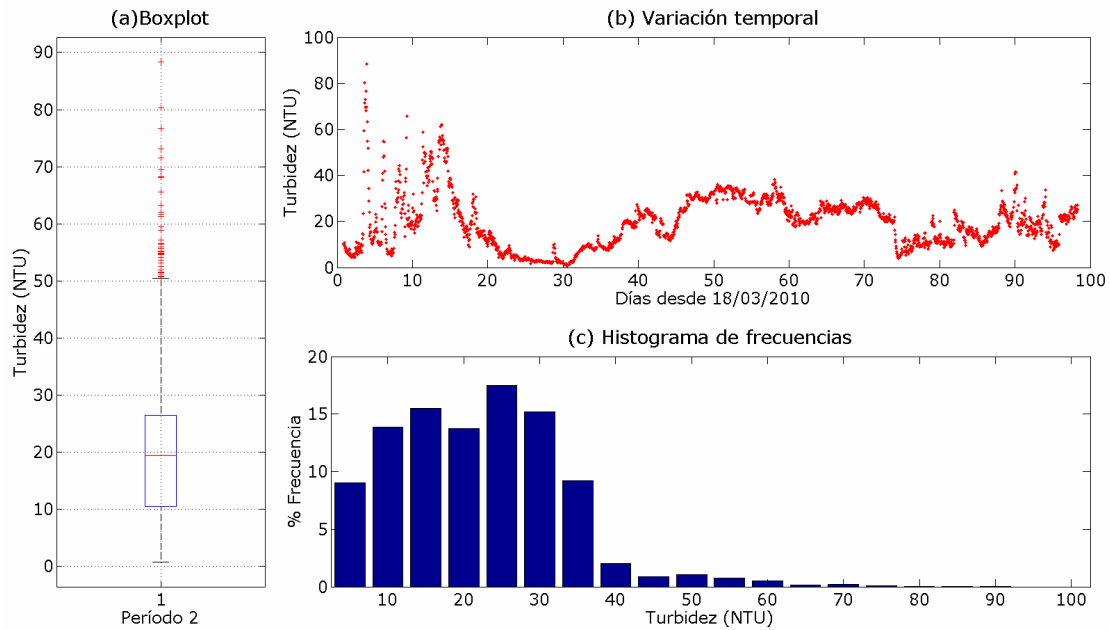


Figura 2.5: (a) Variación temporal, (b) boxplot y (c) histograma de frecuencia de ocurrencia determinado para la serie depurada de turbidez medida en la Boya durante el Período 2 de medición (18/03/2010 al 24/06/2010).

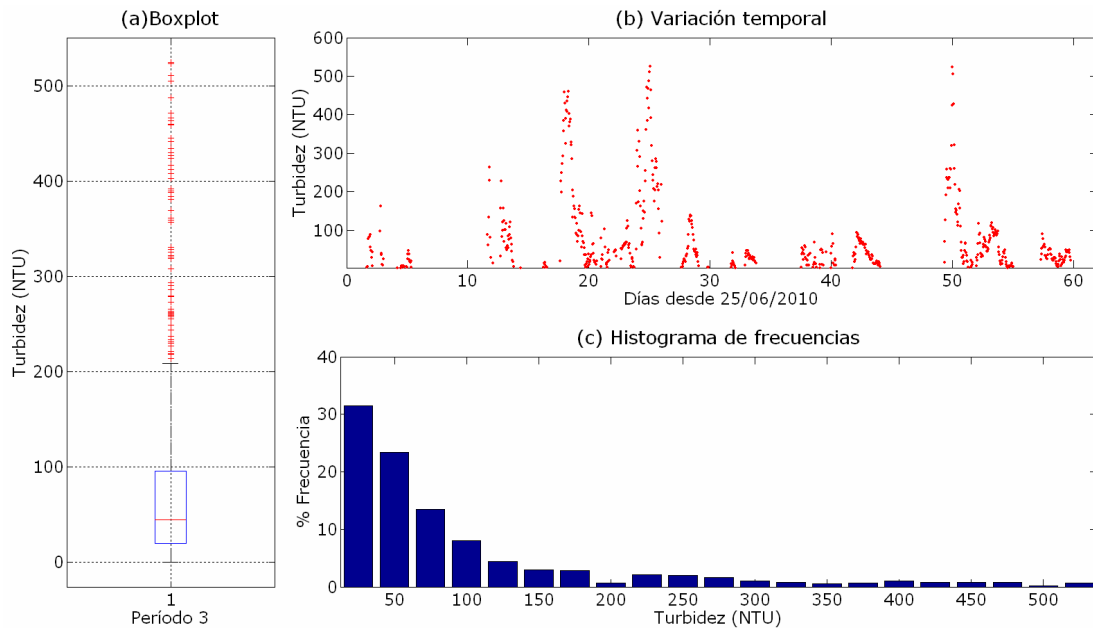


Figura 2.6: (a) Variación temporal, (b) boxplot y (c) histograma de frecuencia de ocurrencia determinado para la serie depurada de turbidez medida en la Boya durante el Período 3 de medición (25/06/2010 al 25/08/2010).

Los principales parámetros estadísticos determinados para las medidas de turbidez en la Boya durante el Período 3 de medición se presentan en la Figura 2.6. Gran parte de las medidas registradas por el SMATCH durante este período son valores nulos, los cuales representan el 58% de los datos. Los resultados presentados en la Figura 2.6 fueron determinados en base a la serie temporal de valores no nulos de turbidez, es decir, el 42% de los registros totales del Período 3. La variación temporal muestra una variabilidad de la señal de turbidez asociada a eventos de aumento y disminución de turbidez principalmente. La distribución de frecuencias muestra que casi el 55% del

tiempo la turbidez es menor a 50 NTU, y que aproximadamente el 24% del tiempo se supera el valor de 100 NTU. El valor medio de la serie de valores de turbidez no nulos es igual a 84 NTU y el valor máximo igual a 524 NTU. La comparación de la serie medida con el SMATCH n° 20038 durante el Período 3 con las obtenidas durante los Períodos 1 y 2 con el equipo n° 20039 muestra ciertas similitudes. Sin los valores nulos la variabilidad temporal de la serie del Período 3 es similar a la registrada durante el Período 1.

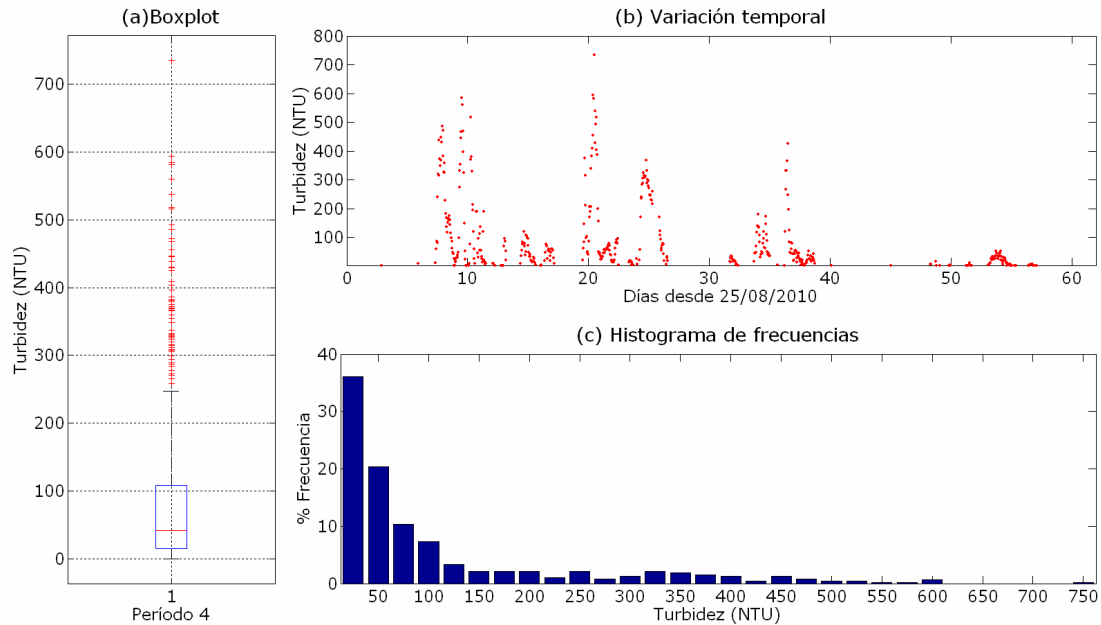


Figura 2.7: (a) Variación temporal, (b) boxplot y (c) histograma de frecuencia de ocurrencia determinado para la serie depurada de turbidez medida en la Boya durante el Período 4 de medición (25/08/2010 al 25/10/2010).

Los principales parámetros estadísticos determinados para las medidas de turbidez en la Boya durante el Período 4 de medición se presentan en la Figura 2.7. Los resultados presentados fueron determinados en base a la serie temporal de valores no nulos de turbidez, que corresponde al 34% de los registros totales del Período 4. La variación temporal muestra una variabilidad de la señal de turbidez asociada a eventos de aumento y disminución de turbidez principalmente. La distribución de frecuencias muestra que el 56% del tiempo la turbidez es menor a 50 NTU, y que aproximadamente el 26% del tiempo se supera el valor de 100 NTU. El valor medio de la serie de valores de turbidez no nulos es igual a 96 NTU y el valor máximo igual a 735 NTU. Al comparar la serie de medidas del Período 4 con las del Período 3 (determinadas por el mismo equipo) se observa una coherencia. Por un lado la variabilidad de ambas series temporales es similar, con una señal que muestra eventos de aumento y disminución de turbidez durante subperíodos de tiempo. Por otro lado la distribución de frecuencias de ocurrencia también muestra valores similares para ambos períodos de tiempo.

Por último, se presentan los resultados obtenidos para el Período 5 de las mediciones de turbidez en la Boya en la Figura 2.8. Nuevamente se eliminaron los datos nulos y se evaluó la serie obtenida con los valores restantes que corresponde solamente al 16% de los registros. La variación temporal muestra que solamente en la primera mitad del período de medición se registraron valores de turbidez no nulos y por tanto se observan pocos eventos de aumento y disminución de turbidez. El valor medio de la serie de valores de turbidez no nulos es igual a 88 NTU y el valor máximo igual a 680 NTU. La distribución de frecuencias muestra que el 63% del tiempo la turbidez es menor a 50 NTU, y que aproximadamente el 18% del tiempo se supera el valor de 100 NTU. Tanto la

variabilidad temporal como los principales estadísticos de la serie de turbidez registrada en el Período 5 muestran comportamiento similares a las series registradas por el mismo equipo durante los Períodos 3 y 4, lo que indica coherencia entre las mediciones.

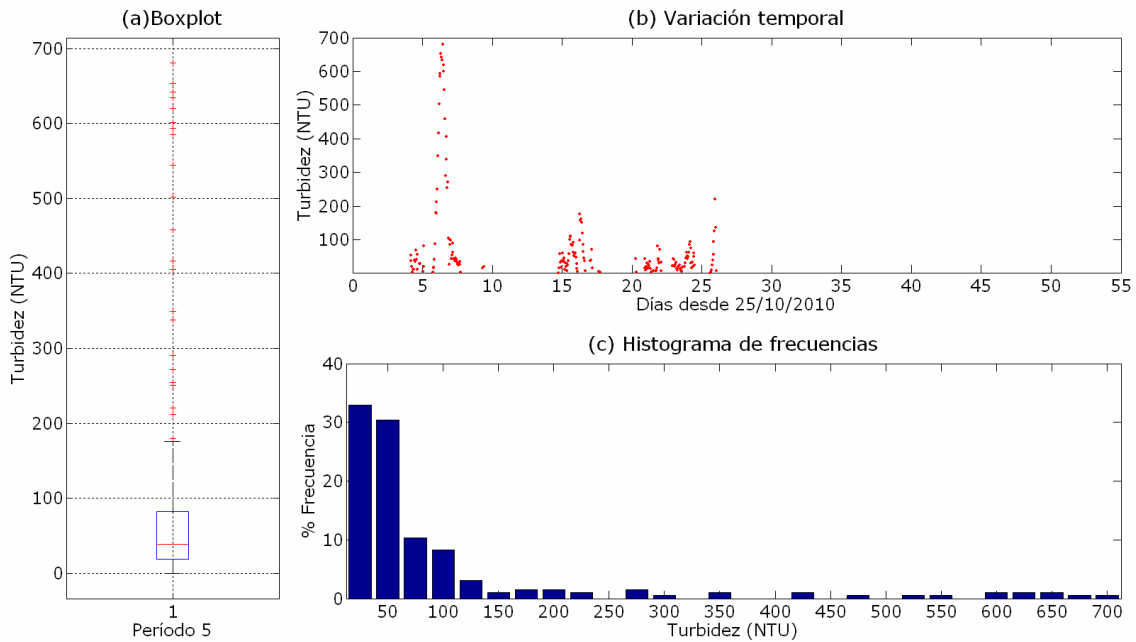


Figura 2.8: (a) Variación temporal, (b) boxplot y (c) histograma de frecuencia de ocurrencia determinado para la serie depurada de turbidez medida en la Boya durante el Período 5 de medición (25/10/2010 al 16/12/2010).

2.2.3.2. Síntesis

Los resultados obtenidos en un análisis simple de los datos depurados de turbidez registrados en la Boya se presentaron en esta sección. Se han identificado en estos análisis comportamientos diferentes de los datos registrados en la Boya en los diferentes períodos de tiempo. Las diferencias observadas en el comportamiento estadístico de los datos del Período 2 en relación a las mediciones de los otros períodos ratifica la duda sobre la calidad de los mismos identificada en el análisis preliminar. Por otra parte, se ha observado el comportamiento de los datos registrados durante los Períodos 3, 4 y 5 presentan similitudes, lo que en parte validaría dicha información. En relación al Período 1 los datos muestran algunas características similares a las observadas durante los Períodos 3, 4 y 5 de medición.

Al analizar estos datos es posible comenzar a comprender las características de la turbidez en esta zona del Río de la Plata. La información registrada representa la turbidez en la zona media superior de la columna de agua en la ubicación de la Boya. Los datos muestran una señal de turbidez donde se observan dos comportamientos, por un lado valores bajos de turbidez (y concentración) la mayor parte del tiempo, y por otro lado eventos de aumento y posterior disminución de la turbidez (y concentración). El primer comportamiento podría corresponder a situaciones de dinámica más frecuentes, es decir, situaciones de calma donde la dinámica en la zona exterior está caracterizada por una marea predominantemente astronómica con marea meteorológica leve y sin tormentas (sin oleaje). El segundo probablemente pueda asociarse a los eventos de mayor energía, eventos de marea meteorológica severos y tormentas fuertes en la zona, de frecuencia aproximadamente semanal, y que generan las mayores corrientes y alteraciones del sistema en relación a la situación de calma, pudiendo generar en cuanto

a la dinámica de sedimento por ejemplo fuerte resuspensión de sedimento del fondo cercano a la Boya o incrementar el transporte de sedimento en suspensión.

2.2.4. Análisis conjunto turbidez y forzantes

2.2.4.1. Descripción del análisis

En este punto se analiza cómo se relacionan las series de turbidez de agua registradas por el SMATCH y las tensiones de corte de fondo generadas por los forzantes del sistema, corrientes de marea y oleaje. El objetivo del análisis es determinar si hay correlación entre la serie medida de turbidez a profundidad media y las tensiones de corte de fondo. En caso de que la correlación sea importante se puede afirmar el comportamiento del sedimento en suspensión probablemente responda a procesos de resuspensión de material de fondo y en caso de que la correlación no sea importante significaría que otros procesos diferentes al intercambio con el fondo influyen sobre la dinámica de sedimento fino en la zona de la Boya. Como información complementaria se consideran también en el análisis la información medida del campo de vientos registrada en la Boya con frecuencia horaria y el registro de salinidad del SMATCH. Se utiliza la información obtenida de los modelos hidrodinámicos de marea y de oleaje, cuyas características se presentan en el Capítulo 3 de este documento.

Se realizó en primer lugar un análisis visual simultáneo de las distintas series para cada uno de los 5 períodos de medición. Además, se graficaron las anomalías estandarizadas de las tensiones de corte de fondo y de la señal de turbidez con el objetivo de identificar patrones de comportamiento comunes. Por último, se calculó el valor de correlación entre las series de turbidez con las tensiones de corte total, por corriente y por oleaje. Los resultados obtenidos se presentan en primer lugar para cada período de medición y por último se realiza un análisis integrado de los mismos.

2.2.4.2. Resultados obtenidos

A modo de ejemplo en la Figura 2.9 se presenta la variación temporal de los registros de turbidez medida para la primera mitad del Período 1 de medición en la Boya en conjunto con los vientos, tensiones de corte de fondo, y salinidad. Se observa que la variación temporal de las tensiones de corte de fondo muestra varios eventos de grandes tensiones generados por el oleaje de tormenta, por ejemplo durante el día 42 aproximadamente, los cuales generalmente coinciden con vientos intensos del sector S. Como dato relevante se menciona que en la zona de la Boya durante este período de tiempo la tensión de corte por oleaje predomina frente a la tensión de corriente, representando en promedio el 67% de la tensión total.

Se observa visualmente que la señal de turbidez aparentemente no responde a dichas tensiones, ya que no se observan modificaciones claras de la señal durante dichos eventos. Por otra parte, durante los eventos de variación de turbidez las tensiones de corte no presentan grandes modificaciones de su comportamiento medio que pueda explicar el evento en la señal de turbidez. Los factores de correlación obtenidos entre la serie medida por el SMATCH y las tensiones de corte total, por corrientes y por oleaje son casi nulos (-0,0882, 0,0754 y -0,1054, respectivamente). Estos tres valores bajos confirman que estos datos no muestran correlación alguna entre las tensiones de fondo y la señal de turbidez. Estos resultados estarían indicando que la señal de turbidez en la Boya no estaría dominada por la resuspensión del material de fondo. Por otra parte, la comparación visual no permite identificar ninguna aparente clara correlación entre la serie de turbidez y la salinidad. No obstante el factor de correlación, igual a -0,35, indicaría algún tipo de comportamiento en común.

Para el Período 2 de medición se obtuvieron resultados similares a los presentados para el Período 1. Durante dicho período se observaron varios eventos de

tormentas severas con grandes tensiones de corte de fondo y vientos del sector S-SW que no generaron modificaciones en la señal de turbidez en la columna de agua medida en la Boya. La tensión por oleaje representó el 62% de la tensión total durante el Período 2. Dicho comportamiento observado es coherente con los valores muy bajos de correlación obtenidos entre la serie de turbidez y las tensiones de corte de fondo, total, por corrientes y por oleaje, iguales a -0,0325, 0,0786 y -0,0809, respectivamente. El factor de correlación obtenida entre la serie de turbidez y salinidad es igual a -0,14 en este período.

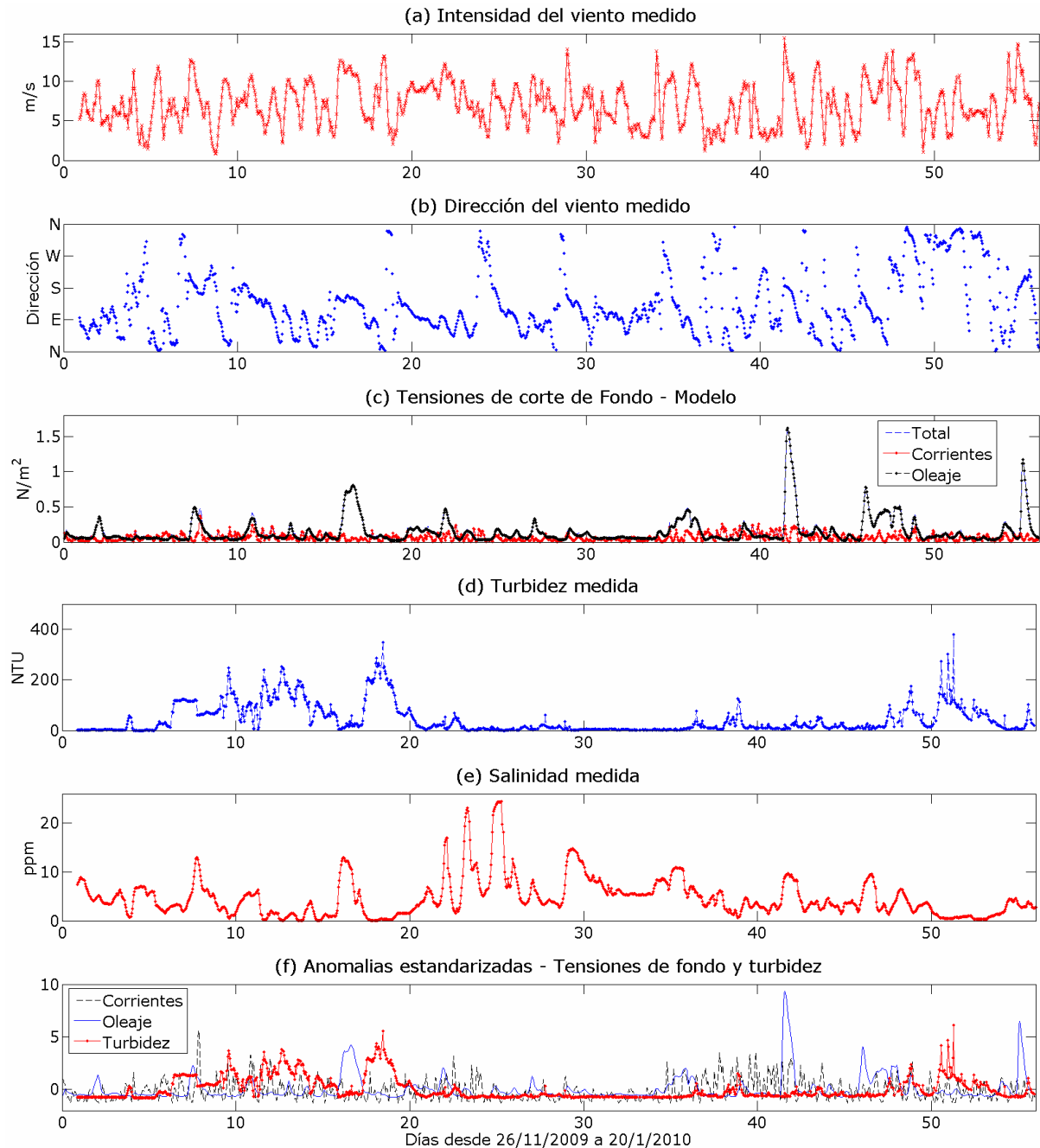


Figura 2.9: Variación temporal: (a) y (b) del viento medido, (c) de las tensiones de corte de fondo obtenidas con el modelo, (d) de la turbidez medida, (e) de la salinidad medida y (f) de las anomalías estandarizadas de las tensiones de fondo y de la turbidez, en la Boya durante la primera parte del Período 1 de medición.

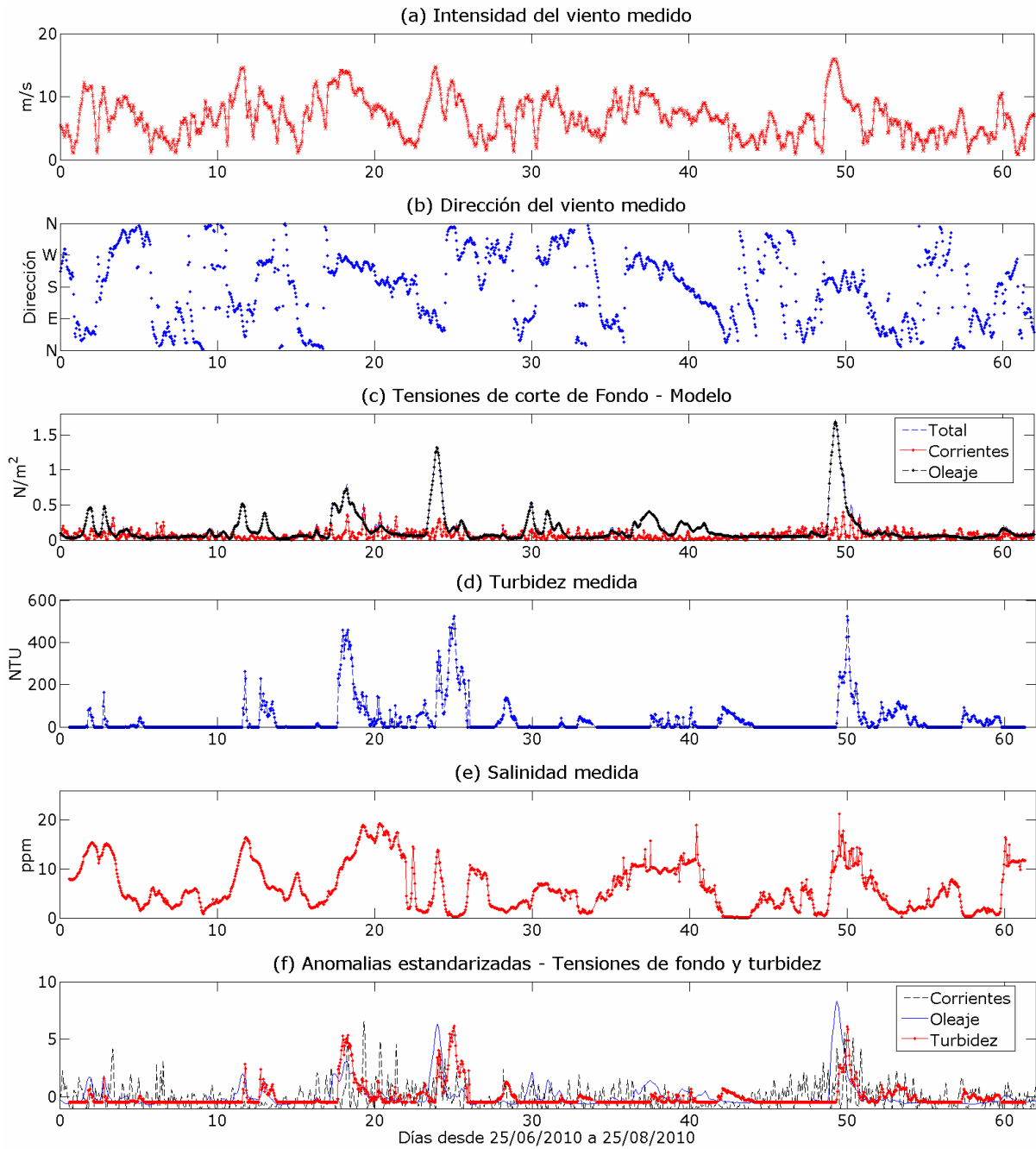


Figura 2.10: Variación temporal: (a) y (b) del viento medido, (c) de las tensiones de corte de fondo obtenidas con el modelo, (d) de la turbidez medida, (e) de la salinidad medida y (f) de las anomalías estandarizadas de las tensiones de fondo y de la turbidez, en la Boya durante el Período 3 de medición.

Los resultados obtenidos para el Período 3 de medición se presentan en la Figura 2.10. Analizando simultáneamente la variabilidad de las señales de turbidez y tensión de fondo total (dominada por la tensión de fondo generada por el oleaje que en promedio representa el 65% de la tensión total) se observa claramente que los eventos de aumento de turbidez coinciden con eventos de aumento de la tensión de corte consecuencia de las tormentas en la zona. Los factores de correlación obtenidos entre la serie de turbidez y las tensiones de corte total, por corrientes y por oleaje, iguales a 0,4165, 0,1890 y 0,4186, respectivamente, certifican dicho comportamiento. Estos factores se calcularon utilizando solamente los valores de turbidez no nulos. Se observa también que prácticamente no hay eventos de aumento de turbidez durante los períodos de calma

predominantes. Respecto a la relación entre la serie de turbidez y la salinidad, se obtuvo para este período de medición un valor bajo igual a 0,16.

Durante el Período 4 de medición se obtuvieron resultados similares a los obtenidos para los datos medidos en el Período 3. Para dicho período en promedio la tensión por oleaje representa el 64% de la tensión total. Los factores de correlación obtenidos entre la serie de turbidez y las tensiones de corte total, por corrientes y por oleaje son iguales a 0,5053, -0,0006 y 0,5117, respectivamente. Estos factores se calcularon utilizando solamente los valores de turbidez no nulos. Los valores de correlación obtenidos muestran un comportamiento común entre la serie de turbidez y las tensiones generadas por el oleaje. Salvo un caso particular, los eventos de aumento de turbidez se corresponden con ocasiones donde el modelo muestra un aumento de la tensión de corte por oleaje. Respecto a la relación entre la serie de turbidez y la salinidad, se obtuvo para este período de medición un valor igual a 0,23.

Resultados similares se obtuvieron al analizar los datos del Período 5 de medición. Sin considerar los valores nulos de turbidez registrados (los cuales prevalecen durante el período) los factores de correlación entre la serie de turbidez y las series de tensión de corte total, por corrientes y por oleaje obtenidos son iguales a 0,6283, 0,0960, y 0,6333, respectivamente. Para este período de tiempo en promedio la tensión por oleaje representa el 61% de la tensión total. Estos valores indican una relación entre la turbidez y la tensión de corte total. Respecto a la relación entre la serie de turbidez y la salinidad, se obtuvo para este período de medición un valor de correlación igual a -0,40.

2.2.4.3. Síntesis

Se analizó en esta sección si existe correlación directa entre las series de turbidez medidas por el SMATCH ubicado en la Boya y las series de tensión de corte de fondo calculadas por el modelo MARS, diferenciándose en tensión generada por corriente y oleaje. Si los eventos de aumento de turbidez en la columna de agua responden a altas tensiones de corte de fondo indicaría probablemente dicho aumento de turbidez responda a la resuspensión del sedimento del fondo durante las tormentas.

Se encontraron diversos resultados en función de los períodos de medición analizados. Por un lado, durante los períodos de medición 1 y 2 (los más extensos y en los cuales se utilizó el mismo equipo) no se observó una clara relación entre la tensión de corte y la turbidez medida con el SMATCH. Las series muestran eventos de turbidez durante períodos de calma y fuertes tormentas que no generaron ninguna respuesta en la turbidez medida en la columna de agua. Sin embargo, durante los Períodos 3, 4 y 5 de medición se observó una correlación visual muy clara entre las series de turbidez y tensión de corte generada por el oleaje, correspondida con factores de correlación de entre 0,4 y 0,6 entre ambas series. Se observa en estos períodos los eventos de aumento y disminución de turbidez en general coinciden con oleaje fuerte en la zona.

La serie de salinidad registrada por el SMATCH también fue incorporada en el análisis. Analizando simultáneamente las series de tensión de corte por oleaje, turbidez y salinidad, es posible diferenciar dos tipos de comportamientos distintos asociados a los eventos de aumento de turbidez. Por un lado, durante la gran mayoría de los eventos de incremento de la turbidez en la columna de agua se observan grandes tensiones de fondo durante tormentas con fuerte oleaje y simultáneamente incrementos de la salinidad. Por otro lado, en los restantes eventos de incremento de turbidez las tormentas son leves con oleaje moderado y se observa una disminución de los valores de salinidad en relación a las condiciones previas.

2.2.5. Síntesis datos Boya Oceanográfica

Se presentaron en esta sección los análisis realizados a los datos registrados en los equipos tipo SMATCH instalados en la Boya Oceanográfica, de interés para la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata, entre noviembre 2009 y diciembre 2010. Considerando que éstas han sido las primeras mediciones realizadas en la Boya, mucho esfuerzo se dedicó a una depuración inicial de los datos crudos registrados, clasificándolos en datos probablemente válidos y en datos posiblemente dudosos en función de un análisis preliminar de las mediciones de los diferentes sensores.

Se encontraron diferencias importantes entre los datos registrados durante los Períodos 1 y 2 de medición (fines de noviembre 2009 a fines junio 2010), y los datos registrados durante los Períodos 3, 4 y 5 de medición (fines junio 2010 a fines diciembre 2010), en cuanto al comportamiento de la señal de turbidez en la Boya. Considerando la coherencia en la variabilidad temporal, la correlación obtenida con los diversos forzantes, y otros análisis indirectos realizados utilizando la información del echo del ADCP (Anexo A.3), se decide considerar de aquí en adelante como válidos solamente los datos medidos durante los Períodos 3, 4 y 5, eliminando la información registrada durante los dos primeros períodos de medición. La información registrada y procesada se refiere a mediciones de turbidez y salinidad a una profundidad de aproximadamente 2,5 m de la superficie libre en un sistema de referencia solidario a la oscilación de la misma. Según el análisis que se presenta en el Anexo A.4 no fue posible realizar un ajuste de los datos de turbidez (NTU) medidos durante los Períodos 3, 4 y 5 para lograr información en concentración de sedimento en suspensión (mg/l); por lo que se cuenta solo con medidas continuas de turbidez (NTU) en la Boya.

Los datos depurados fueron utilizados para caracterizar la turbidez en la zona de la Boya. La misma presenta una gran variabilidad temporal, caracterizada por valores bajos a nulos de turbidez la mayor parte del tiempo combinados con eventos de fuerte aumento y posterior disminución de turbidez. Con el objetivo de comprender los procesos que determinan la dinámica de sedimento fino de la zona se analizaron los datos en conjunto con los principales forzantes, las tensiones de corte de fondo, los vientos y la salinidad. Se observa una gran correlación entre las tormentas y los eventos de mayor concentración en suspensión, lo que indica los mismos se deben a la resuspensión de material de fondo. No obstante en algunos casos se observan pequeños eventos de incremento de turbidez en condiciones de calma, que posiblemente están asociados a procesos de la dinámica asociados al transporte, fuertemente influenciado por la estructura del campo salino.

2.3. PILOTE NORDEN

2.3.1. Descripción general del equipamiento

Pilote Norden es una estación mareográfica fija ubicada en la zona interior del Río de la Plata, en las coordenadas 34°37.77' latitud Sur y 57°55.184' longitud Oeste (SHN, 2010a) y es administrada por el SHN de Argentina. La estructura es un mástil al cual se le agregaron, en el marco del Proyecto FREPLATA-FFEM, soportes para la instalación de dos equipos de medición sumergidos, un equipo tipo SMATCH y un equipo tipo SPT2. El equipo SMATCH registra temperatura, conductividad y turbidez del agua, además de la profundidad de agua, y el equipo SPT2 registra presión (con el objetivo de determinar el oleaje no direccional) y temperatura del agua. Durante las campañas oceanográficas de medición se realizó la descarga de la información registrada en cada período de medición y en general se recambió el equipo para su posterior mantenimiento en tierra. Los equipos instalados en Pilote Norden realizan las mediciones en una

referencia absoluta respecto al movimiento del mar. Esto significa que las medidas registradas por los sensores de los equipos corresponden a las características del agua a una determinada cota desde el fondo que se mantiene constante. Esto significa que, en función de la frecuencia de medición del sensor de presión, los datos registrados por dicho equipo corresponden a la oscilación del nivel del mar o al oleaje de la zona.

Aunque se instaló el equipo SPT2 durante la mayor parte del tiempo de medición del Proyecto (noviembre 2009 a diciembre 2010), lamentablemente por problemas de falla del equipamiento o del seteo, el equipo en ningún período de tiempo registró datos. Esto significa solamente se cuenta con la información registrada en el SMATCH en Pilote Norden, no habiendo mediciones del oleaje como se planificó.

2.3.2. Depuración inicial de los datos del SMATCH

Se depuraron los registros de turbidez y presión registrados por el SMATCH, con una frecuencia de 15 minutos, durante el período de tiempo comprendido entre el 27 de noviembre 2009 y el 16 de diciembre de 2010. Se cuenta también con información de temperatura y conductividad del agua pero no se analizan en este trabajo por considerar no aportan directamente al interés del mismo (en la zona el agua es dulce por lo que no tiene sentido la determinación y análisis de la salinidad).

Nombre	Clasificación final	Fechas
Período 1	Registros válidos	23/11/2009 al 01/01/2010
	Sin registros	01/01/2010 al 18/03/2010
Período 2	Sin registros	18/03/2010 al 08/04/2010
	Registros válidos	08/04/2010 al 25/06/2010
Período 3	Registros válidos	25/06/2010 al 27/08/2010
Período 4	Sin registros	27/08/2010 al 25/10/2010
Período 5	Sin registros	25/10/2010 al 11/11/2010
	Registros válidos	11/11/2010 al 17/12/2010

Tabla 2.3: Clasificación de los registros de turbidez y nivel medidos por los equipos instalados en Pilote Norden luego del proceso de depuración.

El análisis se realizó considerando los 5 períodos de medición definidos según la suspensión de la toma de datos y el recambio de equipos. Hubo ciertos períodos de tiempo en los cuales no funcionó correctamente el equipo instalado por problemas de seteo o de conexiones. En particular, durante el Período 1 el equipo registro datos cada 5 segundos, por lo que se realizó una depuración previa para su consideración, extrayendo una serie con medidas cada 15 minutos. La coherencia en la variabilidad temporal de las series registradas es uno de los primeros elementos que se tomaron en cuenta. De esta manera fueron descartados registros que mostraron comportamientos erróneos. Además, se filtraron las series de datos registradas cada 15 minutos aplicando una media móvil de 1 hora. La clasificación final obtenida de la depuración de los datos se presenta en la Tabla 2.3. Se observa se cuenta con una buena cantidad de información de datos de calidad de turbidez en Pilote Norden aunque con discontinuidad temporal.

2.3.3. Análisis de los datos de turbidez

2.3.3.1. Ajuste relación turbidez/concentración

En este punto se analizan las diversas fuentes de datos vinculadas con sedimento en suspensión disponibles en Pilote Norden y se evalúa si es posible determinar una relación de calibración entre la turbidez medida en NTU con el SMATCH y la

concentración de sedimento en suspensión. Se analiza la posibilidad de utilizar la información de concentración de material particulado en suspensión (MPS) obtenida de las muestras de agua extraídas de la estación #3 en las campañas para calibrar los datos de turbidez registrados con los tres equipos SMATCH que se utilizaron en Pilote Norden. Las muestras fueron extraídas aproximadamente a 3 metros de la superficie libre y el SMATCH se ubicó a una profundidad media entre 2,5 y 2,7 m, por lo que la profundidad de ambas medidas es similar. Para un mínimo de nivel de ajuste es necesario contar con tres pares de datos turbidez vs concentración de sedimento en suspensión.

La información obtenida sobre los equipos instalados durante los diversos períodos de medición es confusa. Parece seguro durante el Período 1 de medición se utilizó el equipo 20036, el cual no fue utilizado posteriormente en ningún período de medición. Debido a esto no es posible obtener una calibración del mismo utilizando la información de las campañas. Por otro lado, la muestra de agua extraída en la campaña 5 en la estación #3 se perdió por malas condiciones climáticas y los resultados de la campaña 6 nunca fueron publicados por el SHN. Esto elimina la posibilidad de utilizar las mediciones del Período 5 para el ajuste. Por otra parte durante el Período 4 el equipo utilizado no funcionó. La información restante incluye por tanto los registros del SMATCH durante el Período 2 y el Período 3, que podrían contrastarse con las concentraciones de las campañas anteriores y posteriores a los mismos, es decir, las campañas 2, 3 y 4. Parecería durante ambos períodos de tiempo se utilizó el equipo n° 20037 aunque hay información confusa que indicaría se podría haber utilizado el equipo n° 20035. No obstante ello, no es posible realizar el ajuste ya que la estación #3 en la campaña 2 se realizó el día 19 de marzo, instante en el cual el SMATCH de Pilote no estaba registrando ya que el Período 2 comienza el 8 de abril. En definitiva, no es posible intentar extraer una curva de calibración NTU vs mg/l para ninguno de los registros de Pilote Norden.

2.3.3.2. Estadísticos básicos de las series de turbidez

En este punto se presentan las principales características de las series de turbidez medidas por los diversos equipos tipo SMATCH instalados en Pilote Norden. Es importante recordar el equipo se ubica a una profundidad fija de aproximadamente 2,7 m. La profundidad en el lugar es de aproximadamente 7 m por lo que el equipo se ubica en la zona media superior de la columna de agua.

La serie de turbidez registrada en Pilote durante el Período 1 corresponde a un poco más de un mes de medición (entre el 23/11/2009 y el 01/01/2010) y sus principales parámetros estadísticos se presentan en la Figura 2.11. Se observa el 100% de los valores superan el umbral de 40 NTU lo que indica un estado permanente de turbidez en la zona. Por otra parte el 20% de los valores supera los 100 NTU. La serie temporal muestra la turbidez en la zona presenta una gran variabilidad, duplicando o triplicando su valor durante eventos de varios días de duración. El valor medio de turbidez para todo el período es igual a 75 NTU y el valor máximo 174 NTU.

Los principales parámetros estadísticos calculados para la serie de turbidez válida registrada en Pilote Norden en el Período 2 (8 abril a 25 junio 2010) se presentan en la Figura 2.12. Se observa la mayor cantidad de datos corresponde a valores de turbidez bajos, el 99% de los datos excede el valor de 20 NTU pero el 63% es menor a 50 NTU. Al inicio del período se observan los registros mayores asociados a dos eventos de aumento y posterior disminución de turbidez en Pilote. El valor medio de turbidez del período es igual a 45 NTU y el valor máximo 167 NTU. Al comparar la serie de datos obtenida para este período con la obtenida para el Período 1 se observan algunas diferencias, principalmente en los valores de turbidez con mayores porcentajes de

frecuencia asociados, siendo mayores los del Período 1 de medición. Es importante recordar se utilizaron dos equipos SMATCH diferentes en los dos períodos de tiempo.

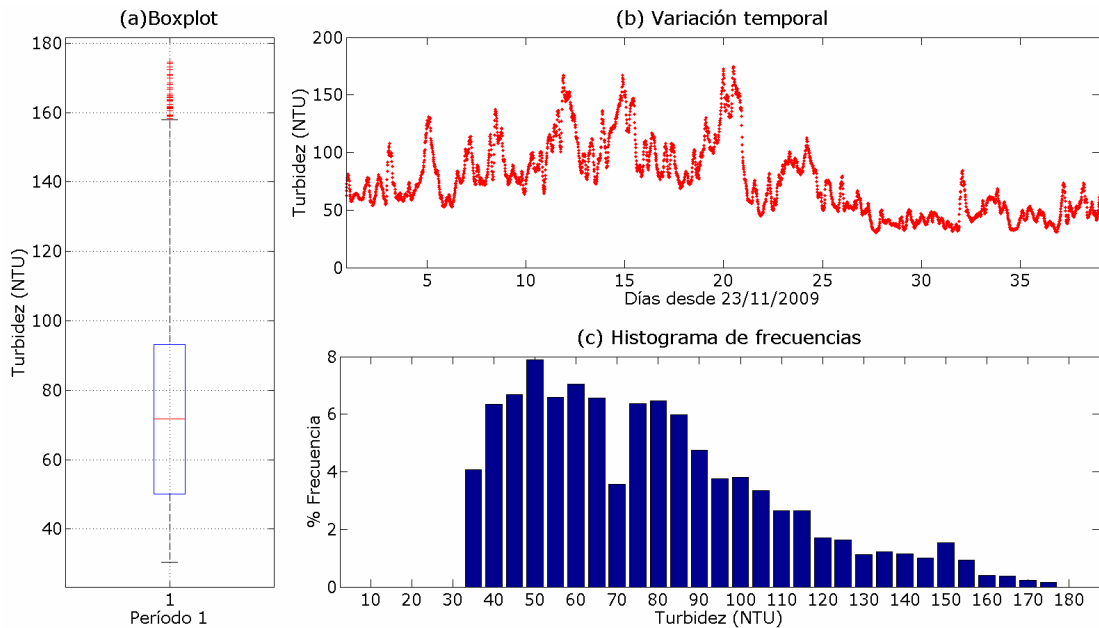


Figura 2.11: (a) Variación temporal, (b) boxplot y (c) histograma de frecuencia de ocurrencia determinado para la serie depurada de turbidez medida en Pilote Norden durante el Período 1 de medición.

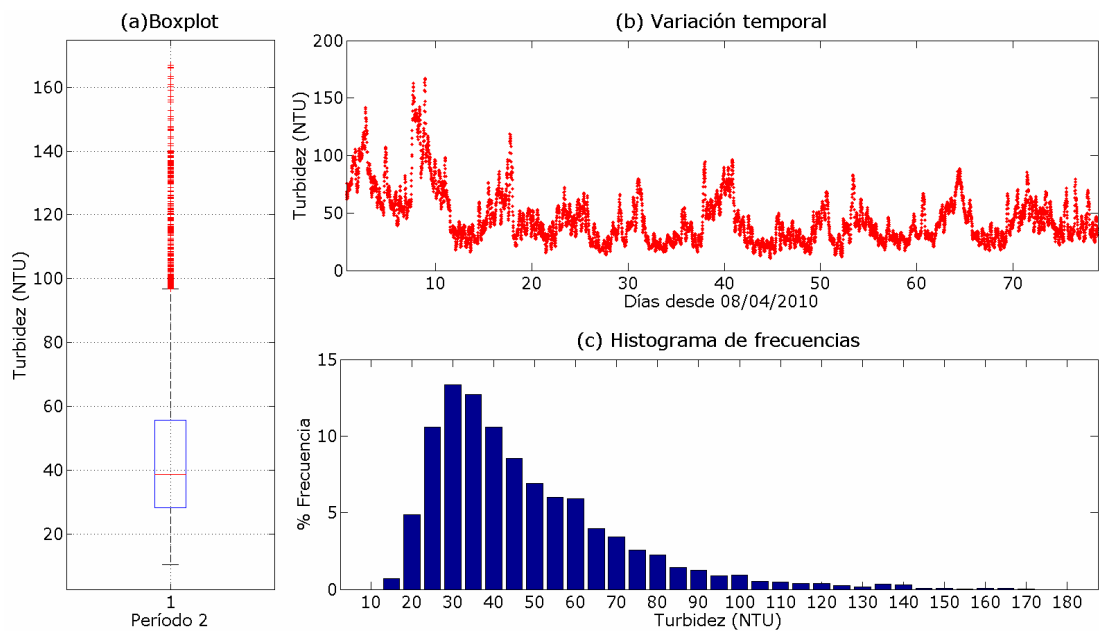


Figura 2.12: (a) Variación temporal, (b) boxplot y (c) histograma de frecuencia de ocurrencia determinado para la serie depurada de turbidez medida en Pilote Norden durante el Período 2 de medición.

Los principales parámetros estadísticos determinados para las medidas de turbidez en Pilote Norden durante el Período 3 de medición se presentan en la Figura 2.13. La variación temporal muestra una señal de valores bajos inicialmente y luego un aumento de la turbidez durante la parte central del período de tiempo con una disminución posterior a valores bajos mínimos, y finalmente cerca del día 50 se observa

un evento de gran aumento de turbidez. En este caso el 93% de los valores excede los 20 NTU y el 54% de los datos es menor a 50 NTU. Por otra parte solamente casi un 3% de los datos superan los 100 NTU. El valor medio de la serie de valores de turbidez es igual a 51 NTU y el valor máximo igual a 128 NTU. La distribución de frecuencias es similar a la obtenida para las mediciones del Período 2 y diferente a la obtenida para el Período 1.

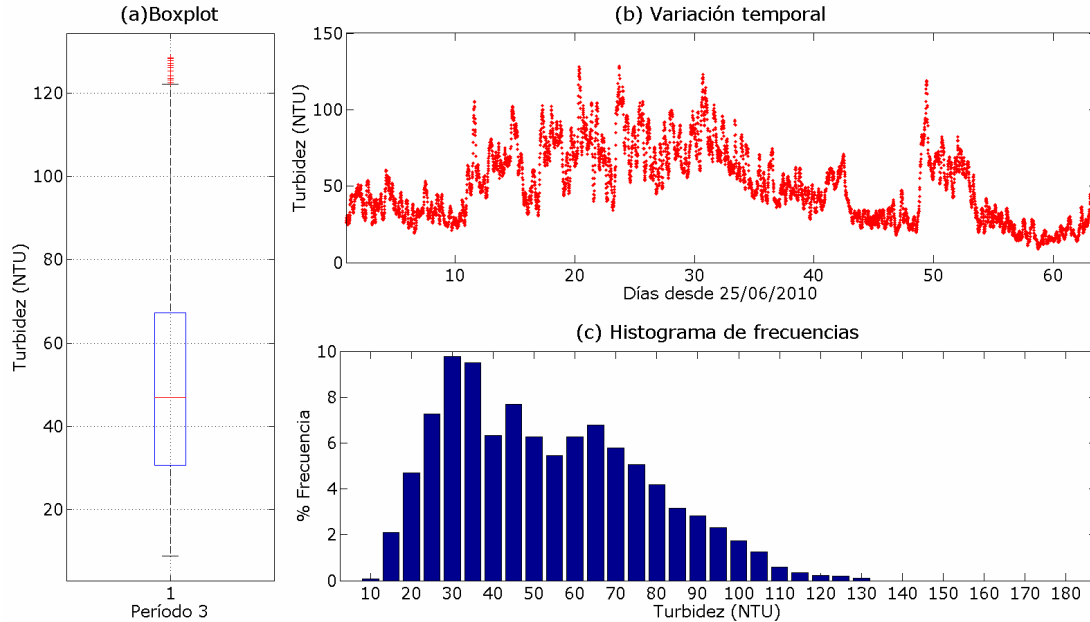


Figura 2.13: (a) Variación temporal, (b) boxplot y (c) histograma de frecuencia de ocurrencia determinado para la serie depurada de turbidez medida en Pilote Norden durante el Período 3 de medición.

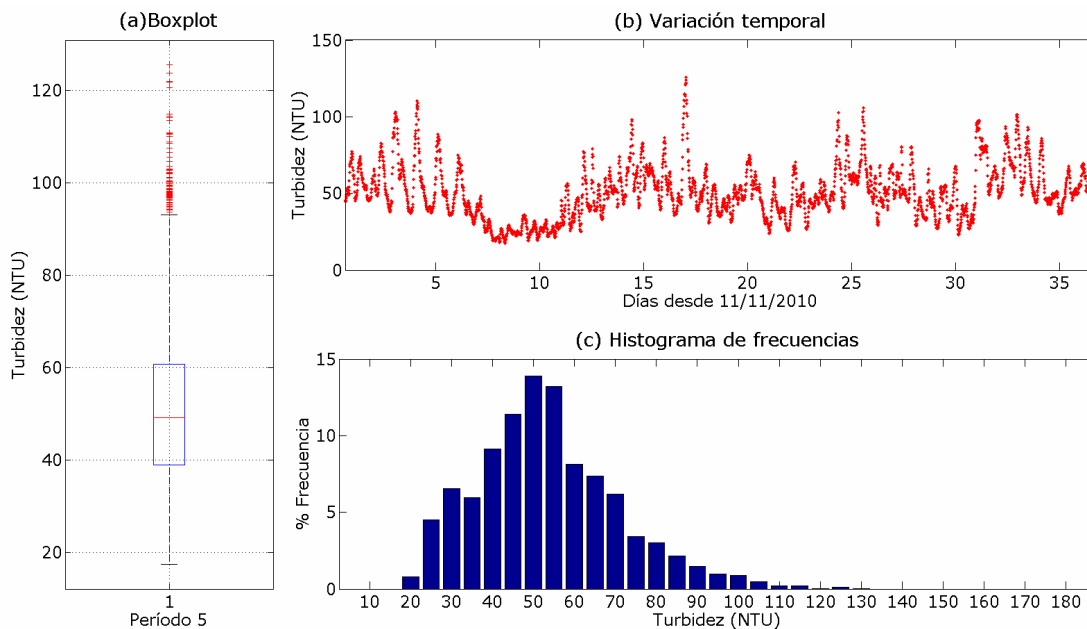


Figura 2.14: (a) Variación temporal, (b) boxplot y (c) histograma de frecuencia de ocurrencia determinado para la serie depurada de turbidez medida en Pilote Norden durante el Período 5 de medición.

Por último se presentan los resultados obtenidos para el Período 5 de las mediciones de turbidez en Pilote Norden en la Figura 2.14. Se observa un

comportamiento similar al obtenido en los casos anteriores, con registros de turbidez en general bajos que presentan una variabilidad debido a eventos de aumento de hasta el doble o triple del valor basal y posterior disminución. La distribución de frecuencias muestra el 99% de los datos superan el valor basal de 20 NTU y el 52% no supera los 50 NTU. Por otro lado solamente el 1% supera los 100 NTU. El valor medio de la serie de valores de turbidez es igual a 50 NTU y el valor máximo 128 NTU.

2.3.3.3. Síntesis

Los resultados obtenidos en un análisis simple de los datos depurados de turbidez registrados en Pilote se presentaron en esta sección. Al analizar estos datos es posible comenzar a comprender las características de la turbidez en esta zona del Río de la Plata. La información registrada representa la turbidez en la zona interior del Río de la Plata, es decir, en la zona influenciada por la dinámica fluvial de los tributarios pero a su vez afectada por el oleaje y la marea meteorológica. Los datos muestran una señal que indica una turbidez permanente en la zona que varía en el tiempo aumentando y disminuyendo en función de eventos de diferente escala, algunos de una duración superior a un día y otros de una duración más corta de escala de marea.

Se han identificado comportamientos diferentes de los datos registrados en los diferentes períodos de tiempo. Principalmente se observa una diferencia entre las mediciones del Período 1 y las mediciones de los Períodos 2, 3 y 5. Es importante recordar los datos del Período 1 se registraron con una frecuencia de 5 segundos. Además, dichas mediciones se realizaron con un equipo y las de los restantes períodos probablemente con el otro equipo de repuesto. Teniendo esto en cuenta, y la diferencia en los estadísticos, se descartan los datos registrados en Pilote Norden durante el Período 1 y no se incluyen en los siguientes análisis.

2.3.4. **Análisis conjunto turbidez y forzantes**

2.3.4.1. Descripción del análisis

En este punto se analiza cómo se relacionan las series de turbidez de agua registradas por el SMATCH en Pilote Norden y las tensiones de corte de fondo generadas por los forzantes del sistema, corrientes de marea y oleaje. Se utiliza la información de corrientes y oleaje obtenida de los modelos hidrodinámicos de marea y de oleaje. Como información complementaria se consideran también en el análisis la información de niveles medidos en Pilote Norden también con el SMATCH.

Se realizó en primer lugar un análisis visual simultáneo de las distintas series medidas. Además, se graficaron las anomalías estandarizadas de las tensiones de corte de fondo y de la señal de turbidez con el objetivo de identificar patrones de comportamiento comunes. En esta zona se utilizó también la información de niveles registrados y se graficaron también las anomalías estandarizadas de niveles y turbidez superpuestas. Por último, se calculó el valor de correlación entre las series de turbidez con las tensiones de corte total, por corriente y por oleaje, y también con los niveles.

2.3.4.2. Resultados obtenidos

En términos generales se obtienen resultados similares para los tres períodos de medición. A modo de ejemplo se presenta en la Figura 2.15 la serie de turbidez medida en conjunto con las tensiones de corte de fondo y el nivel para el Período 3. Analizando simultáneamente la variabilidad de las señales de turbidez y tensiones se observa que gran parte de los eventos de aumento de turbidez coinciden con eventos de aumento de la tensión de corte debido al oleaje. No se observa una clara correlación respecto a la tensión por corriente ni correspondientemente con la tensión total ya que la tensión total de fondo en promedio se debe a un 13% a las tensiones de oleaje y un 87% a las tensiones

de corrientes en esta zona para este período. Los factores de correlación obtenidos entre la serie de turbidez y las tensiones de corte total, por corrientes y por oleaje, iguales a 0,1906, 0,0997 y 0,4432, respectivamente, certifican dicho comportamiento. Se observa por otra parte, cierta correlación entre la serie de niveles y la serie de turbidez, principalmente durante eventos de aumento de nivel como el observado durante el día 49 aproximadamente. El factor de correlación obtenido entre la serie de niveles y la serie de turbidez es bajo igual a 0,2327.

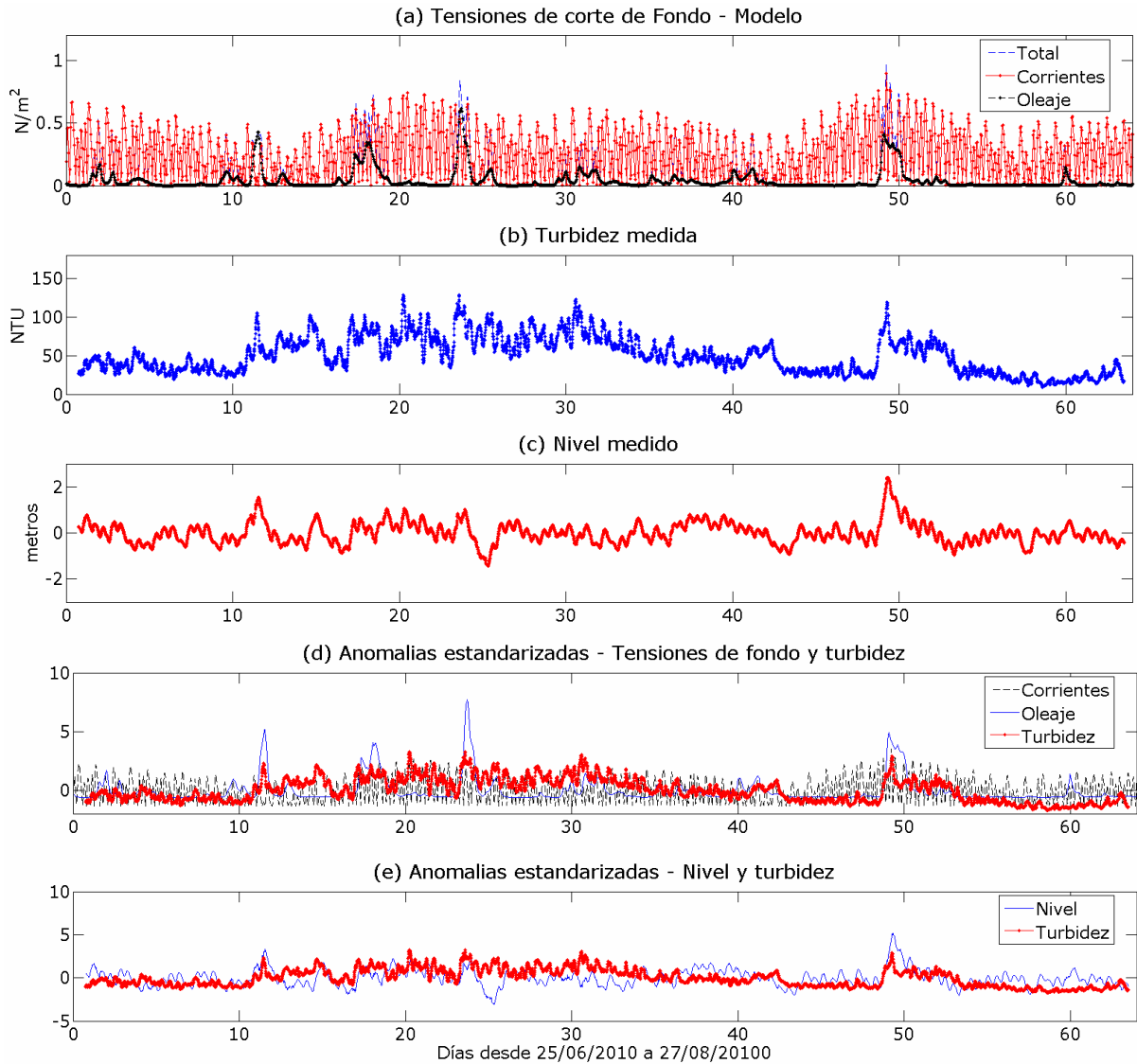


Figura 2.15: Variación temporal: (a) de las tensiones de corte de fondo obtenidas con el modelo, (b) de la turbidez medida, (c) del nivel medido, (d) de las anomalías estandarizadas de las tensiones de fondo y de la turbidez y (e) de las anomalías estandarizadas de nivel y turbidez, en Pilote Norden durante el Período 3 de medición.

Los resultados obtenidos para el Período 2 muestran factores de correlación calculados entre la serie de turbidez y las tensiones de corte de fondo, total, por corrientes y por oleaje, iguales $-0,0044$, $-0,0304$ y $0,2542$, respectivamente. Aunque se visualizó que la señal de turbidez presenta una frecuencia de oscilación similar a la del nivel real, caracterizado por la marea meteorológica, se obtuvo un factor de correlación bajo casi nulo en este período. Para el Período 5 también visualmente se observó correlación entre la serie de turbidez y la tensión de corte por oleaje, la cual representa

solamente en promedio durante el período el 14% de la tensión total. No obstante, los factores de correlación entre la serie de turbidez y las series de tensión de corte total, por corrientes y por oleaje obtenidos son bajos, iguales a 0,0956, 0,0438 y 0,205, respectivamente. También se observa un comportamiento similar entre la turbidez y el nivel, con un factor de correlación entre las mismas igual a 0,3128.

2.3.4.3. Síntesis

Se analizó en esta sección si existe correlación entre las series de turbidez medidas por el SMATCH ubicado en Pilote Norden y las series de tensión de corte en el fondo calculadas por el modelo MARS (tensión por corrientes y tensión por oleaje).

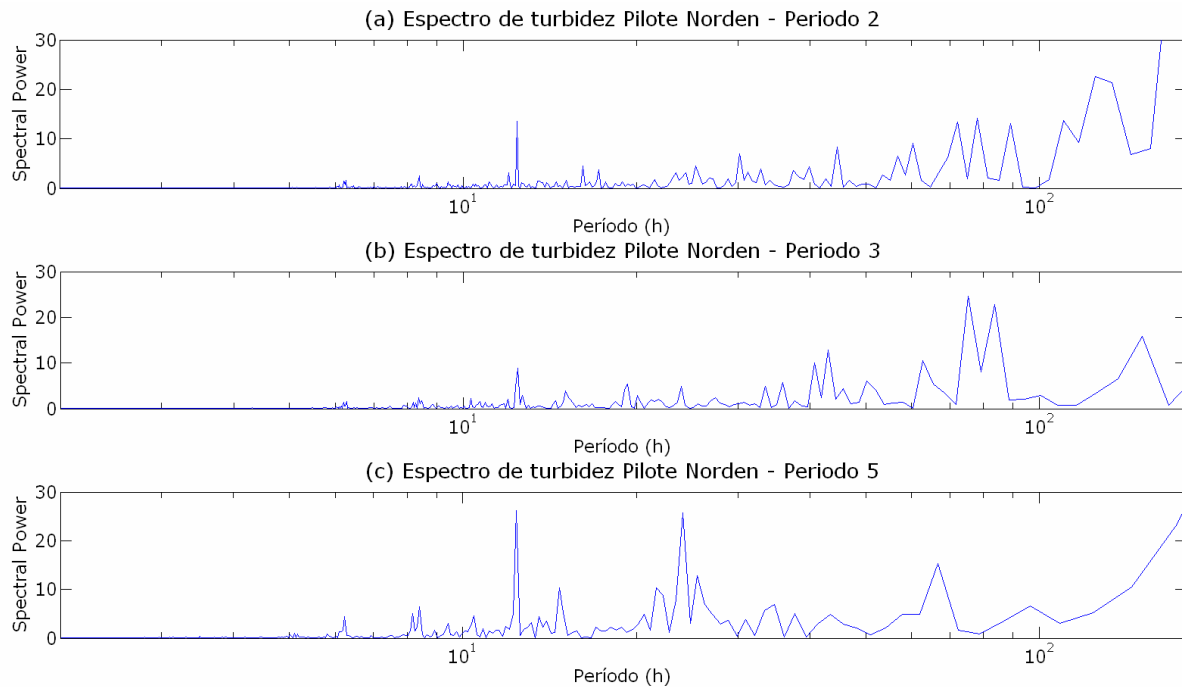


Figura 2.16: Espectros de la señal de turbidez medida durante (a) el Período 2, (b) el Período 3 y (c) el Período 5 de medición en Pilote Norden.

Los resultados obtenidos muestran que la señal de turbidez responde a los eventos de oleaje severo en la zona y en ciertas ocasiones a las fluctuaciones de niveles. A partir de los análisis realizados no se observa una variación directa de la turbidez con la tensión de corte por corriente. Parecería entonces que las oscilaciones cortas de las tensiones de corrientes no generan resuspensión del material de fondo, o en todo caso generan una señal que no se correlaciona directamente con la turbidez en la columna de agua. La señal dominante en la columna de agua presenta principalmente una variabilidad con el período de la marea, y esto podría indicar una fuerte influencia del proceso de transporte en la columna de agua. Además, se observa una señal superpuesta de incremento de concentración cuando ocurren tormentas fuertes. A pesar de que la magnitud de la tensión de corte por oleaje normalmente no supera a las tensiones generadas por las corrientes de marea, la diferencia durante las tormentas radica en el incremento en la duración de los eventos de aumento de tensión de corte de fondo, respecto a las situaciones de calma.

Se analizaron los espectros que se obtienen de las señales de turbidez registradas durante los tres períodos analizados en Pilote. En la Figura 2.16 se presentan los resultados. Se observa los espectros muestran una superposición de muchas señales pero se destacan los períodos asociados a la marea astronómica semidiurna y diurna que se

observa en el Río de la Plata. Además, se observan picos de energía en los espectros asociados a períodos mayores que representan la marea meteorológica en la zona.

2.3.5. Síntesis datos Pilote Norden

Se presentaron en esta sección los análisis realizados a los datos registrados en los equipos tipo SMATCH instalados en Pilote Norden, de interés para la dinámica de sedimentos finos general en el Río de la Plata, entre noviembre 2009 y diciembre 2010. Estas mediciones son realizadas en ubicaciones fijas respecto al fondo, a una profundidad media de 2,5 m de la superficie, representativas de la zona superior media de la columna de agua. En primer lugar se realizó un chequeo y depuración inicial de los datos. Hubo períodos de tiempo en los cuales no funcionó correctamente el equipo instalado por problemas de seteo o de conexiones. En síntesis se cuenta con información de buena calidad de turbidez y de nivel separada en 3 períodos de medición comprendidos entre abril a agosto 2010 (Períodos 2 y 3) y durante noviembre y diciembre 2010 (Período 5).

Considerando representativas las series de turbidez registradas en Pilote Norden de la concentración de sedimentos finos en la zona se analizan los resultados de turbidez y su interpretación aporta a la dinámica de sedimentos finos en suspensión. Las series medidas muestran una gran variación temporal de la señal de concentración en suspensión con fluctuaciones de varias escalas temporales, cortas en la escala de marea predominante diurna y semidiurna, y fluctuaciones de mayor duración, entre 1 y varios días, generados principalmente por eventos de marea meteorológica y por eventos asociados a tormentas con fuerte oleaje. Los registros muestran hay un valor basal de turbidez permanente en la zona, del orden de 20 NTU pero la mayor parte de los datos se encuentran entre los 20 y 50 NTU aproximadamente. No obstante durante los eventos de aumento de turbidez la misma puede incrementarse dos o incluso tres veces, alcanzando valores mayores a 100 NTU.

Las series medidas fueron correlacionadas con las tensiones de corte de fondo (por corrientes y por oleaje) determinadas por el modelo. En Pilote Norden los cálculos de las tensiones muestran que predomina (en magnitud y en el tiempo) el corte generado por las corrientes de marea. El aporte durante las tormentas a la tensión de corte se refleja en un cambio de duración del evento, modificando la duración de varias horas a una duración mayor a un día. Se encontró que la señal de turbidez responde con mayor correlación a éstos eventos de tormenta mencionados que a la señal de tensión de corte por corriente. Esto indicaría la ocurrencia de procesos de resuspensión de sedimento de fondo durante las tormentas, las que serían determinantes para la dinámica de sedimento en suspensión en estos casos. El análisis visual de las series de nivel y turbidez, además de los resultados obtenidos en el cálculo de los espectros de las señales de turbidez, muestran fluctuaciones de la turbidez asociadas a las mareas diurnas y semidiurnas predominantes. Esto podría indicar una gran influencia de los procesos de transporte de sedimento en la zona de Pilote Norden de forma permanente. Parecería entonces el valor basal encontrado en la zona se deba principalmente al transporte en la columna de agua de sedimento en suspensión proveniente de otras zonas (probablemente de la zona de descarga de los tributarios ubicada aguas arriba de Pilote Norden), con además un aporte de resuspensión de material de fondo.

2.4. TORRE OYARVIDE

2.4.1. Descripción general del equipamiento

Torre Oyarvide es una estación mareográfica fija ubicada en la zona intermedia del Río de la Plata entre el eje longitudinal del mismo y la costa Argentina, en las

coordenadas 35°06.097' latitud Sur y 57°07.587' longitud Oeste (SHN, 2010a). La estructura existente es una torre fijada al fondo a la cual se le agregaron, en el marco del Proyecto FREPLATA-FFEM, soportes para la instalación de dos equipos de medición sumergidos, un equipo tipo SMATCH y un equipo tipo SPT2. El equipo SMATCH registra temperatura, conductividad y turbidez del agua, además de la profundidad, y el equipo SPT2 registra presión (con el objetivo de determinar el oleaje no direccional) y temperatura del agua. Durante las campañas oceanográficas de medición se realizó la descarga de la información registrada en cada período de medición y en general se recambió el equipo para su posterior mantenimiento en tierra. Los equipos instalados en Torre Oyarvide realizan las mediciones en una referencia absoluta respecto al movimiento del mar. Esto significa que las medidas registradas por los sensores de los equipos corresponden a las características del agua a una determinada cota desde el fondo que se mantiene constante. Esto significa que, en función de la frecuencia de medición del sensor de presión, los datos registrados por dicho equipo corresponden a la oscilación del nivel del mar o al oleaje de la zona.

Aunque el objetivo de las mediciones del equipo SPT2 fue registrar con el sensor de presión las características del oleaje en la zona, solamente durante el Período 5 de medición se pudo establecer un seteo apropiado. Durante el Período 1 el equipo SPT2 instalado para medir se perdió durante la maniobra de recuperación por lo que no se cuenta con la información registrada. Durante el Período 2 se realizaron mediciones con una frecuencia de medición horaria y durante los Períodos 3 y 4 con una frecuencia de medición de 15 minutos. Por lo tanto para dichos períodos de tiempo pueden determinarse la serie de niveles en Torre Oyarvide a partir de los registros del SPT2 pero no las características del oleaje. La información de niveles también puede determinarse a partir de los registros de presión medidos por el equipo SMATCH instalado en Torre Oyarvide. Durante los Períodos 3 y 4 de medición tanto el SMATCH como el SPT2 registraron presión de agua con una frecuencia de 15 minutos y por tanto fue posible determinar la serie de niveles horario a partir de las dos fuentes de información. En estos casos, la información de niveles registrada durante los períodos mencionados en el SPT2 fue utilizada como chequeo de los datos de niveles registrados por el SMATCH. Se constató ambos registros fueron similares y coherentes. Durante el Período 2 de medición solamente se cuenta con la información de niveles obtenida con el SPT2 ya que el SMATCH no registró datos durante dicho período de tiempo. La depuración y análisis de la información de niveles registrada por el SPT2 en el Período 2 de medición y de la información de oleaje registrada por el SPT2 durante el Período 5 se presentan en el Anexo A.5.

2.4.2. Depuración inicial de los datos del SMATCH

Se depuraron los registros de turbidez, presión y salinidad, registrados con una frecuencia de 15 minutos, por el SMATCH ubicado en Torre Oyarvide durante el período de tiempo comprendido entre el 27 de noviembre 2009 y el 17 de diciembre de 2010.

El análisis se realizó considerando los 5 períodos de medición definidos según la suspensión de la toma de datos y el recambio de equipos. Hubo períodos de tiempo en los cuales no funcionó correctamente el equipo instalado por problemas de seteo o de conexiones. La coherencia en la variabilidad temporal de las series registradas es uno de los primeros elementos tomados en cuenta. De esta manera fueron descartados registros que mostraron comportamientos erróneos. Además, se filtraron las series de datos registradas cada 15 minutos aplicando una media móvil de 1 hora. La clasificación final obtenida de la depuración de los datos se presenta en la Tabla 2.4. Se observa en definitiva se cuenta con casi seis meses de mediciones casi continuas en Torre Oyarvide.

Nombre	Clasificación final	Fechas
Período 1	Sin registros	27/11/2010 al 18/03/2010
Período 2	Sin registros	18/03/2010 al 24/06/2010
Período 3	Registros válidos	24/06/2010 al 24/08/2010
Período 4	Registros válidos	24/08/2010 al 26/10/2010
Período 5	Registros válidos	26/10/2010 al 17/12/2010

Tabla 2.4: Clasificación de los registros de turbidez, salinidad y nivel medidos por el SMATCH ubicado en Torre Oyarvide luego del proceso de depuración.

2.4.3. Análisis de los datos de turbidez

2.4.3.1. Ajuste relación turbidez/concentración

En este punto se analizan las diversas fuentes de datos vinculadas con sedimento en suspensión disponibles en Torre Oyarvide y se evalúa si es posible determinar una relación de calibración entre la turbidez medida en NTU con el SMATCH y la concentración de sedimento en suspensión. Se analiza la posibilidad de utilizar la información de concentración de material particulado en suspensión obtenida de las muestras de agua extraídas de la estación #15bis en las campañas para calibrar los datos de turbidez registrados por el único equipo SMATCH utilizado en Torre Oyarvide. Las muestras de agua en las campañas fueron extraídas aproximadamente a 3 o 4 m de profundidad y el SMATCH se ubicó a una profundidad media de 2,4 m, por lo que la información se considera equivalente.

Para la correspondencia con la muestra de la campaña 3, extraída el 24 de junio a las 19:00 hs, se toma la primera medida registrada por el SMATCH durante el Período 3, registrada el 24 de junio a las 19:30 hs. Para la correspondencia con la muestra de la campaña 4, extraída el 24 de agosto a las 12:37 hs, se toma la medida más cercana registrada por el equipo durante el Período 4, correspondiente al 24 de agosto a las 12:31 h. Para la correspondencia con la muestra extraída en la campaña 5 el día 26 de octubre a las 16:30 hs se toma la primera medida válida registrada por el SMATCH durante el Período 5, el día 26 de octubre a las 16:41 hs. Lamentablemente no se cuenta con información de la concentración de la muestra de agua de la campaña 6 para ser utilizada en el ajuste. Se cuenta solamente con tres puntos para realizar un ajuste.

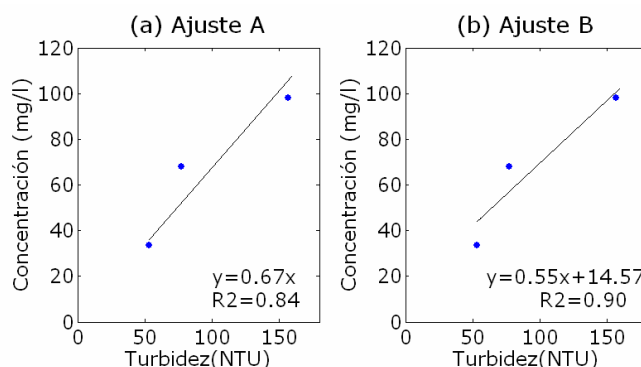


Figura 2.17: Diversos ajustes lineales obtenidos de los datos de turbidez medidos por el SMATCH n° 20036 de Torre Oyarvide con la concentración de sedimento en suspensión.

En la Figura 2.17 se presenta el ajuste obtenido vinculando los datos mencionados anteriormente. El ajuste A se obtuvo imponiendo que el punto (0,0) pertenezca a la recta. Se observa que la calidad del ajuste A obtenido es buena ($R^2=0,84$). Aunque parezca

razonable mantener dicha condición se exploró la posibilidad de obtener un ajuste lineal sin que el punto (0,0) pertenezca a la misma, denominado ajuste B. Se observa que la calidad del ajuste obtenido en este caso se incrementa, obteniéndose un valor de R^2 igual a 0,9. En función de éstos resultados, se decide utilizar el ajuste B obtenido de los datos para obtener valores de concentración en mg/l a partir de los datos de turbidez registrados con el SMATCH n° 20036 durante los Períodos 3, 4 y 5 de medición en Torre Oyarvide.

2.4.3.2. Estadísticos básicos de las series de concentración

A partir de la relación lineal obtenida entre los datos de turbidez y concentración de sedimento en suspensión para el SMATCH n° 20036 se determinaron las series de datos de concentración de sedimento en suspensión en Torre Oyarvide durante los Período 3, 4 y 5 de medición. A partir de cada serie temporal se analizan los boxplots; y la distribución de frecuencias de las series obteniendo los rangos de mayor probabilidad de los valores medidos. Es importante recordar el equipo se ubica a una profundidad fija de aproximadamente 2,4 m. La profundidad en el lugar es de aproximadamente 7 m por lo que el equipo se ubica en la zona media superior de la columna de agua.

En la Figura 2.18 se presentan los resultados obtenidos para la serie de concentración calculada para el Período 3 de medición. Se observan en todo el período valores no nulos de concentración con una fluctuación asociada a diversos eventos. Se destaca un evento de gran aumento, en el cual se superan los 250 mg/l, ocurrido alrededor del día 50 del período. Se observa la mayor cantidad de datos corresponden a concentraciones medias a bajas de entre 60 y 80 mg/l. El 100 % de los datos excede los 30 mg/l; el 20% de los datos es menor a 60 mg/l, el 84% de los datos es menor a 100 mg/l y solamente el 8% supera los 120 mg/l. El valor máximo corresponde a 271 mg/l y el valor medio a 77 mg/l.

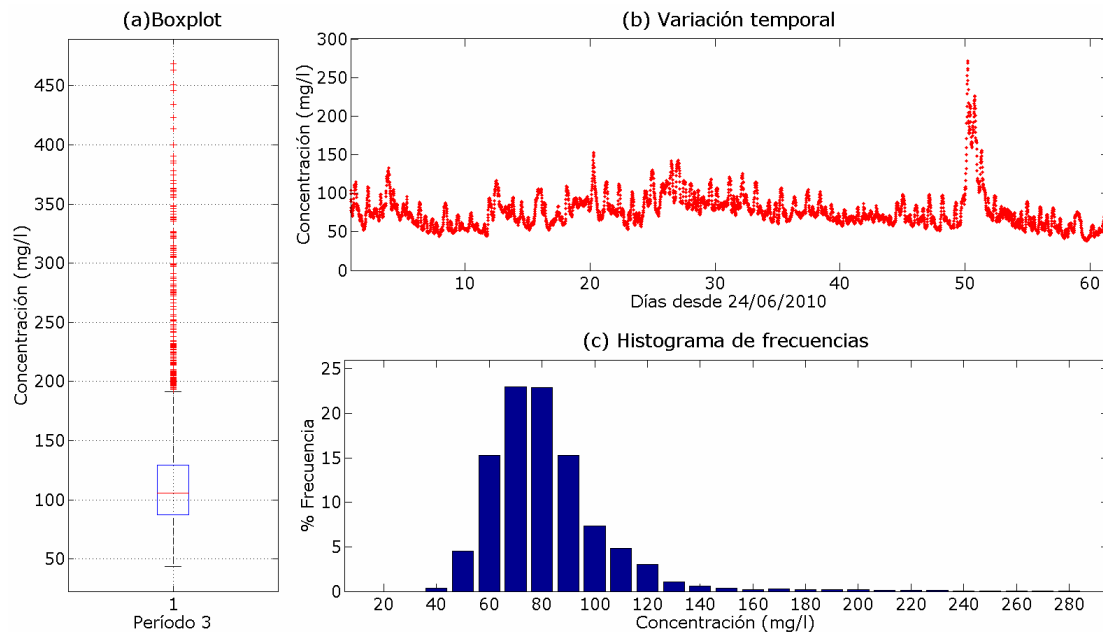


Figura 2.18: (a) Variación temporal, (b) boxplot y (c) histograma de frecuencia de ocurrencia, determinados para la serie de concentración de sedimento en suspensión obtenida en Torre Oyarvide para el Período 3 de medición.

Los resultados obtenidos para los datos recolectados en el Período 4 de medición se presentan en la Figura 2.19. Se observan en todo el período valores no nulos de concentración con una fluctuación asociada a diversos eventos. Se destacan por ejemplo

los eventos ocurridos alrededor del día 9 y del día 39, donde se observan grandes picos de concentración. El valor máximo corresponde a 536 mg/l y el valor medio a 102 mg/l. Se observa el 40% de los valores es menor a 80 mg/l; el 74% menor a 120 mg/l y casi el 5% supera los 200 mg/l.

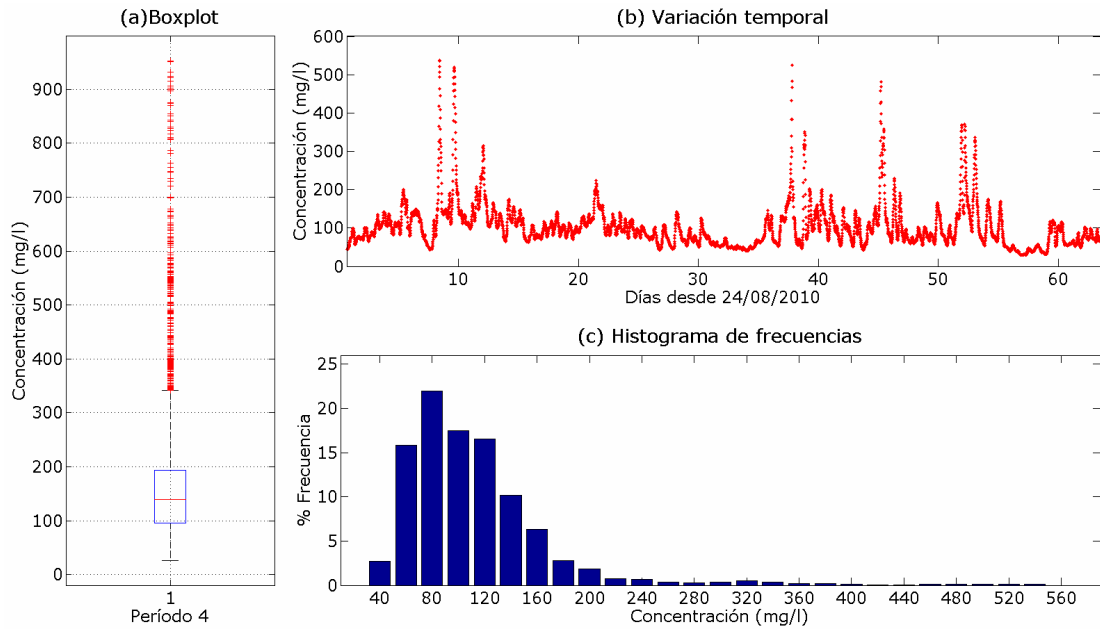


Figura 2.19: (a) Variación temporal, (b) boxplot y (c) histograma de frecuencia de ocurrencia, determinados para la serie de concentración de sedimento en suspensión obtenida en Torre Oyarvide para el Período 4 de medición.

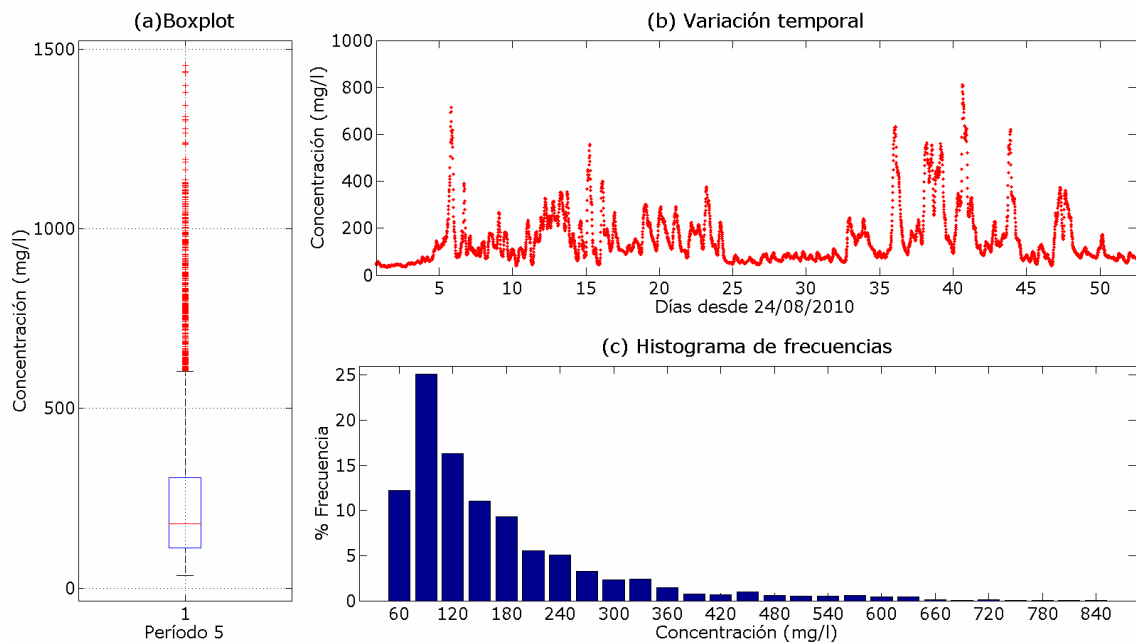


Figura 2.20: (a) Variación temporal, (b) boxplot y (c) histograma de frecuencia de ocurrencia, determinados para la serie de concentración de sedimento en suspensión obtenida en Torre Oyarvide para el Período 5 de medición.

Por último se presentan en la Figura 2.20 los resultados obtenidos para la serie de concentración de sedimento en suspensión calculada para el Período 5 de medición. Se

observa la serie de concentración muestra una gran variación en el período, con valores bajos en general pero eventos de grandes picos que superan los 600 mg/l. Se observa el 100% de los datos excede el umbral de 60 m/l. El valor máximo de este período corresponde a 812 mg/l y el valor medio a 151 mg/l.

La comparación de los resultados obtenidos para las series de concentración de sedimento en suspensión registradas en los tres períodos de medición muestra un comportamiento cualitativamente similar pero cuantitativamente diferente entre las mismas. Se observa un incremento de los valores medios, extremos y de los rangos de turbidez, en las mediciones del Período 5 respecto a las del Período 4, y de las del Período 4 respecto a las mediciones del Período 3.

2.4.3.3. Síntesis

Los datos de turbidez registrados durante los Períodos 3, 4 y 5 de medición en Torre Oyarvide fueron analizados en esta sección. Además, utilizando la información de concentración de sedimento en suspensión obtenida para muestras de agua de la zona obtenidas durante las campañas oceanográficas se determinó un ajuste para obtener valores de concentración de sedimento en suspensión a partir de los datos de turbidez. A pesar de ser un ajuste indirecto y considerarse muy aproximado, la información obtenida permite mejorar la caracterización de los sedimentos de la zona.

Los resultados obtenidos muestran un comportamiento, tanto de la señal de turbidez como de la concentración, caracterizado por una alta variabilidad temporal, con la existencia de oscilaciones de diversa escala respecto a un valor mínimo basal, con algunos eventos que triplican el valor de base. Este comportamiento se observó en las series temporales de los 3 períodos de tiempo analizados. No obstante, se observa una diferencia en los rangos de turbidez (y por tanto de concentración) registrados en Torre Oyarvide en los 3 períodos de medición. Se obtuvieron valores medios de las series iguales a 77 mg/l, 103 mg/l y 151 mg/l, para los Períodos de medición 3, 4 y 5, respectivamente.

Esta diferencia cuantitativa en las mediciones podría ser consecuencia de alguna modificación del instrumental utilizado (por ejemplo en la calibración de los sensores) o podría indicar cierta variabilidad estacional de la turbidez en la zona. Se considera la primera hipótesis es probablemente más válida. Por tanto, se considera la información cuantitativa de turbidez, y por tanto de concentración, deben tomarse como valores guía de los mismos en la zona de Torre Oyarvide, siendo el comportamiento cualitativo de las medidas la mejor información a extraer de las mismas.

2.4.4. Análisis conjunto turbidez y forzantes

2.4.4.1. Descripción del análisis

En este punto se analiza cómo se relacionan las series de turbidez de agua registradas por el SMATCH en Torre Oyarvide y las tensiones de corte de fondo generadas por los forzantes del sistema, corrientes de marea y oleaje. Como información complementaria se consideran también en el análisis la información de niveles y salinidad medidos en Torre Oyarvide también con el SMATCH.

De manera similar a los análisis realizados para los datos de la Boya y de Pilote Norden, se realizó en primer lugar un análisis visual simultáneo de las distintas series registradas, para cada uno de los 3 períodos en los cuales se cuenta con mediciones de turbidez en Torre Oyarvide. Además, se graficaron las anomalías estandarizadas de las tensiones de corte de fondo y de la señal de turbidez con el objetivo de identificar patrones de comportamiento comunes. Se utilizó también la información de niveles registrados con el equipo en Torre y se graficaron también las anomalías estandarizadas

de nivel superpuestas con la turbidez. Por último, se calculó el valor de correlación entre las series de turbidez con las tensiones de corte total, por corriente y por oleaje, además de la correlación con niveles y salinidad. Los resultados obtenidos se presentan en primer lugar para los períodos de medición, 3, 4 y 5, y por último se realiza un análisis integrado de los mismos.

2.4.4.2. Resultados obtenidos

A modo de ejemplo se presentan en la Figura 2.21 los resultados obtenidos para las mediciones durante el Período 3.

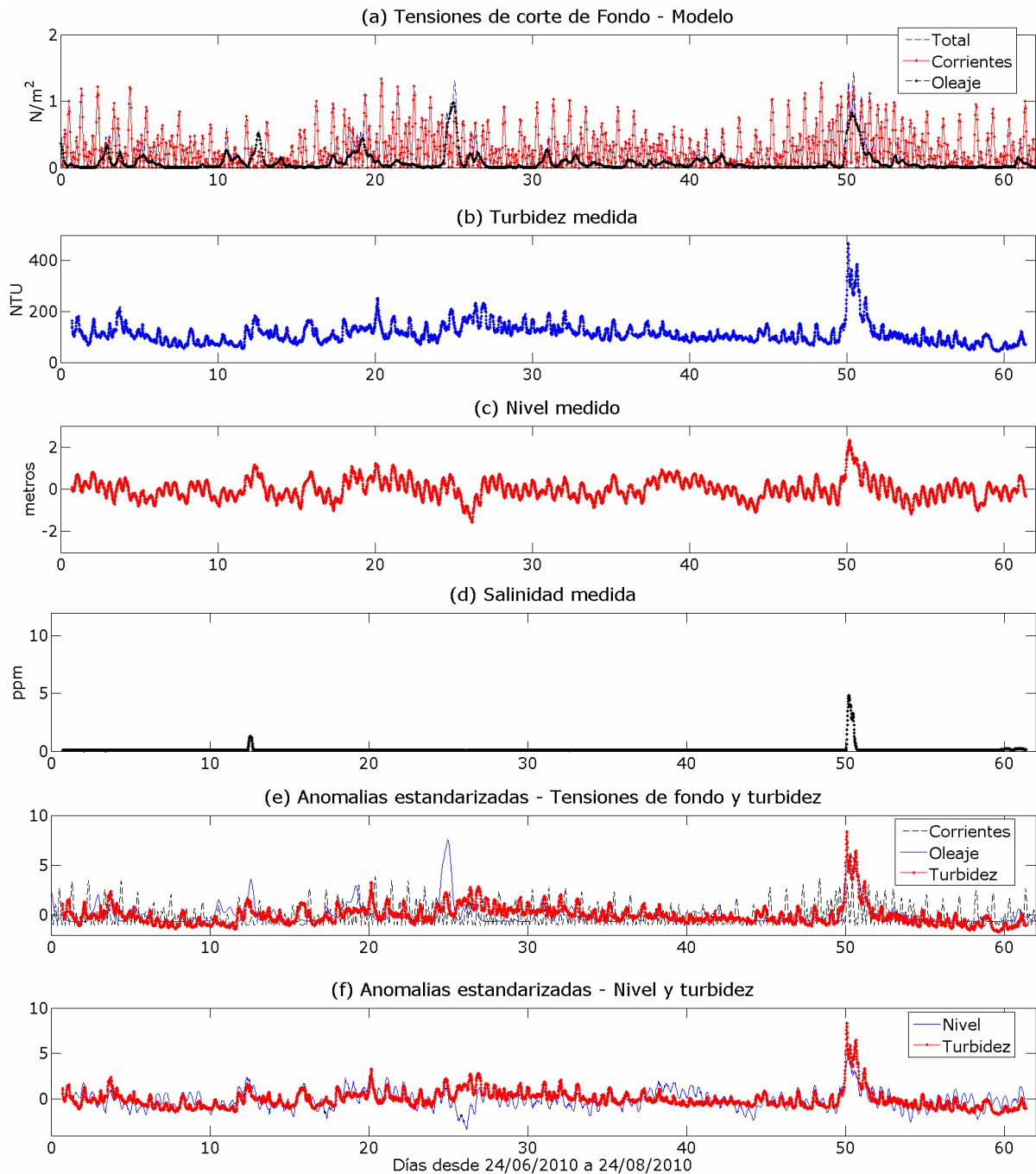


Figura 2.21: Variación temporal: (a) de las tensiones de corte de fondo obtenidas con el modelo, (b) de la turbidez medida, (c) del nivel medido, (d) de la salinidad medida, (e) de las anomalías estandarizadas de las tensiones de fondo y de la turbidez y (f) de las anomalías estandarizadas de nivel y turbidez, en Torre Oyarvide durante el Período 3 de medición.

Visualmente no se observa una clara correlación entre la señal de turbidez y la serie de tensión total de fondo. En esta zona la tensión de corrientes predomina y en promedio representa el 76% de la tensión de corte total. En algunos casos se observa correlación entre los eventos de aumento de turbidez y los eventos de tormenta, como se observa para el caso del día 50 del período de medición. Los factores de correlación obtenidos entre la serie medida de turbidez y las tensiones de corte total, por corrientes y por oleaje son 0,3180, 0,1650 y 0,5442, respectivamente, observándose una mayor correlación entre la turbidez y el oleaje. En relación a la señal de nivel, se observa coincidencia en varios eventos entre la frecuencia del nivel y la frecuencia de la señal de turbidez, y el factor de correlación entre ambas series es 0,5599. La señal de salinidad presenta solamente dos eventos durante el período analizado de aumento de salinidad, los cuales coinciden con tormentas, picos de turbidez y valores altos de nivel asociado a eventos meteorológicos. El factor de correlación obtenido entre salinidad y turbidez es 0,4457.

Durante el Período 4 se obtuvieron resultados similares. Durante el mismo en promedio la tensión de corriente representa el 78% de la tensión total. En algunos casos se observó coincidencia entre los picos de turbidez con un evento de tormenta que genera mayores tensiones de oleaje. Los factores de correlación muestran este comportamiento, siendo los valores obtenidos entre la turbidez y las tensiones de corte total, por corrientes y por oleaje iguales a 0,1521, 0,0877 y 0,2426, respectivamente. Se observan estos valores son bajos aunque hay mayor correlación entre la turbidez y el oleaje. Se observó por otra parte que la frecuencia de la señal de turbidez en períodos de valores bajos a medios es coincidente con la frecuencia semidiurna de la señal de nivel en la zona, y el factor de correlación entre ambas series es igual a 0,4198. Respecto a la señal de salinidad y su relación con la turbidez, se observaron varios eventos de aumento de salinidad que ocurren inmediatamente después de grandes eventos de fuerte aumento de turbidez y posterior descenso. El factor de correlación obtenido es muy bajo, igual a 0,0755.

Para el Período 5 la comparación de la variación temporal de las series muestra que en general no hay una correlación clara entre la turbidez y las tensiones. Durante este período en promedio la tensión de corriente representa el 75% de la tensión total. Se observó en algunos casos que los eventos de oleaje generan aumentos de turbidez pero por otra parte grandes eventos de turbidez se observaron con tensiones bajas de oleaje. Se obtuvieron factores de correlación entre la turbidez y las tensiones bajas, iguales a 0,1471 (tensión total), 0,1134 (tensión por corriente) y 0,1741 (tensión por oleaje). Por otra parte se observó una clara correlación entre la señal de turbidez y la oscilación del nivel, principalmente en la frecuencia predominante de la señal (semidiurna), con un factor de correlación igual a 0,4365. En relación a la salinidad se observaron dos grandes eventos de aumento de la misma durante este período; uno coincidente con un fuerte aumento de turbidez, y otro donde no se observó coincidencia. El factor de correlación entre ambas señales obtenido para este período es casi nulo (0,0464).

2.4.4.3. Síntesis

Se analizó en esta sección si existe correlación entre las series de turbidez medidas por el SMATCH ubicado en Torre Oyarvide y las series de tensión de corte calculadas por el MARS (tensión por corrientes, tensión por oleaje y tensión total). Además, se analizó la correlación entre la turbidez y las señales de niveles y salinidad registradas.

Los resultados obtenidos dependen de los períodos de medición. Para el período de medición 3 se obtuvo una correlación media a alta entre la tensión de corte debida al oleaje y la señal de turbidez. A pesar de que la tensión predominante en el lugar es la

tensión por corriente no se observa una correlación clara con la misma. Se identificó en particular un evento de fuerte aumento de turbidez que ocurre durante una gran tormenta, lo que indicaría dicho evento es un evento de aumento de turbidez por resuspensión de material de fondo. Durante los Períodos 4 y 5 de medición no se observó una correlación clara entre los picos de turbidez observados y las tensiones de corte. Esto mostraría dichos eventos probablemente no se deban a una resuspensión de material de fondo. No obstante es importante mencionar el modelo de oleaje durante este período podría estar subvalorando los eventos de tormenta ya que está forzado con vientos de baja resolución por no contar con mejor información (ver Capítulo 3).

Por otro lado se observó que en todos los períodos de tiempo hay una correspondencia entre la frecuencia de la oscilación del nivel y la frecuencia de la turbidez durante ciertos subperíodos de tiempo. Esto se observa durante períodos de calma donde la variación de nivel presenta un comportamiento de marea astronómica pero también durante algunos eventos de marea meteorológica. Esta correlación podría estar indicando que la señal de base de la turbidez en Torre Oyarvide estaría forzada principalmente por el flujo de marea real (astronómica y meteorológica) en la zona. Durante fuertes eventos de tormenta se sumaría el efecto de fuerte resuspensión de material de fondo ocurrido durante los mismos. Se analizaron los espectros que se obtienen de las señales de turbidez registradas durante los tres períodos analizados en Torre. En la Figura 2.22 se presentan los resultados. Se observa los espectros muestran una superposición de muchas señales pero se destacan los períodos asociados a la marea astronómica semidiurna y diurna que se observa en el Río de la Plata. Además, se observan picos de energía en los espectros asociados a períodos mayores que representan la marea meteorológica en la zona.

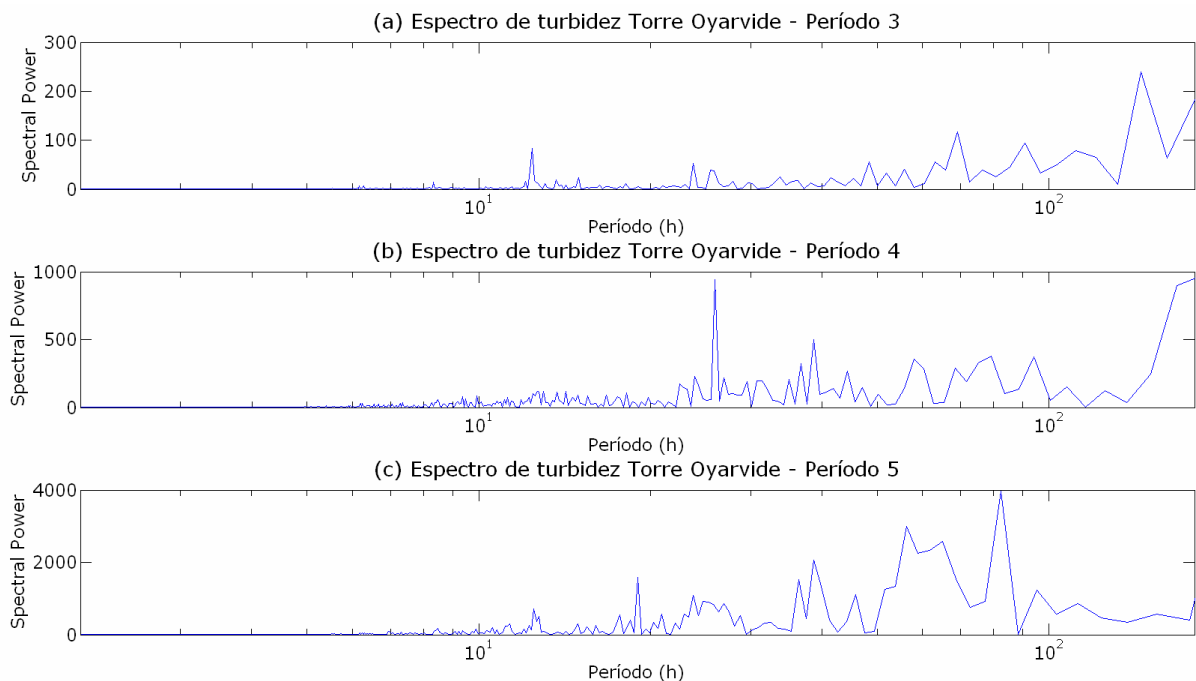


Figura 2.22: Espectros de la señal de turbidez medida durante (a) el Período 3, (b) el Período 4 y (c) el Período 5 de medición en Torre Oyarvide.

Incorporar a este análisis la salinidad permite quizás validar o chequear algunos comportamientos. En general la salinidad en la zona es nula, pero hay ciertos eventos donde la pluma ingresa desde la zona exterior a la zona intermedia del Río de la Plata, durante los cuales hay aumentos de salinidad. La variación temporal de turbidez y

salinidad muestra relaciones interesantes a pesar de que las correlaciones son muy bajas debido a la gran cantidad de valores nulos. Durante el Período 3 de medición ocurrieron dos picos de salinidad que están acompañados de dos picos de turbidez (que a su vez presentan fuerte correlación con oleaje). Sin embargo, durante los Periodos 4 y 5 hay más cantidad de eventos y en la mayoría cuando ocurre el aumento de salinidad se observa una disminución de la turbidez (ingreso de agua oceánica con menores valores de turbidez). Esto podría estar indicando que si el ingreso de la pluma es por tormenta entonces aumenta la turbidez pero si está generado por otros mecanismos que no resuspenden entonces la turbidez responde de forma contraria y la concentración de sedimento en suspensión disminuye. Analizando los niveles medidos (marea meteorológica) se observan estos eventos coinciden con valores de oscilación de niveles por encima del nivel medio (valores de creciente meteorológica).

2.4.5. Síntesis datos Torre Oyarvide

Se presentaron en esta sección los análisis realizados a los datos registrados con los equipos tipo SMATCH instalados en Torre Oyarvide, de interés para la dinámica de sedimentos finos general en el Río de la Plata, entre noviembre 2009 y diciembre 2010. Estas mediciones son realizadas en ubicaciones fijas respecto al fondo, a una profundidad media de 2,4 m de la superficie, representativas de la zona superior media de la columna de agua. En primer lugar se realizó un chequeo y depuración inicial de los datos. Durante los Períodos 1 y 2 de medición no se cuenta con mediciones pues el equipo no quedó bien instalado. Por otra parte las mediciones durante los Períodos 3, 4 y 5, fueron realizadas con éxito y se cuenta con información válida entre junio y diciembre 2010. No obstante, los análisis estadísticos muestran una diferencia importante en los rangos de turbidez (y por tanto de concentración) de los registros en Torre Oyarvide de los 3 períodos de medición. La variabilidad de la señal registrada en cambio presenta el mismo comportamiento durante los tres períodos.

Considerando representativa la variabilidad observada en las series de turbidez registradas en Torre Oyarvide de la variabilidad de la concentración de sedimentos finos, se analizan los resultados de turbidez y su interpretación aporta a la dinámica de sedimentos finos en suspensión. Los registros muestran valores de turbidez no nulos permanentes en la zona, lo que indica presencia de sedimentos finos en la columna de agua todo el tiempo. Se observa la señal está caracterizada por una oscilación corta de escala de marea y por eventos de mayor magnitud y mayor duración. La vinculación con los forzantes muestra la mayor parte del tiempo (durante períodos de calma) no hay una correlación directa entre la turbidez y la tensión de corte de fondo, lo que podría indicar una predominancia del transporte de sedimentos en la columna de agua. Esto se observa claramente en la correspondencia existente entre la frecuencia de la oscilación del nivel y la frecuencia de la turbidez durante la mayor parte del tiempo. Por otra parte, se observa una influencia de los eventos de tormenta sobre la señal de turbidez debido a la resuspensión del material de fondo.

2.5. CAMPAÑAS OCEANOGRÁFICAS

En esta sección se presentan y analizan los datos recolectados en las campañas oceanográficas del Proyecto FREPLATA-FFEM en las 26 estaciones de monitoreo en el Río de la Plata presentadas anteriormente en la Figura 2.1. El monitoreo realizado se compuso de tres componentes. Por un lado se tomaron muestras de agua mediante bombeo para determinar las características de los sedimentos en suspensión en laboratorio: concentración y composición granulométrica. Por otra parte se tomaron muestras de sedimento de fondo (de la zona superior del lecho) utilizando un grapo, para las cuales en laboratorio se determinaron la composición granulométrica, el contenido de

materia orgánica y el contenido de agua. Por último, se realizaron perfiles verticales de salinidad, turbidez, temperatura y fluorescencia de la columna de agua mediante un equipo CTD mejorado con un fluorómetro y un turbidímetro.

Los análisis granulométricos de las muestras de sedimento en suspensión y de las muestras de fondo se realizaron en el laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires (SHN, 2010a). Se usó un equipo CILAS 1180, un analizador de partículas finas que utiliza un sistema óptico de difracción láser integrado con una cámara CCD, que le permite medir partículas de entre 0.04 y 2500 μm en una sola medición (SHN, 2010a). A partir de este análisis se clasifican las muestras según el tamaño medio de grano. En el caso de que se identificaran gravas se tamizó la muestra con tamiz n°10 de 2 mm previamente a su análisis con el CILAS. La información suministrada por el laboratorio consiste en las curvas granulométricas y la determinación de los porcentajes de grava (partículas mayores 2 mm), arena (partículas entre 0,062 mm y 2 mm), limo (partículas entre 62 μm y 3,9 μm) y arcilla (partículas menores a 3,9 μm) de cada muestra.

Durante cada campaña se estableció una ruta para recorrer las diferentes estaciones trabajando en general entre 3 y 4 días debido a las grandes distancias a recorrer. Esto significa las muestras no son simultáneas aunque son cercanas en el tiempo. Además, la mayor parte de las mediciones corresponden a condiciones climáticas similares, en general de calma sin oleaje de tormenta y vientos suaves a moderados, ya que estas condiciones son necesarias para la manipulación realizada en campo. Esta información es importante tenerla en cuenta a la hora de analizar los datos medidos. A grandes rasgos se toman estos datos como medidas indicativas de las variables medidas en las diferentes zonas del Río de la Plata durante situaciones de calma (sin tormentas ni fuertes vientos). En los casos donde se realiza un análisis espacial, el mismo es indicativo en la medida que la diferencia temporal de las muestras, y la conocida variabilidad temporal de corta escala de la turbidez, introducen un factor de incertidumbre y no es posible establecer relaciones certeras.

2.5.1. Muestras de material en suspensión

A partir de las muestras de agua tomadas en las diversas campañas se determinó la concentración de material particulado en suspensión (MPS) y su composición. Considerando la falta de información se toma como hipótesis en este análisis que todo el material particulado obtenido de las muestras en suspensión corresponde a sedimento fino. En la mayoría de las estaciones se tomó una muestra a profundidad media y en los casos donde el CTD mostraba variación de la turbidez en la columna de agua se extrajo también una muestra de agua de fondo. Se cuenta entonces con el valor de concentración y composición de sedimento en suspensión a profundidad media en todas las estaciones y en algunas (principalmente las de la zona exterior) se cuenta además con dicha información sobre el fondo de la columna de agua. Los datos de concentración y composición de sedimento en suspensión se analizaron teniendo en cuenta dos componentes, la variabilidad temporal y la variabilidad espacial.

2.5.1.1. Concentración de sedimento en suspensión

Para analizar la variabilidad espacial de la concentración de sedimento en suspensión a profundidad media y sobre el fondo se graficaron los valores medidos en cada estación de monitoreo en un mapa del Río de la Plata en función de la posición de las mismas. A modo de ejemplo se presenta en la Figura 2.23 la variación espacial obtenida para los datos de la campaña 4.

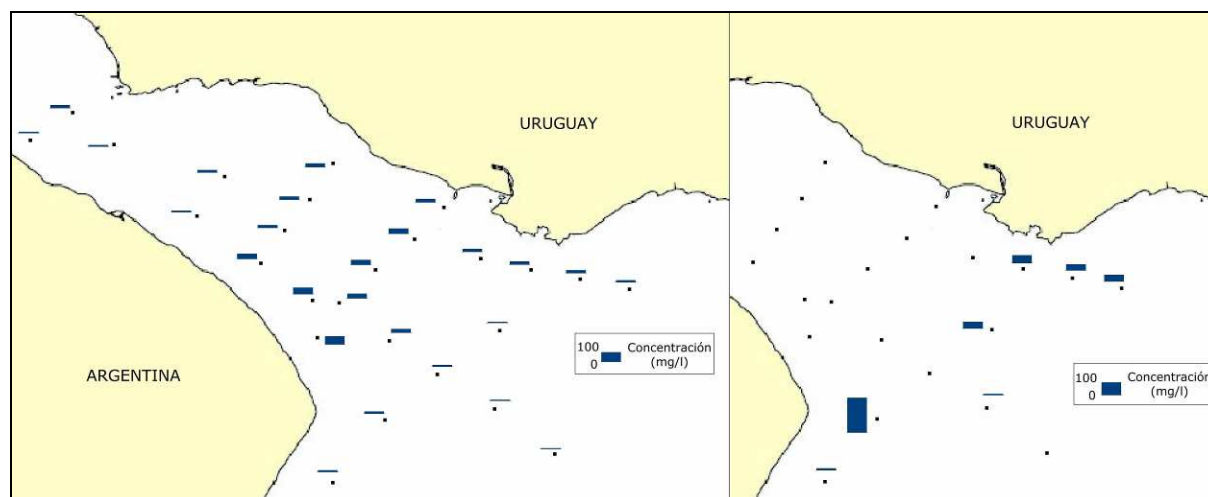


Figura 2.23: Distribución espacial de la concentración de sedimento en suspensión medida en la Campaña 4 en profundidad media (panel izquierdo) y en fondo (panel derecho).

Para los datos medidos en la campaña 1 la distribución espacial de la concentración a profundidad media muestra una variabilidad espacial, con los valores más bajos sobre la costa uruguaya en la zona intermedia y exterior, valores un poco mayores en la zona interior del Río de la Plata y los valores más altos en la zona intermedia sobre la costa argentina. El máximo valor a profundidad media se obtuvo para la estación #14 igual a 149 mg/l y el mínimo a profundidad media (6 mg/l) se obtuvo en las estaciones exteriores #25 (sobre la costa uruguaya) y #22 (zona central). En relación a las muestras de fondo se observan valores mayores en la zona central y exterior del Río de la Plata y valores bajos sobre la costa uruguaya.

Para la campaña 2 los resultados muestran una variabilidad en la concentración de sedimento en suspensión a lo largo del Río de la Plata. Tomando como referencia los valores de la zona interior, se observa una disminución de la concentración sobre la costa uruguaya en la zona intermedia y un incremento de la misma hacia la costa argentina, alcanzándose los valores mayores en la zona de Barra del Indio. En la zona exterior sobre la costa uruguaya y zona central las concentraciones son muy bajas siendo en cambio sobre la costa argentina los valores un poco mayores. El valor mayor de concentración a profundidad media se obtuvo para la estación #16 (121 mg/l) ubicada sobre la transición entre zona intermedia y exterior del Río de la Plata. Los pocos valores de concentración del fondo de la columna de agua muestran concentraciones altas solamente en la estación #22. Para los datos de la campaña 3 se observan valores de concentración de sedimento en suspensión de alrededor de 50 mg/l en la zona interior e intermedia, valores un poco mayores hacia la zona intermedia contra el límite exterior (98 mg/l en la estación #15bis) y luego en la zona exterior las concentraciones son bajas. Las mayores concentraciones a profundidad media de la columna de agua ocurren en las estaciones de la zona intermedia cercanas a la Barra del Indio. Se observa un valor aislado de gran concentración, 300 mg/l, en la zona exterior contra la costa argentina. Las muestras de fondo en la costa uruguaya no muestran concentraciones muy grandes ni muy diferentes a las de profundidad media. En cambio en la zona central exterior las concentraciones en el fondo son mayores a las de profundidad media indicando estratificación vertical.

Los datos obtenidos en la campaña 4 de agosto 2010 (Figura 2.23) muestran concentraciones a profundidad media menores a 100 mg/l en todo el Río de la Plata. Las mayores concentraciones ocurren en las estaciones de la zona intermedia, observándose valores más bajos en la zona exterior y en la zona interior. El valor mayor se observa a

profundidad media en la estación #15 (82 mg/l) y el valor más bajo de concentración es igual a 7 mg/l correspondiente a la estación ubicada más hacia el exterior del Río de la Plata, estación #19. En el fondo se observan valores de concentración muy parecidos en las estaciones exteriores sobre la costa uruguaya y mayores valores en las estaciones del exterior sobre la costa argentina. Por último, los datos de la campaña 5 muestran concentraciones variables con el valor más bajo igual a 6 mg/l en la estación #23 ubicada sobre la costa uruguaya en la zona exterior y el valor máximo igual a 120 mg/l en la estación #7 en la zona intermedia sobre la costa argentina, ambas a profundidad media. Se tomaron solo 3 muestras de fondo que muestran valores mayores a los de profundidad media en las estaciones #20 y #22 ubicadas en la zona central exterior; mientras que en la estación #23 el valor es similar al de profundidad media. Se observa las mayores concentraciones a profundidad media ocurren en las estaciones de la zona intermedia sobre la costa argentina y luego hay una disminución hacia la zona exterior.

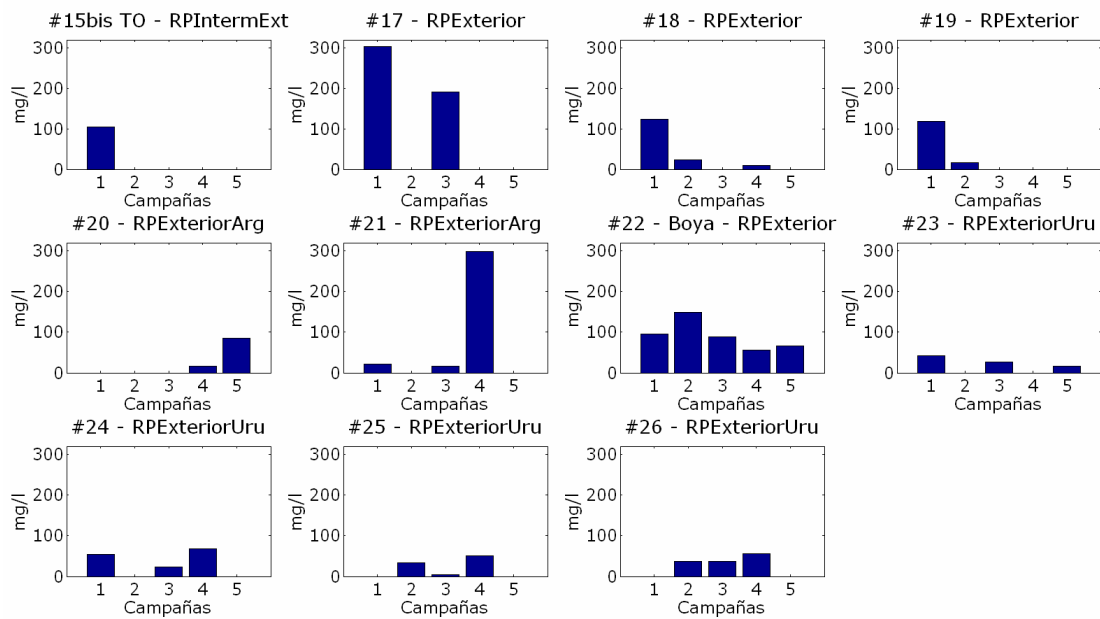


Figura 2.24: Concentración de sedimento en suspensión sobre el fondo para las estaciones monitoreadas durante las campañas 1 a 5.

La comparación de los valores de concentración de sedimento en suspensión obtenidos para cada estación monitoreada en las campañas 1 a 5 del Proyecto FREPLATA-FFEM se presenta en la Figura 2.24 (valores sobre el fondo) y en la Figura 2.25 (valores a profundidad media).

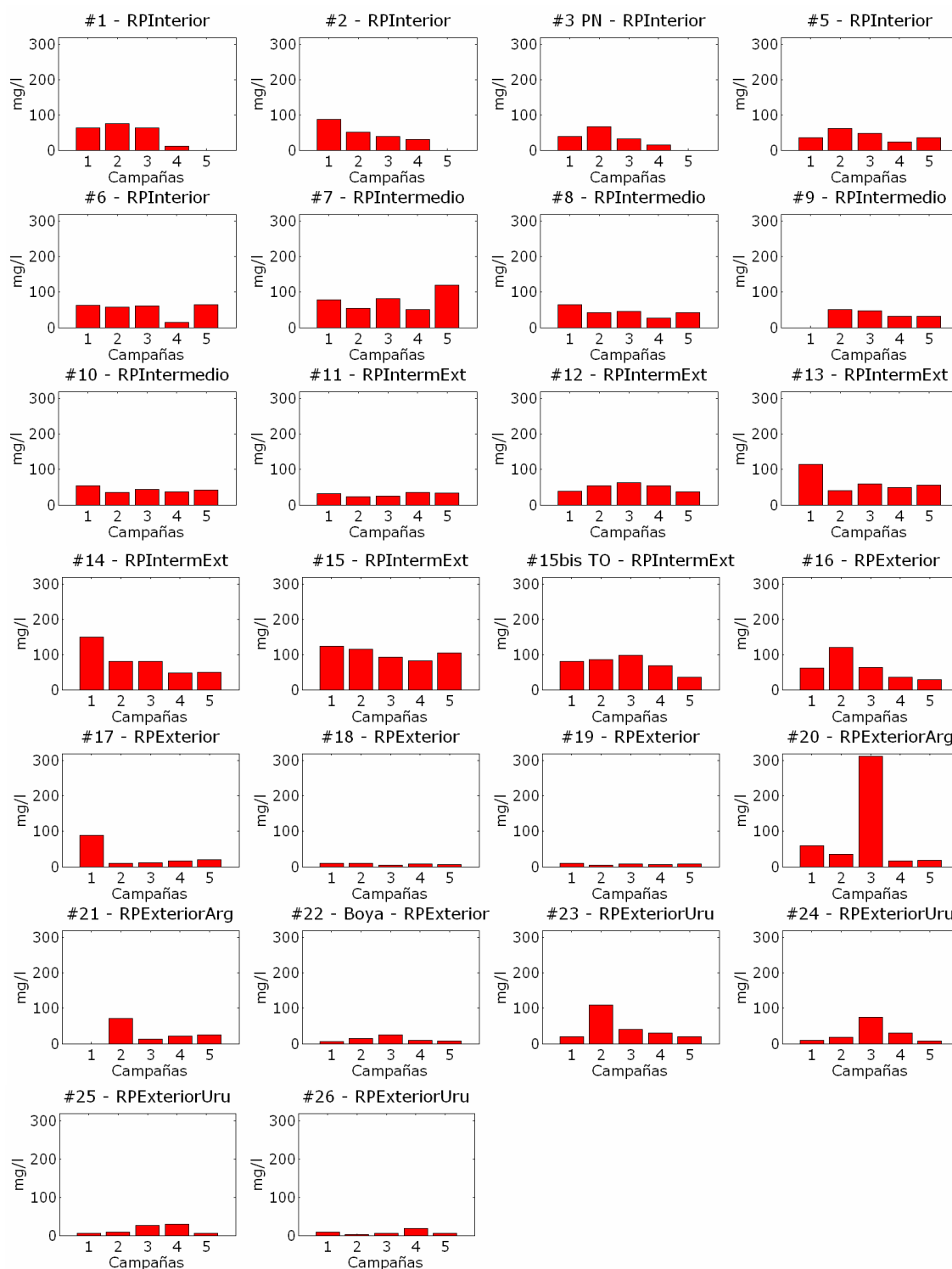


Figura 2.25: Concentración de sedimento en suspensión a profundidad media para las estaciones monitoreadas durante las campañas 1 a 5.

En términos generales se observa una variabilidad en los datos recolectados por estación en las diferentes campañas lo que es razonable en una zona de gran dinámica de flujo como lo es el Río de la Plata. En algunos casos, como en las estaciones #10, #11, #18 y #19, los valores de concentración a profundidad media son muy similares entre campañas. En otras estaciones se identifican algunos casos de concentraciones muy diferentes a las de las otras campañas. Por ejemplo en la estación #20 en la campaña 3 se obtuvo un valor de concentración más de 6 veces mayor al del resto de las campañas,

lo que quizás pueda deberse a una mayor profundidad de extracción. A pesar de la variabilidad observada en los datos no se identifica ningún ciclo temporal característico entre los datos recolectados.

2.5.1.2. Composición del sedimento en suspensión

En relación a la información de la campaña 1 (SHN, 2010a) se encontró una incoherencia entre la información publicada de porcentajes de materiales en relación a las curvas obtenidas en laboratorio con el equipo CILAS, en cuanto a resultados y a la numeración de las muestras. Debido a esto no se consideran los datos de composición de material en suspensión de la campaña 1 en los análisis realizados. Además, debido a la poca información obtenida durante la campaña 5 se descartan las medidas de la misma para el análisis realizado.

Para analizar la variabilidad espacial de la composición del sedimento en suspensión a profundidad media y sobre el fondo se graficaron los valores en cada estación de monitoreo en un mapa del Río de la Plata en función de la posición de las mismas. A modo de ejemplo se presenta en la Figura 2.26 la variación espacial obtenida para los datos de la campaña 4.

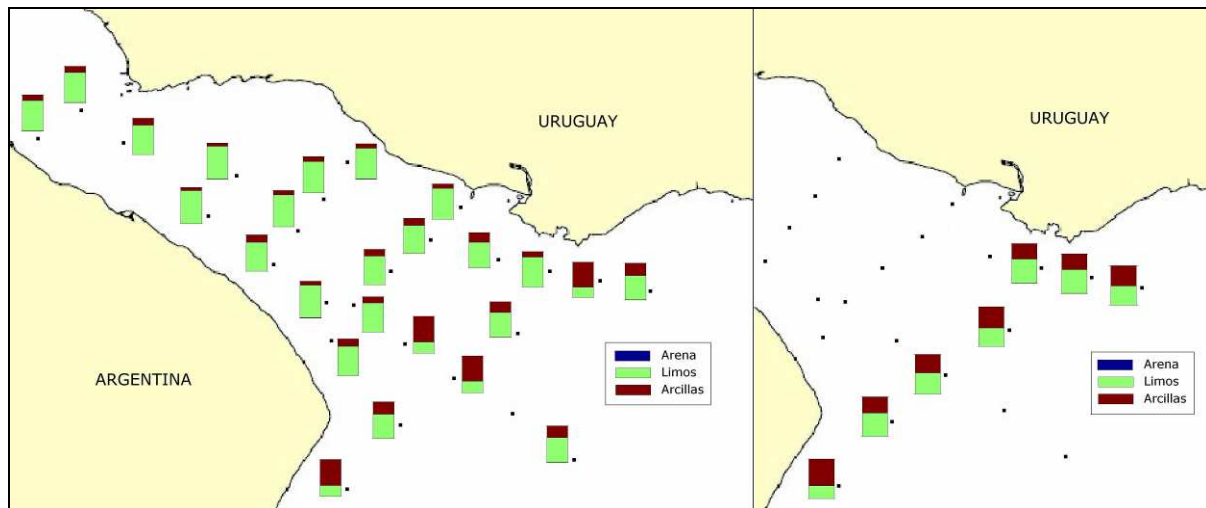


Figura 2.26: Distribución espacial de la composición de sedimento en suspensión medida en la Campaña 4 en profundidad media (panel izquierdo) y en fondo (panel derecho).

Los datos de la campaña 2 muestran que en la mayor parte del Río de la Plata el material es predominantemente limoso con variación del contenido de arcilla entre la zona interior intermedia y la zona exterior, observándose un incremento de la proporción de arcilla hacia la zona exterior y en la costa uruguaya en la zona intermedia. En las estaciones en la zona central exterior se observa una predominancia de material arcilloso con poco contenido de limo. La composición de sedimento en suspensión sobre el fondo (estaciones solamente en el exterior) muestra una gran proporción de arcillas en todos los casos con mayor contenido de arcilla hacia la zona central y sur. Solamente en la estación #18 se cuenta con datos a profundidad media y sobre el fondo, y se observa la misma composición de sedimento en ambas medidas.

Se observa una variación espacial clara del contenido del sedimento en el Río de la Plata en los datos de la campaña 3. Por un lado en las estaciones ubicadas en la zona interior e intermedia, mayormente el sedimento está compuesto por limo y un bajo porcentaje de arcilla, que varía entre 10 % y 29 %. En la zona exterior a partir de la estación #17 la composición del sedimento en suspensión cambia a materiales predominantemente arcillosos con porcentaje entre 49 y 60 % a profundidad media. Las

pocas muestras obtenidas en la columna de agua cercanas al fondo (correspondientes a la zona exterior) muestran también predominancia de arcillas. Para analizar la variación en la columna de agua se cuenta con 5 mediciones a profundidad media y sobre el fondo (estaciones #17, #21, #22, #23, #25). Los datos muestran el sedimento presenta igual composición en ambas muestras con leves variaciones en los porcentajes en todas las estaciones salvo en la #22 donde sobre el fondo el porcentaje de limo aumenta un 10 % respecto al valor igual a 43 % de profundidad media (y en consecuencia el porcentaje de arcilla disminuye de 57 % a 47 %).

Para los datos de la campaña 4 (Figura 2.26) se observa una variabilidad espacial similar a la mencionada anteriormente a partir de los datos de la campaña 3. En la zona interior e intermedia (estaciones #1 a #15bis), el material en suspensión a profundidad media está compuesto principalmente por limos, sin contenido de arena y algo de arcilla (entre 9 % y 21 %). El resto de las estaciones presentan mayores porcentajes de arcilla en su composición, pero se observan dos grupos. Las estaciones #17, #20 y #25, con más de un 69 % de contenido de material arcilloso, y las estaciones #19, #21, #22, #23 y #26 con un porcentaje de arcilla entre 31 y 35 %. La estación #24 presenta una composición similar al material de la zona interior. Los datos correspondientes a las muestras de sedimento sobre el fondo (todas de la zona exterior) muestran material limoso arcilloso con variaciones en el porcentaje de arcilla entre 40 % (#25) y 68 % (#20). Respecto a la comparación del contenido del sedimento a profundidad media y sobre el fondo en las estaciones donde se cuenta con dicha información simultánea, se observa una variación del contenido en todas las estaciones, salvo en #20 y #21 donde el contenido es similar.

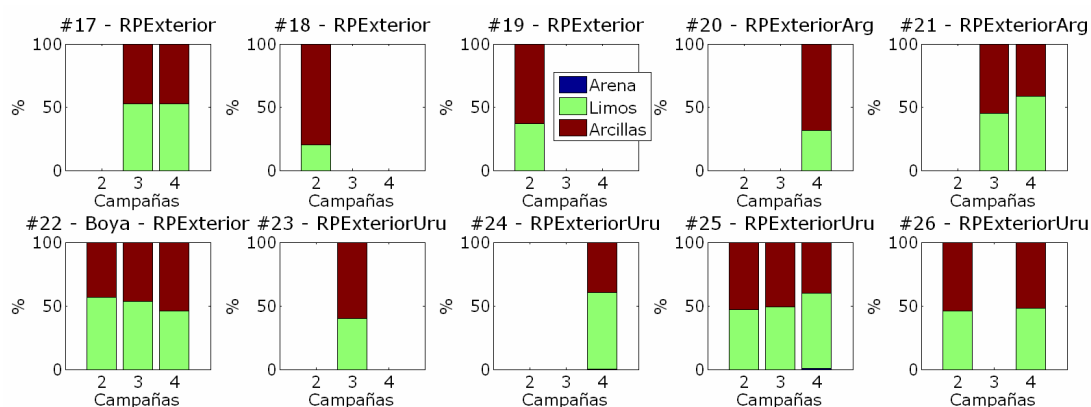


Figura 2.27: Composición del sedimento en suspensión del fondo obtenido para las estaciones monitoreadas durante las campañas 2, 3 y 4.

La comparación de la composición de sedimento en suspensión sobre el fondo obtenida para las estaciones del exterior en las campañas 2, 3 y 4 se presenta en la Figura 2.27. En la Figura 2.28 se presenta para cada estación la composición del sedimento en suspensión a profundidad media medida durante las campañas 2, 3 y 4. A pesar de que el número de datos es bajo se observa claramente que prácticamente no hay variaciones en la composición de sedimento entre las campañas. Se observa en las estaciones #18, #19 y #26 solamente hay un dato por lo que no se puede realizar comparación. En la mayor parte de las estaciones del interior y región intermedia del Río de la Plata se observa una disminución del contenido de arcilla a lo largo de las campañas, con mayor porcentaje en la campaña 2 y menores porcentajes (similares) entre las campañas 3 y 4. La estación #5 y la estación #10 constituyen pequeñas variaciones donde el contenido de arcilla del sedimento entre la campaña 3 y la campaña 4 se diferencia más. En las estaciones de la zona exterior no se observa un comportamiento tan claro al comparar los resultados de las campañas. Las estaciones

#21, #22 y #24 muestran una disminución del contenido de arcilla a medida que avanzaron las campañas pero las estaciones #16, #17, #25 presentan un comportamiento diferente. A pesar de estos cambios entre medidas, el resultado general que muestran estos datos es una predominancia de limos en el sedimento en suspensión en la zona interior e intermedia del Río de la Plata, con poco contenido de arcilla, y una predominancia de arcilla en la zona exterior y sobre la costa uruguaya.

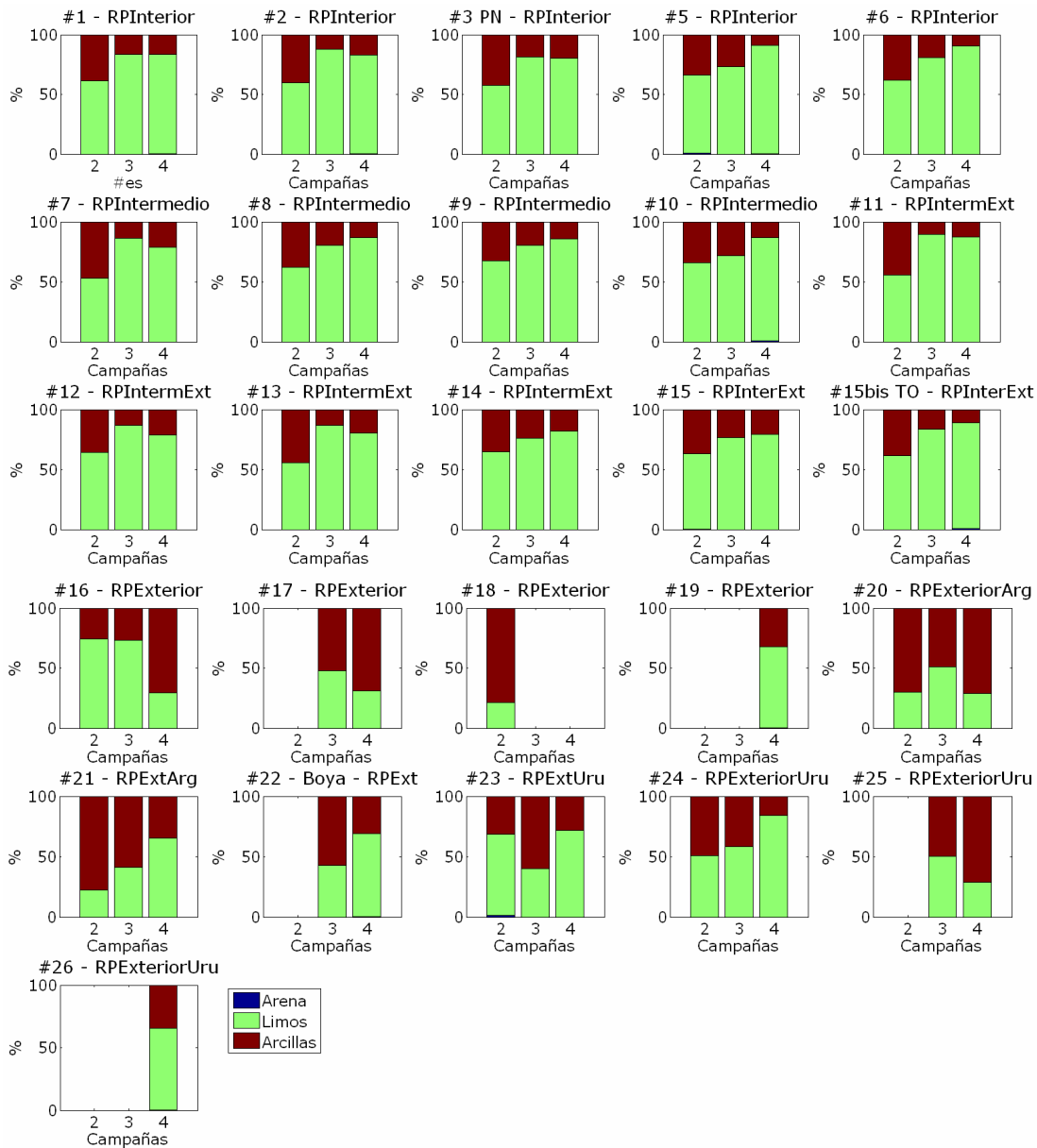


Figura 2.28: Composición del sedimento en suspensión a profundidad media obtenido para las estaciones monitoreadas durante las campañas 2, 3 y 4.

La representación en los diagramas triangulares de la composición del sedimento (fracción sólida), obtenida para las muestras de sedimento en suspensión (a profundidad media y sobre el fondo) del Río de la Plata para las campañas 2, 3, 4 y 5 se presenta en la Figura 2.29. Debido al casi nulo contenido de arena de las muestras la mayoría de los datos se ubican sobre el margen derecho de los diagramas, con variaciones entre el contenido de arcilla y de limo que cubren gran parte de las clasificaciones de los mismos.

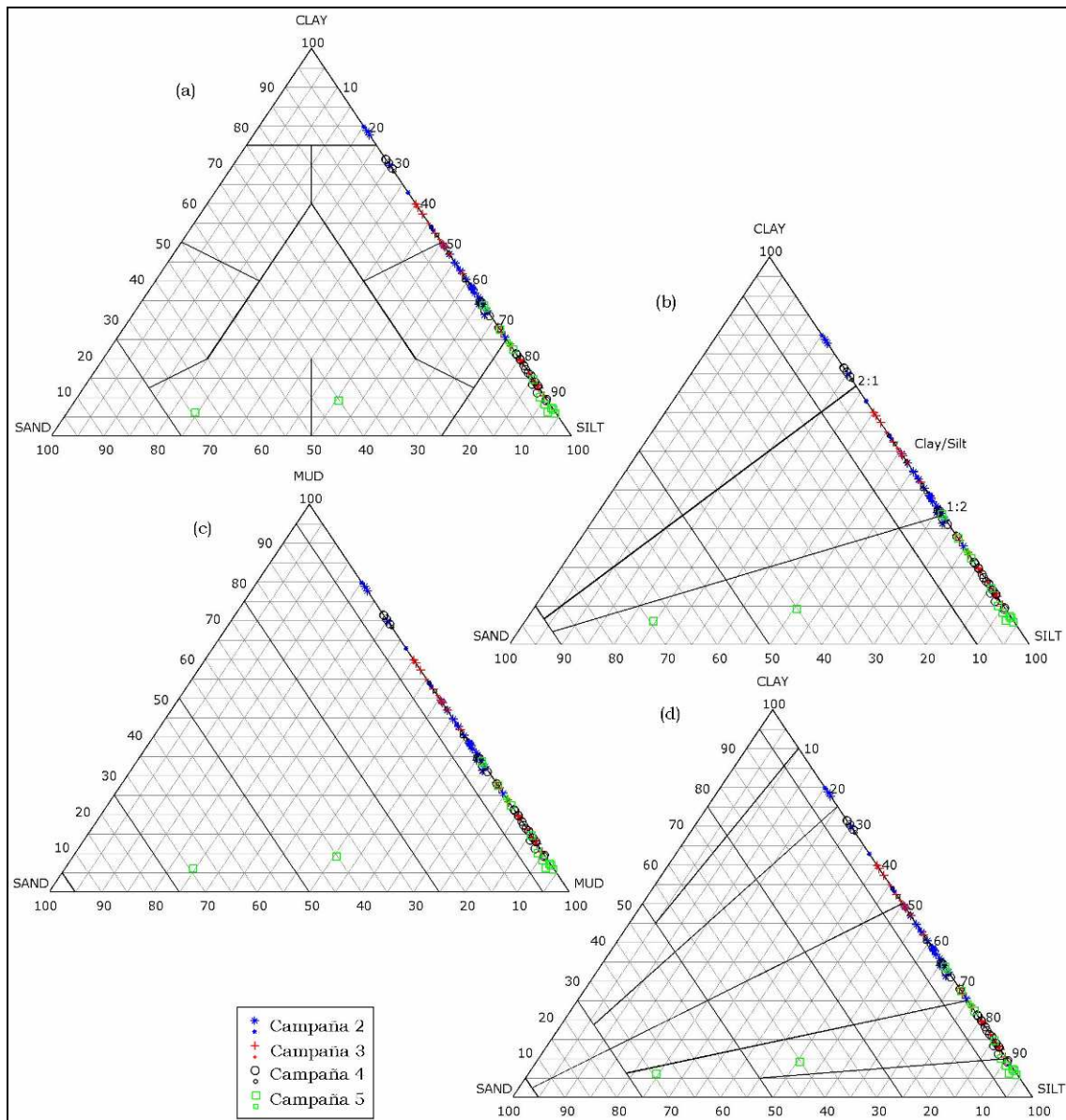


Figura 2.29: Diagramas triangulares de composición de sedimento obtenidos para el sedimento en suspensión en las campañas 2, 3, 4 y 5, a profundidad media (símbolo grande) y sobre el fondo (símbolo pequeño): (a) Shepard, (b) Folk, (c) Flemming I y (d) Flemming II.

Según el diagrama de Shepard, el sedimento en suspensión del Río de la Plata está compuesto principalmente de limos arcillosos (40 % datos) y limos (39 % de los datos). En menor medida se encuentran arcillas limosas (17 %) y arcillas (4 %). Dos valores corresponden a arena limosa y limo arenoso, correspondientes a los datos de las estaciones interiores #5 y #8 en la campaña 5 que podría considerarse datos no representativos pues en el resto de las campañas las mismas se clasifican como limo y limo arcilloso. Según la clasificación de Folk existen en la zona los tres tipos de materiales finos, limo (48 %), barro (42 %) y arcilla (10%). Según la clasificación de Flemming I solamente se trata de sedimento fino tipo barro (mud) en la zona, con la excepción de las dos muestras que muestran arena que se clasificarían como arena barrosa (“muddy sand”) y barro arenoso (“sandy mud”). La clasificación más completa propuesta por Flemming (II) indica que los sedimentos en suspensión tipo mud del Río de la Plata son de 5 tipos diferentes, los denominados E-I (limo, 7 %), E-II (limo ligeramente arcilloso, 30 %), E-III (limo arcilloso, 41 %), E-IV (arcilla limosa, 18 %) y E-V

(arcilla ligeramente limosa, 4 %). Las muestras con arena indican sedimento tipo B-I (arena muy limosa) y C-II (barro arenoso muy limoso).

2.5.1.3. Síntesis

En este punto se analizaron los datos sobre concentración y composición de sedimento de las muestras de agua extraídas en 26 estaciones distribuidas en el Río de la Plata en el marco del Proyecto FREPLATA-FFEM. La mayor parte de los datos corresponden a una profundidad media en la columna de agua y en las estaciones exteriores se cuenta además con información de la columna de agua sobre el fondo. Los datos fueron extraídos de los informes del SHN suministrados para dicho proyecto, chequeados y procesados para su utilización y análisis en este trabajo.

Estos datos permiten identificar dos comportamientos bien claros en la dinámica del Río de la Plata. En la zona interior y en la parte superior de la zona intermedia se observan sedimentos en suspensión predominantemente limosos con bajo contenido de arcilla y sin arena, con concentraciones del entorno de los 50 mg/l, los cuales se clasifican como limos o limos ligeramente arcillosos. Hacia la parte inferior de la zona intermedia las concentraciones comienzan a aumentar, principalmente sobre la parte cercana a la costa argentina, registrándose las máximas concentraciones (a profundidad media) en las estaciones cercanas a la Barra del Indio sobre la costa argentina. La composición del material en suspensión se mantiene en esa zona pero sobre la costa uruguaya el contenido de arcilla se incrementa y el material comienza a transformarse en limo arcilloso. Este comportamiento define una transición hacia lo observado en la zona exterior. En dicha zona sobre la costa uruguaya las concentraciones son bajas y el material aumenta su contenido arcilloso, mientras que sobre la costa argentina las concentraciones son levemente más altas y se registran los mayores porcentajes de contenido de arcilla de toda la zona. En la zona exterior comienza a participar la dinámica de fondo debido a las mayores profundidades. Los datos muestran concentraciones mayores de sedimento sobre el fondo con una composición levemente variable respecto a la composición del sedimento a profundidad media. En la zona exterior predominan los materiales tipo arcilla limosa y arcilla.

2.5.2. **Muestras de sedimento de fondo**

Se determinaron en laboratorio el contenido de humedad, materia orgánica y composición granulométrica de las muestras de sedimento de fondo recolectadas en cada campaña. Según la información publicada (SHN, 2010a), las muestras de sedimento fueron homogeneizadas y posteriormente separadas en tres fracciones. Una fracción fue utilizada para la determinación del contenido de agua y posteriormente para realizar los análisis granulométricos. Otra fracción fue utilizada para la determinación del contenido de materia orgánica y la tercera se mantuvo como reserva. En todas las campañas lograron exitosamente obtener muestras de sedimento de fondo en todas las estaciones, exceptuando las estaciones interiores #1, #2 y #3 durante la campaña 5.

Se analizan en esta sección la información recolectada referente al contenido de humedad, contenido de materia orgánica y la composición granulométrica del sedimento de fondo. Estos datos se analizaron en primer lugar contemplando la variabilidad espacial y la variabilidad temporal. Además, se determinaron las clasificaciones según el tamaño de grano del sedimento de fondo en base a los diagramas triangulares. Por último, se calcularon las correlaciones entre el porcentaje asociado a la fracción limo y a la fracción arcilla, con los porcentajes de materia orgánica y contenido de agua.

2.5.2.1. Contenido de materia orgánica

Para analizar la variabilidad espacial del contenido de materia orgánica del sedimento de fondo se graficaron los valores en cada estación de monitoreo en un mapa

del Río de la Plata. Se presenta en la Figura 2.30 la variación espacial obtenida para los datos de la campaña 4.

A pesar de las diferencias puntuales entre la información recolectada en cada campaña, se observa la variabilidad espacial de los datos es similar en todas. Por un lado se observan valores bajos de contenido de materia orgánica en la zona interior del Río de la Plata, con un aumento de los mismos hacia la zona intermedia. Los valores más altos de contenido de materia orgánica se registran en general en la zona de Barra del Indio y en las estaciones de la zona exterior.

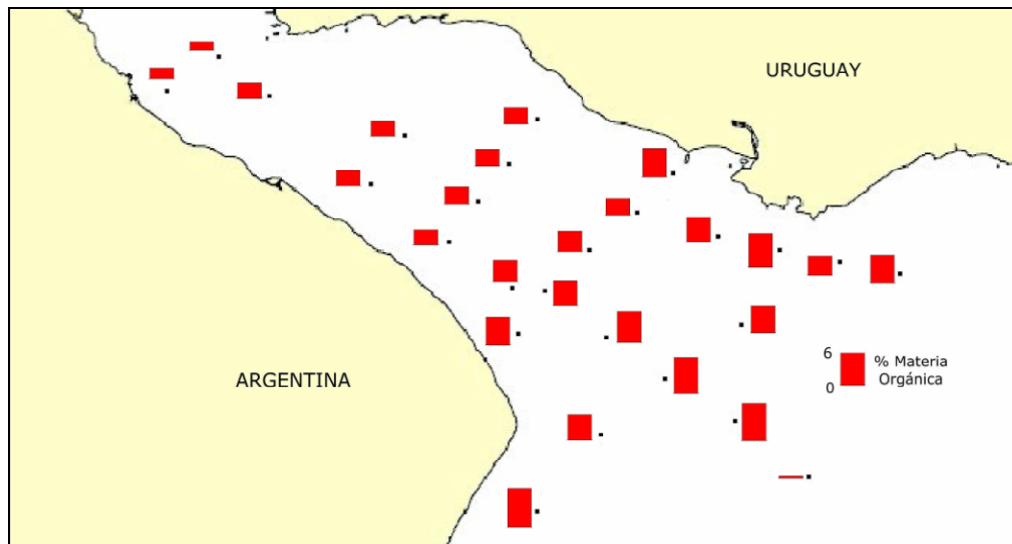


Figura 2.30: Distribución espacial del contenido de materia orgánica del sedimento de fondo; Campaña 4.

La comparación de los valores de contenido de materia orgánica del sedimento de fondo para cada estación monitoreada en las campañas 1 a 5 del Proyecto FREPLATA-FFEM se presenta en la Figura 2.31. Se observa hay una cierta variación de los valores de contenido de materia orgánica entre las campañas para la mayoría de las estaciones. Esto se observa en mayor medida en las estaciones donde los porcentajes de materia orgánica son mayores, por ejemplo en las estaciones intermedias y exteriores. En particular se observa los valores de las últimas campañas en general son mayores a los registrados durante las primeras campañas. Es interesante observar que esta tendencia también se observa en la estación #19 donde los valores son casi nulos.

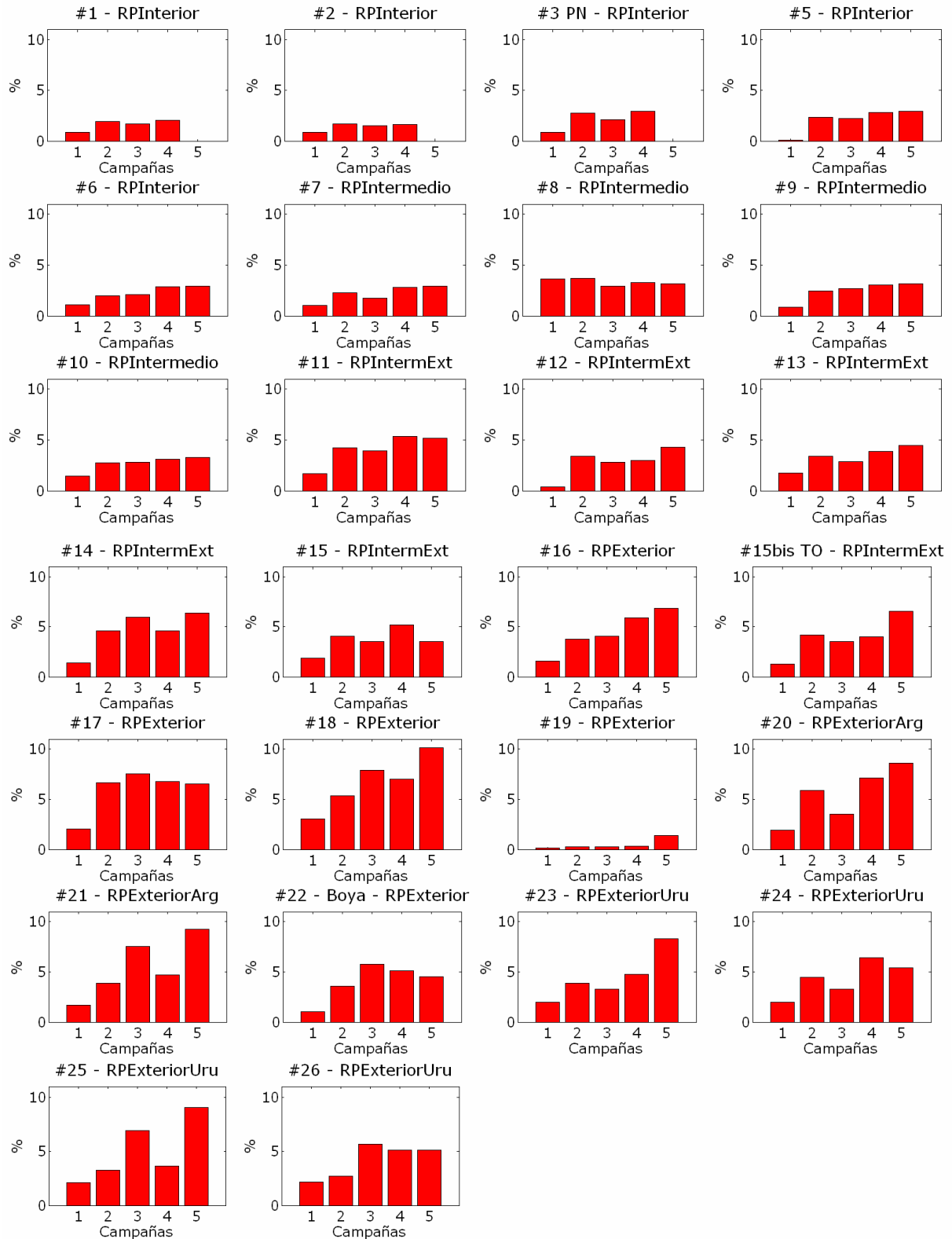


Figura 2.31: Contenido de materia orgánica (%) del sedimento de fondo extraído en las estaciones monitoreadas durante las campañas 1 a 5.

2.5.2.2. Contenido de humedad

Para analizar la variabilidad espacial del contenido de humedad del sedimento de fondo se graficaron los valores en cada estación de monitoreo en un mapa del Río de la

Plata. Se presenta a modo de ejemplo en la Figura 2.32 la variación espacial obtenida para los datos de la campaña 4.

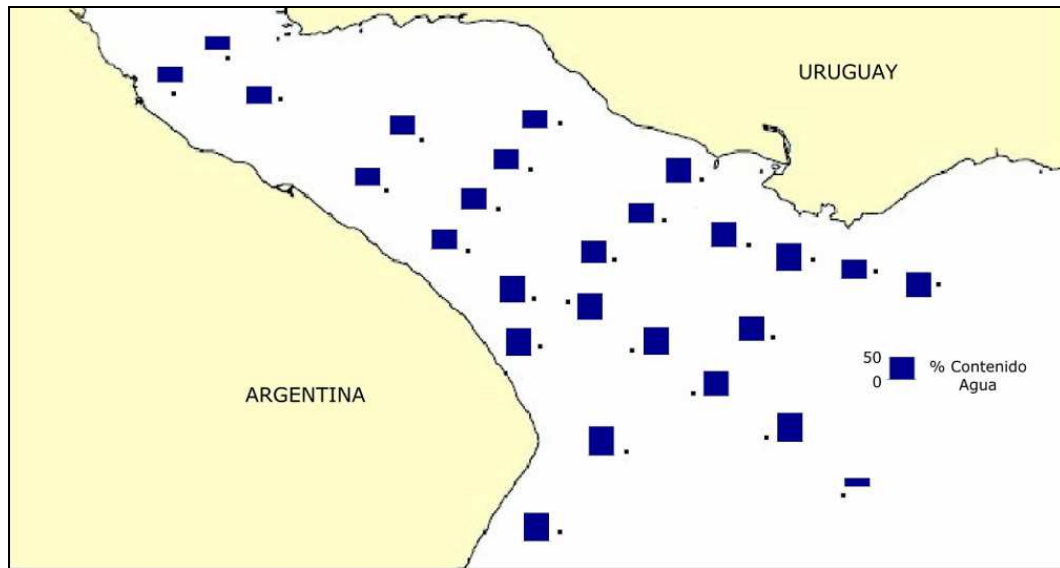


Figura 2.32: Distribución espacial del contenido de humedad del sedimento de fondo. Campaña 4.

Los datos correspondientes a la campaña 1 (noviembre 2009) muestran cierta variabilidad espacial. El valor correspondiente a la estación exterior #19 es un valor extremadamente bajo (17%). No considerando este valor el resto de las estaciones muestran un rango de variación entre 32 % y 64 %. La variabilidad espacial muestra un incremento progresivo del contenido de humedad desde la zona interior hacia el exterior. Respecto a los datos de la campaña 2 (marzo 2010), los datos obtenidos muestran un rango de variación entre 30 % y 67 % (exceptuando la estación exterior #19). Los valores mayores de contenido de humedad se observan en la zona exterior hacia la costa argentina (estación #20). La información recolectada en la campaña 3 (junio 2010) muestra nuevamente un valor bajo de contenido de humedad en la estación #19 y un rango de variación del resto de los valores comprendido entre 32 % y 70 %. El valor máximo se obtuvo en la estación exterior #18. La variabilidad espacial muestra un incremento desde la zona interior del Río de la Plata hacia la zona exterior. El comportamiento observado se identifica también en la información recolectada durante las campañas 4 y 5, realizadas en los meses de agosto y octubre 2010. Los valores máximos registrados corresponden a la estación exterior #21 en ambas campañas, con 64 % en la campaña 4 y 62 % en la campaña 5. La variabilidad espacial de los datos de ambas campañas muestra un gradiente creciente de contenido de humedad desde la zona interior hacia la zona exterior.

La comparación de los valores de contenido de humedad del sedimento de fondo para cada estación monitoreada en las campañas 1 a 5 del Proyecto FREPLATA-FFEM se presenta en la Figura 2.33. Se observan en general valores muy similares de contenido de humedad del sedimento de fondo entre las distintas campañas, lo que indica estabilidad de dicha característica. En algunos casos específicos se observan algunos datos con comportamientos diferentes a los obtenidos en las otras campañas, como el dato de la campaña 1 en la estación #22 o el de la campaña 3 en la #23, entre algún otro.

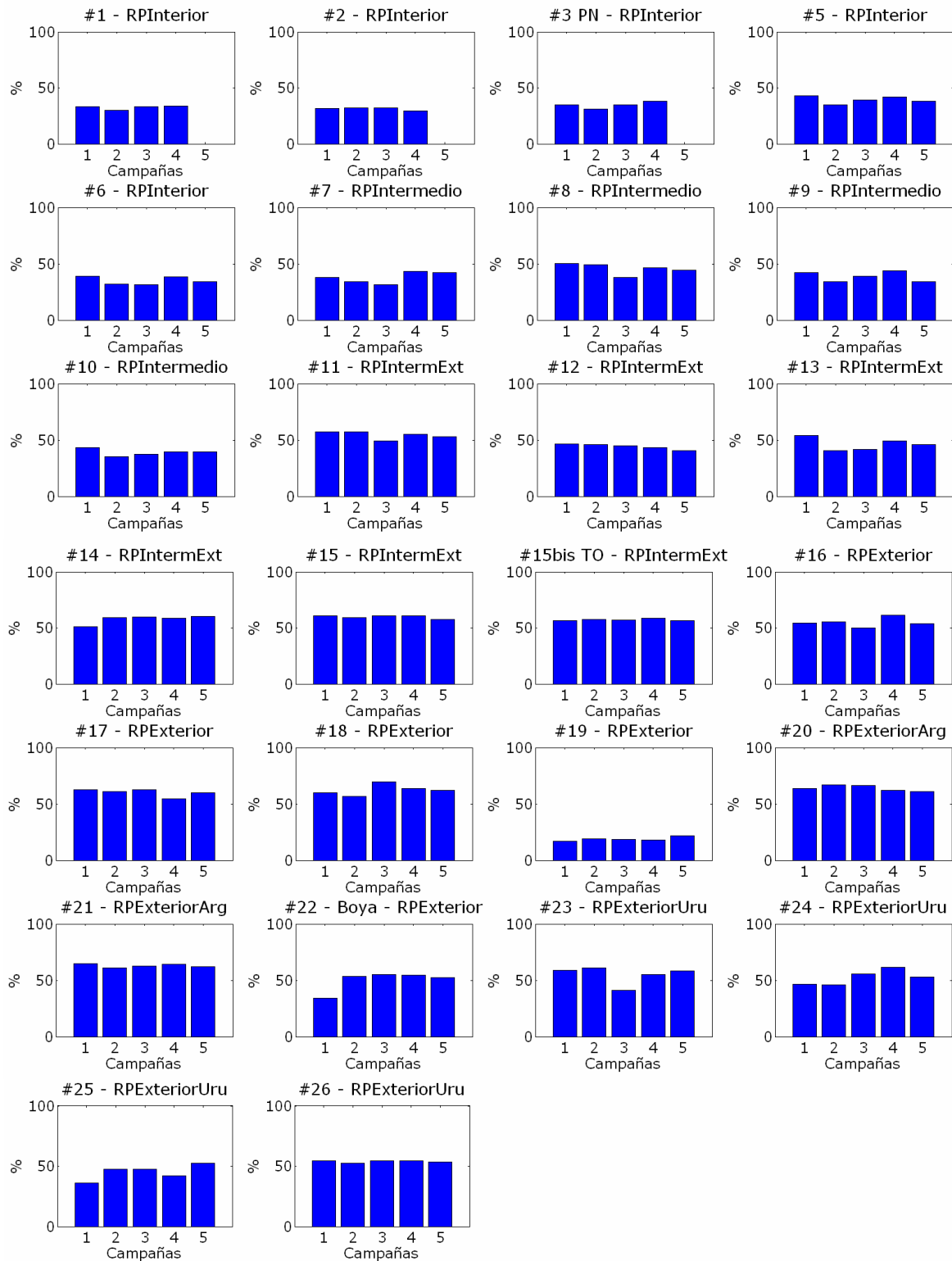


Figura 2.33: Contenido de humedad (%) del sedimento de fondo extraído en las estaciones monitoreadas durante las campañas 1 a 5.

2.5.2.3. Composición granulométrica

Para analizar la variabilidad espacial de la composición del sedimento de fondo se graficaron los valores en cada estación de monitoreo en un mapa del Río de la Plata para cada campaña. Se presenta a modo de ejemplo en la Figura 2.34 la variación espacial obtenida para los datos de la campaña 4.

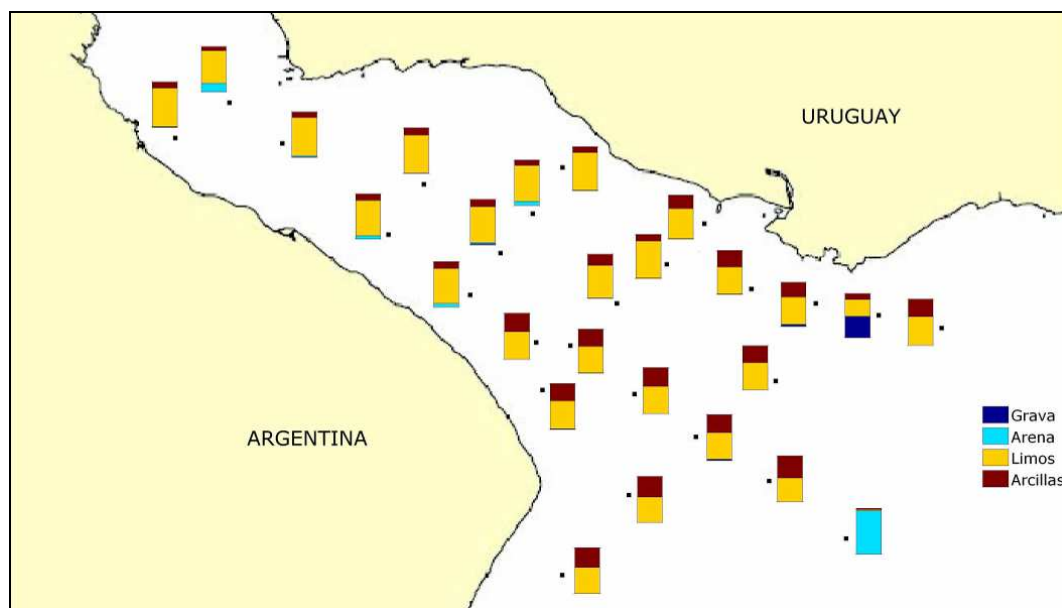


Figura 2.34: Distribución espacial de la composición granulométrica del sedimento de fondo recolectado durante la Campaña 4.

Para la campaña 1 se observa en las estaciones del interior del Río de la Plata predominan los limos con escasos porcentajes de arena y arcilla, entre 10 y 15 %. En la zona intermedia sobre Barra del Indio continúan predominando los limos, con porcentajes de arena casi nulos pero con un mayor porcentaje de arcilla, entre 20 y 40 %. En la zona exterior el fondo presenta una composición formada por porcentajes similares de limos y arcillas. Excepciones de este comportamiento se observan en la estación #22 de la Boya y en la estación #19 donde se observan grandes contenidos de arena, y en la estación #25 sobre la costa uruguaya donde predominan las gravas. Los valores correspondientes a la campaña 2 muestran diferencias de composición según las diversas zonas del Río de la Plata. Las estaciones interiores presentan alto contenido de limos con bajos porcentajes de arena y arcillas. Hacia la zona intermedia continua la predominancia del material limoso con aumento del porcentaje de arcilla y disminución del porcentaje de arena. En la zona exterior aumenta el porcentaje de material fino arcilloso, alcanzando valores del 40 %; se observan mayores proporciones de arcilla en las estaciones sobre la costa argentina que en las estaciones ubicadas sobre la costa uruguaya. La distribución espacial para la campaña 3 muestra una variabilidad en la composición similar a la mencionada para los datos de las campañas 1 y 2. El fondo está compuesto básicamente por limos y arcillas; en la zona interior predomina la fracción limo y en la zona intermedia y exterior las arcillas presentan porcentajes altos mayores a 30 %. Se observan arenas en la estación #19 exterior y gran porcentaje de grava en la estación #25 exterior ubicada sobre la costa uruguaya. El comportamiento observado para las campañas 4 y 5 es similar al descrito para las campañas anteriores.

La comparación de los valores de composición de sedimento de fondo para cada estación monitoreada en las campañas 1 a 5 se presenta en la Figura 2.35.

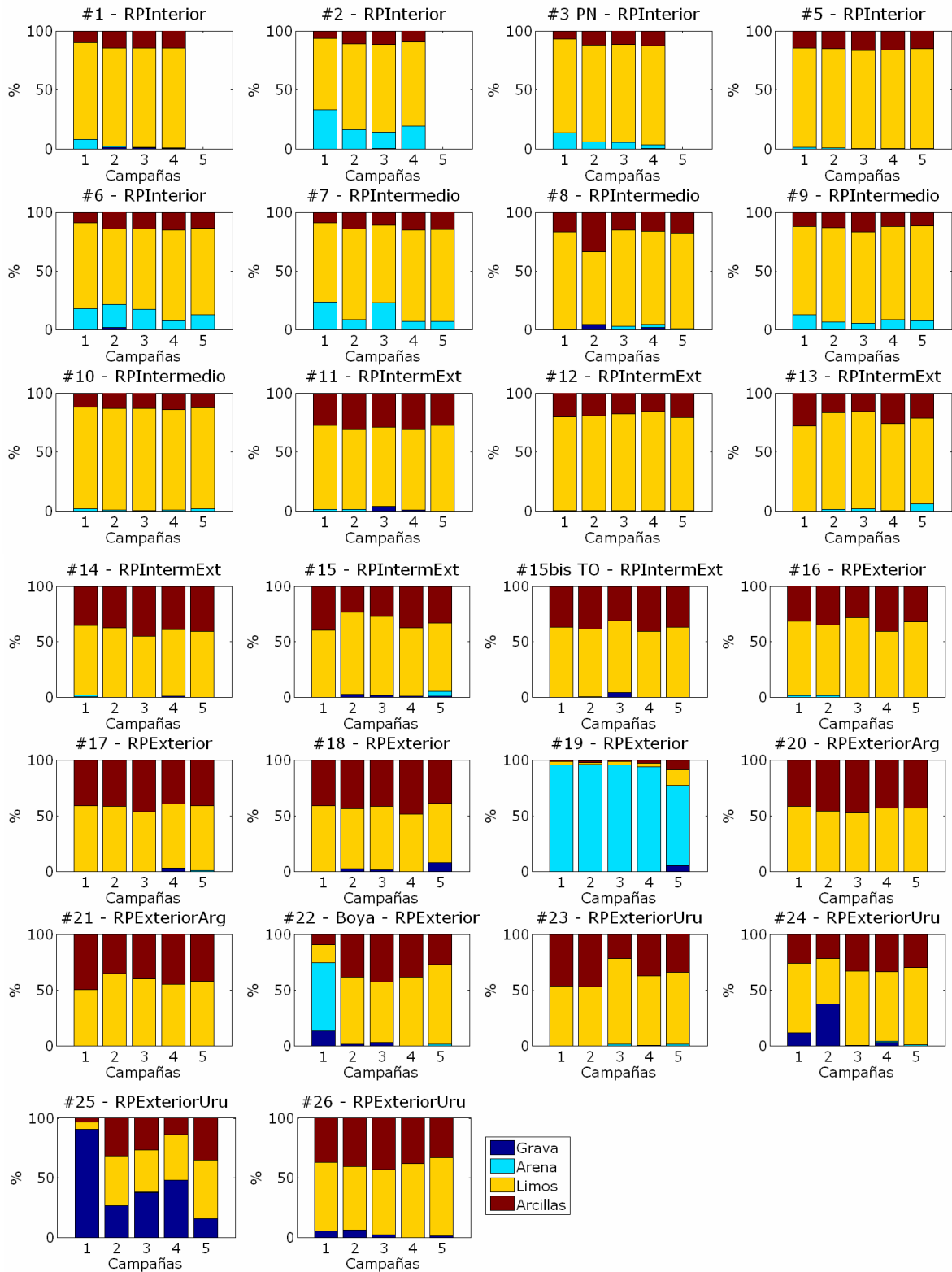


Figura 2.35: Composición del sedimento de fondo recolectado en las estaciones monitoreadas durante las campañas 1, 2, 3, 4 y 5.

Se observan en general resultados similares en la composición determinada en las diferentes campañas. En la estaciones interiores #1, #2 y #3 en la campaña 1 el porcentaje de arena identificado es mayor respecto a los resultados de las restantes campañas. En la estación #5 se observa una estabilidad en la composición identificada en todas las campañas. En las estaciones intermedias #6, #7, #8 y #9 hay diferencias

también en el porcentaje asociado a la fracción arena aunque la predominancia de limos se mantiene. En las estaciones intermedias #10 a #18 hay leves diferencias entre campañas en la fracción arcilla. En la estación #19 se observan arenas predominantemente en todas las campañas, con cierta variación en la campaña 5 donde el porcentaje de finos es levemente superior. En las estaciones exteriores sobre la costa argentina #20 y #21 se observa una estabilidad en la composición obtenida en las diferentes campañas, con porcentajes altos de la fracción más fina tipo arcilla. En la estación #22 se observan resultados diferentes en la campaña 1 con predominancia de la fracción arena, mientras que en las restantes campañas los resultados muestran un contenido formado por limo y arcillas. En las estaciones exteriores sobre la costa uruguaya #23 y #26 se observan resultados similares entre las campañas, mientras que en las estaciones #24 y #25 se observa una variación en la componente gruesa tipo grava.

2.5.2.4. Diagramas triangulares

La representación en los diagramas triangulares de la composición del sedimento (fracción sólida), obtenida para las muestras de sedimento de fondo del Río de la Plata para las campañas 1, 2, 3, 4 y 5 se presenta en la Figura 2.36. En los diagramas sólo es posible representar composiciones que no contengan material tipo grava. De un total de 127 muestras con datos incluyendo todas las campañas, 40 incluyen porcentaje de grava y deberían excluirse para hacer los diagramas. No obstante, de los 40 casos, en 30 el porcentaje de grava es bajo, menor a 5%. Para generar diagramas más representativos (con mayor cantidad de datos) se excluyen solamente los datos con porcentaje de grava mayor a 5%, despreciando el contenido de grava cuando el porcentaje asociado es menor.

Según el diagrama de Shepard, el sedimento de fondo del Río de la Plata se divide en cuatro clases: arena (4 % correspondiente a la estación exterior #19), limo arenoso (8 %, estaciones de la zona interior e intermedia), limo (33 %, estaciones de la zona intermedia) y limo arcilloso (55 %, estaciones de la zona exterior). Según la clasificación de Folk la mayor parte del material fino se clasifica como limo (45 %) seguido por material tipo barro (40 %). El resto del material corresponde a limo arenoso (10 %), y arena (3 %) y un valor correspondiente a arena barrosa. Según la clasificación de Flemming simplificada el material de fondo está compuesto principalmente por barro (75 %) y barro ligeramente arenoso (20 %), con algo de arena (3 datos), arena ligeramente barrosa (2 datos) y arena barrosa (1 dato). La clasificación más completa propuesta por Flemming indica que los sedimentos de fondo tipo barro (mud) del Río de la Plata son de 2 tipos diferentes, predominando el material limo arcilloso tipo E-III (53 %) seguido por el material tipo E-II limo ligeramente arcilloso (22 %). El resto del material se clasifica principalmente en tipo D-II (barro muy limoso ligeramente arenoso, 9 %), arena (2 %) y luego hay 4 casos aislados clasificados en diversas variaciones según el contenido de arena.

El material de fondo de cada estación de monitoreo se clasificó según los cuatro diagramas triangulares considerando los datos recolectados en todas las campañas. Esto es posible debido a la estabilidad en la composición obtenida entre las diferentes campañas. En los casos en que la clasificación no fuera la misma para las 5 campañas se seleccionó la clasificación que representa la mayor cantidad de datos en cada estación. En la Tabla 2.5 se presenta la clasificación final obtenida según los 4 diagramas triangulares utilizados. Entre paréntesis se especifica el número de datos asociados a la clasificación final y en la segunda columna se presenta la cantidad total de datos para cada estación. Para poder incluir en este análisis la estación #25, para la cual el porcentaje de grava es alto para los datos de las 5 campañas, se realizó la clasificación del material fino calculando los porcentajes de forma proporcional a los originales.

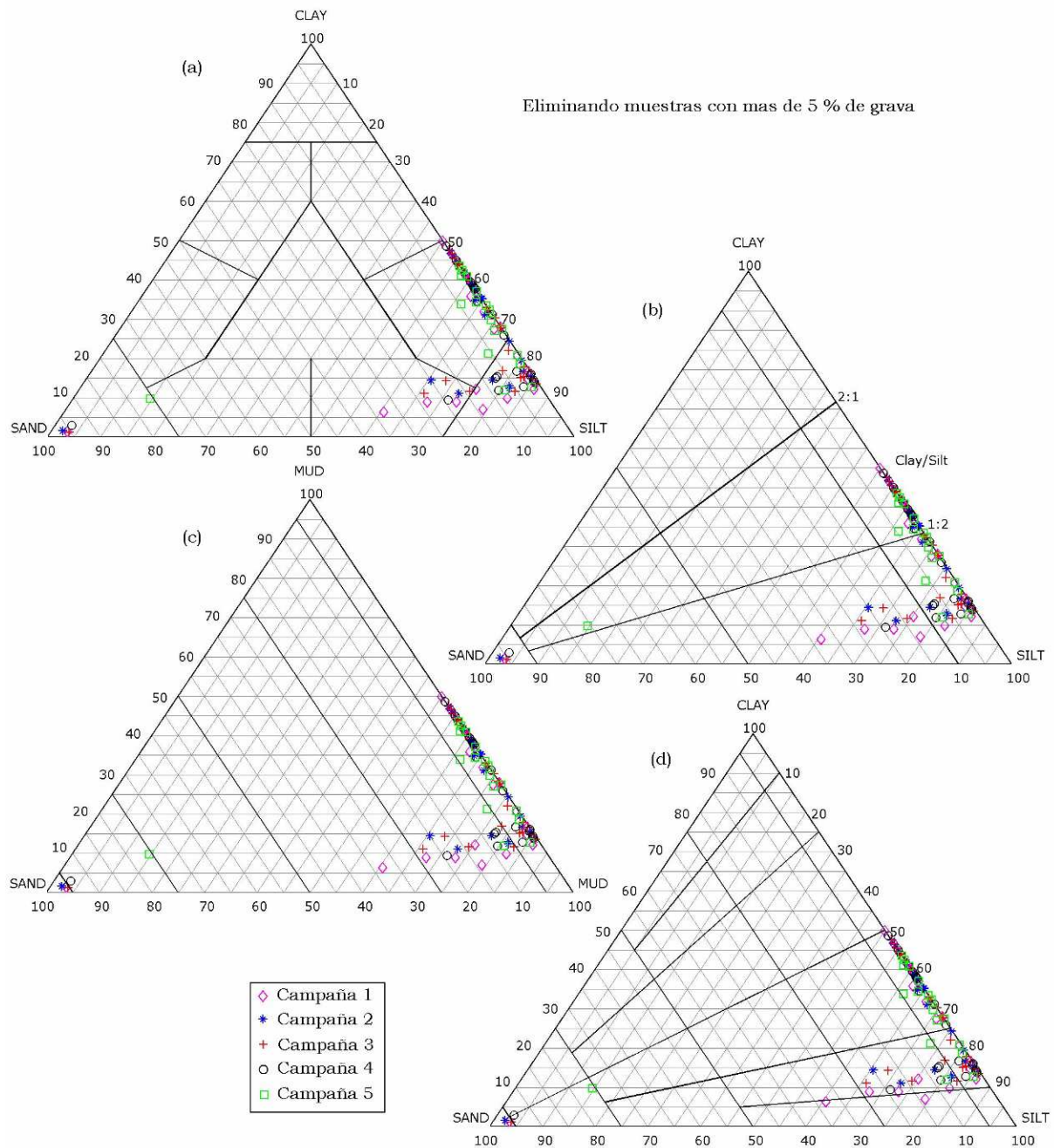


Figura 2.36: Diagramas triangulares de composición de sedimento obtenidos para el sedimento de fondo en las campañas 1, 2, 3, 4 y 5: (a) Shepard, (b) Folk, (c) Flemming I y (d) Flemming II.

Los resultados muestran que hay variaciones en la clasificación de ciertas estaciones en función de los diagramas utilizados. Esto afecta la zonalidad o variación espacial de los tipos de sedimento de fondo. Por ejemplo, las estaciones #2 y #3 (ubicadas muy cerca en el interior del Río de la Plata) según los diagramas de Shepard y Folk son de dos tipos de sedimento diferente, mientras que según los diagramas de Flemming el tipo de material se mantiene. Algo similar se observa para las estaciones #6 y #7 ubicadas en la zona intermedia sobre la costa argentina. Cada una de las clasificaciones obtenidas del sedimento de fondo se representó espacialmente en un mapa del Río de la Plata según la ubicación de cada estación de monitoreo (Figura 2.37).

ESTACIÓN	N° datos	SHEPARD	FOLK	FLEMMING I	FLEMMING II
#1	4	limo (4)	limo (4)	barro (3)	limo ligeramente arcilloso (3)
#2	4	limo arenoso (4)	limo arenoso (4)	barro ligeramente arenoso (3)	barro muy limoso ligeramente arenoso (3)
#3	4	limo (4)	limo (3)	barro ligeramente arenoso (3)	barro muy limoso ligeramente arenoso (2)
#5	5	limo (5)	limo (5)	barro (5)	limo ligeramente arcilloso (5)
#6	5	limo arenoso (3)	limo arenoso (4)	barro ligeramente arenoso (5)	barro muy limoso ligeramente arenoso (5)
#7	5	limo (3)	limo (3)	barro ligeramente arenoso (5)	barro muy limoso ligeramente arenoso (5)
#8	5	limo (4)	limo (4)	barro (5)	limo ligeramente arcilloso (4)
#9	5	limo (5)	limo (4)	barro ligeramente arenoso (5)	barro muy limoso ligeramente arenoso (5)
#10	5	limo (5)	limo (5)	barro (5)	limo ligeramente arcilloso (5)
#11	5	limo arcilloso (5)	limo (5)	barro (5)	limo arcilloso (5)
#12	5	limo (5)	limo (5)	barro (5)	limo ligeramente arcilloso (5)
#13	5	limo arcilloso (3)	limo (5)	barro (4)	limo ligeramente arcilloso (3)
#14	5	limo arcilloso (5)	barro (5)	barro (5)	limo arcilloso (5)
#15	5	limo arcilloso (4)	barro(3)	barro (5)	limo arcilloso (4)
#15bis	5	limo arcilloso (5)	barro (4)	barro (5)	limo arcilloso (5)
#16	5	limo arcilloso (5)	barro (3)	barro (5)	limo arcilloso (5)
#17	5	limo arcilloso (5)	barro (5)	barro (5)	limo arcilloso (5)
#18	4	limo arcilloso (4)	barro (4)	barro (4)	limo arcilloso (4)
#19	5	arena (5)	arena (4)	arena (3)	arena (3)
#20	5	limo arcilloso (5)	barro (5)	barro (5)	limo arcilloso (5)
#21	5	limo arcilloso (5)	barro (5)	barro (5)	limo arcilloso (5)
#22	4	limo arcilloso (4)	barro (3)	barro (4)	limo arcilloso (4)
#23	5	limo arcilloso (4)	barro (4)	barro (5)	limo arcilloso (4)
#24	3	limo arcilloso (3)	limo (2)	barro (3)	limo arcilloso (3)
#25	4	limo arcilloso (4)	barro (3)	barro (4)	limo arcilloso (4)
#26	4	limo arcilloso (4)	barro (4)	barro (4)	limo arcilloso (4)

Tabla 2.5: Clasificación del sedimento de fondo de las estaciones de monitoreo del Río de la Plata según los diagramas triangulares de Shepard, Folk, Flemming I, y Flemming II.

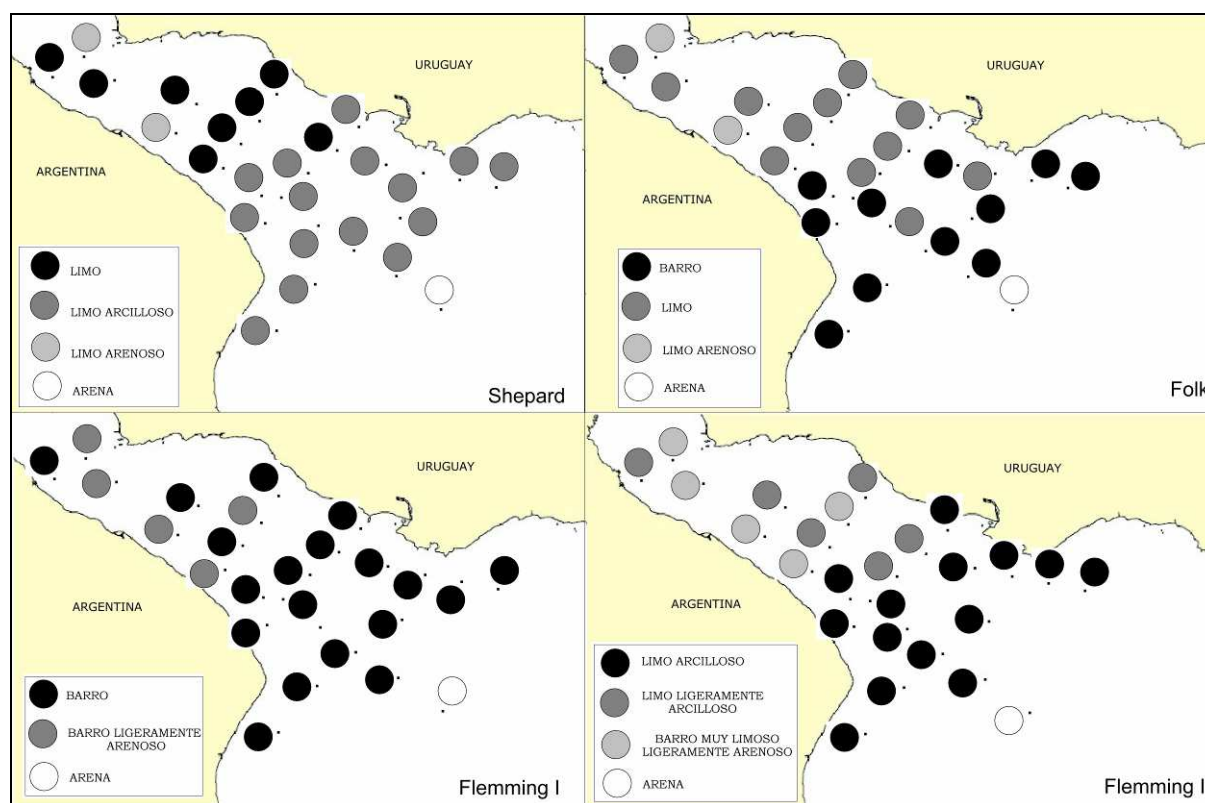


Figura 2.37: Clasificación del sedimento de fondo del Río de la Plata según los diagramas triangulares de Shepard (panel superior izquierdo), Folk (panel superior derecho), Flemming I (panel inferior izquierdo) y Flemming II (panel inferior derecho), utilizando los datos del Proyecto FREPLATA-FFEM.

2.5.2.5. Correlaciones

Se analizó la correlación entre las diversas componentes del sedimento de fondo para su clasificación. Por un lado se calculó la correlación entre el contenido de materia orgánica y el porcentaje de cada fracción de finos (arcilla y limo) para el sedimento de fondo de cada estación para cada campaña. Por otra parte se determinó la correlación entre el contenido de agua y el porcentaje de cada fracción de finos (arcilla y limo) para el sedimento de fondo de cada estación para cada campaña. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.6. Se observa una correlación relativamente alta entre el contenido de arcilla y el contenido de materia orgánica, mientras que no hay correlación entre el contenido de limo y el contenido de materia orgánica. Esto indica una relación directa entre la fracción más fina, arcilla, y la materia orgánica en el Río de la Plata. Según Winterwerp and Kesteren (2004) esta correlación indica que el suelo estaría dominado por la componente mineral. Por otro lado se observa una correlación alta entre el contenido de agua del sedimento de fondo y la fracción arcilla (no así con la fracción limo), lo que indicaría una dependencia de los procesos que ocurren en el sedimento de fondo (consolidación) con la proporción de material arcilloso.

	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4	Campaña 5
Materia orgánica / Arcilla	0.49	0.79	0.83	0.89	0.92
Contenido Agua / Arcilla	0.93	0.92	0.93	0.93	0.93
Materia orgánica / Limo	0.02	-0.01	-0.27	-0.10	0.39
Contenido Agua / Limo	0.03	-0.09	-0.10	-0.01	0.69

Tabla 2.6: Coeficientes de correlación utilizando la información de todas las estaciones para cada campaña.

2.5.2.6. Síntesis

La información de muestras de sedimento de fondo del Río de la Plata analizada incluye distribución granulométrica, contenido de materia orgánica y contenido de humedad. Se observó una variación de las características del sedimento de fondo en la zona, principalmente entre la zona interior e intermedia del Río de la Plata, y la zona exterior. Por un lado en las estaciones monitoreadas de la zona interior y las de la zona intermedia cercanas a la misma, se observa un sedimento de fondo predominantemente limoso con porcentajes bajos de arena y de arcillas; con un contenido de agua entre 30 % y 40%, y bajo contenido de materia orgánica. Para las estaciones ubicadas sobre la zona intermedia y hacia la zona de Barra del Indio en el límite con la zona exterior los datos muestran material fino sin contenido de arena, con predominancia de limos pero valores mayores de arcillas respecto a la zona interior. El contenido de agua aumenta y también el contenido de materia orgánica. Finalmente en la zona exterior central y sobre la costa argentina (exceptuando la estación #19 que no contiene sedimentos finos sino arenas) los sedimentos de fondo están compuestos por porcentajes muy similares de limo y arcilla, con porcentajes altos de contenido de agua, mayores a 60%, y con contenido de materia orgánica (más del 5 %).

Considerando las argumentaciones presentadas por Flemming (Flemming, 2000), en relación a que el diagrama más complejo definido con su nombre es más adecuado para representar la variabilidad textural encontrada en medios marinos frente a los tradicionales de Shepard y Folk, se utiliza dicha clasificación para caracterizar la variación espacial de los sedimentos de fondo del Río de la Plata. Se observa en la zona interior predomina el material fino con contenido de arena (barro muy limoso ligeramente arenoso), luego se observa una variación sobre la costa uruguaya en la zona intermedia con un aumento del contenido de finos y disminución de arena, encontrándose principalmente material tipo limo ligeramente arcilloso, y finalmente

sobre la zona intermedia hacia el límite con la zona exterior y en la zona exterior, el fondo está compuesto de barros del tipo limo arcilloso.

Se encontró una relación entre el contenido de arcilla de las muestras de fondo con el contenido de materia orgánica y el contenido de agua de las mismas. Esto muestra una influencia de la proporción del material más fino cohesivo en procesos biológicos y en procesos de consolidación del material de fondo en el Río de la Plata.

2.5.3. Perfiles verticales

En este punto se presenta el análisis de los perfiles verticales de salinidad y turbidez en la columna de agua medidos con el equipo CTD en las estaciones de monitoreo durante las campañas de medición 2, 3, 4 y 5 del Proyecto FREPLATA-FFEM. Para cada una de estas campañas se extrajo la información de salinidad y de turbidez del CTD de los informes de campaña del SHN. Las mediciones fueron realizadas con una resolución vertical de 0,25 dB de presión de columna de agua. Los perfiles medidos se graficaron y analizaron por estación y en conjunto (análisis espacial). Además, se realizó un análisis de la variabilidad de los perfiles medidos por estación a lo largo de las distintas campañas. Por otro lado, se exploró la posibilidad de obtener la relación turbidez en NTU y concentración de sedimento en suspensión en mg/l por campaña para obtener los perfiles de concentración a partir de los perfiles CTD medidos. La información recolectada en la campaña 1 no se incluye en el análisis pues la misma fue recolectada con otro equipo CTD y además no es posible utilizar la información de concentración de sedimento en suspensión como se mencionó anteriormente. Respecto a la campaña 6 a pesar de contar con la información del CTD no se cuenta con los datos de concentración de sedimento en suspensión por lo que no se incluye tampoco en este análisis dicha información.

Una vez analizados los perfiles medidos de turbidez y salinidad en las campañas 2 a 5 se estudió el grado de correlación entre los mismos en las diferentes estaciones monitoreadas. De esta manera se intenta determinar, en base a las mediciones, el grado de dependencia del sedimento en suspensión en la columna de agua con el campo salino en la misma. Este análisis se realiza solamente en las estaciones ubicadas en la zona de exterior del Río de la Plata donde la salinidad presenta valores no nulos.

2.5.3.1. Turbidez

Se extrajo de los informes publicados por el SHN correspondientes a las campañas 2 (SHN, 2010b), 3 (SHN, 2010c), 4 (SHN, 2011a) y 5 (SHN, 2011b), para su depuración y análisis, la información de los perfiles de turbidez recolectada por el CTD en cada estación de monitoreo. A grandes rasgos los datos medidos muestran perfiles homogéneos en general en las estaciones interiores mientras que en la zona intermedia y sobre la costa uruguaya se observa una mayor variación de la turbidez en la dirección vertical.

2.5.3.1.1. Ajuste relación turbidez/concentración

Se exploró y determinó un ajuste de la relación entre turbidez del CTD y concentración de sedimento en suspensión por campaña de medición. Se utilizó el dato de turbidez del CTD medido correspondiente a la profundidad de extracción de la muestra de agua extraída en la misma estación y en la misma campaña, para la cual se cuenta con el dato de concentración de sedimento en suspensión. El ajuste lineal de los datos determina la relación turbidez/concentración de sedimento en suspensión del equipo para la campaña a partir de la cual pueden obtenerse los perfiles de concentración. Se evaluaron diversos ajustes lineales considerando distinta combinación de datos. Por un lado debido a la dependencia de las calibraciones de los equipos de turbidez con la composición de sedimento se analizó la dependencia del ajuste con la composición del

material en suspensión utilizando la información de composición granulométrica analizada en las secciones anteriores. Además, se analizó la variación de la calidad del ajuste con la profundidad de extracción de las muestras de agua, es decir, a profundidad media o sobre el fondo. El ajuste seleccionado para cada caso considera la calidad además de la cantidad de información utilizada.

Los diversos ajustes evaluados para los datos de la campaña 2 se presentan en la Figura 2.38. Se observa que utilizando todos los datos se obtiene un ajuste lineal de buena calidad. Por otro lado se observa hay una diferenciación del ajuste al dividir las muestras según la profundidad de extracción. La división del ajuste según el material predominante en la muestra de suspensión (arcilla, limo o mezcla definido con un rango de variación de ambos de entre 45 % y 55 %) no permitió encontrar una mejor relación que la obtenida anteriormente, lo que indica que no hay una dependencia con la composición. El mejor ajuste se obtiene utilizando solamente las muestras de profundidad media. No obstante utilizar dicha formulación para calcular los perfiles de concentración subestimaría un poco las concentraciones de fondo. Por tanto, como el ajuste obtenido utilizando todas las muestras es de calidad aceptable, se decide para esta campaña utilizar el ajuste obtenido considerando todos los datos.

Los diversos ajustes evaluados para los datos de la campaña 3 se presentan en la Figura 2.39. Se observa el ajuste lineal obtenido con todos los datos representa muy bien la relación entre las series de turbidez del CTD y la concentración del sedimento en suspensión determinada en laboratorio. La división de los datos según la profundidad de extracción (entre profundidad media y sobre el fondo) no presenta ajustes lineales muy diferentes aunque mejora la calidad de los mismos. Se analizó también si el ajuste mejora dividiendo las estaciones según la composición del material. Los resultados muestran en general un buen ajuste según los tres materiales pero el único que supera la calidad obtenida en el ajuste global es el correspondiente al material tipo mezcla. Como el ajuste obtenido utilizando todas las muestras es de calidad aceptable se decide para esta campaña utilizar el ajuste obtenido considerando todos los datos.

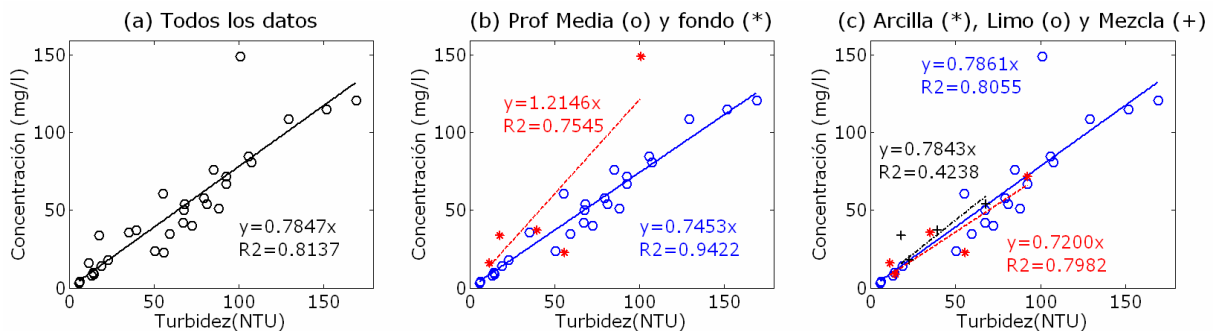


Figura 2.38: Ajustes lineales de los datos de la campaña 2 de turbidez del CTD y concentración de sedimento en suspensión, obtenidos considerando (a) todos los datos, (b) dividiendo según la profundidad de la muestra y (c) dividiendo según la composición del material en suspensión.

Los diversos ajustes evaluados para los datos de la campaña 4 se presentan en la Figura 2.40. En los gráficos (a), (b), y (c) se presentan los ajustes según las divisiones mencionadas considerando todos los datos. En los gráficos (d), (e) y (f) se presentan los mismos ajustes pero eliminando el dato de comportamiento muy diferente al resto que se observa en los primeros gráficos. Se observa en este caso el ajuste obtenido con todos los datos no es de buena calidad (incluso al eliminar el dato erróneo). La división por profundidad de la muestra de sedimento en suspensión muestra un ajuste de calidad aceptable para la información de profundidad media y un comportamiento de las muestras de fondo muy alejado de una aproximación lineal. La división en composición

de material no genera mejores ajustes para los datos de composición tipo arcilla y limo (solo se cuenta con dos datos de composición tipo mezcla). Considerando estos resultados se selecciona para los datos de la campaña 4 el ajuste correspondiente a las muestras de profundidad media sin el dato extremo.

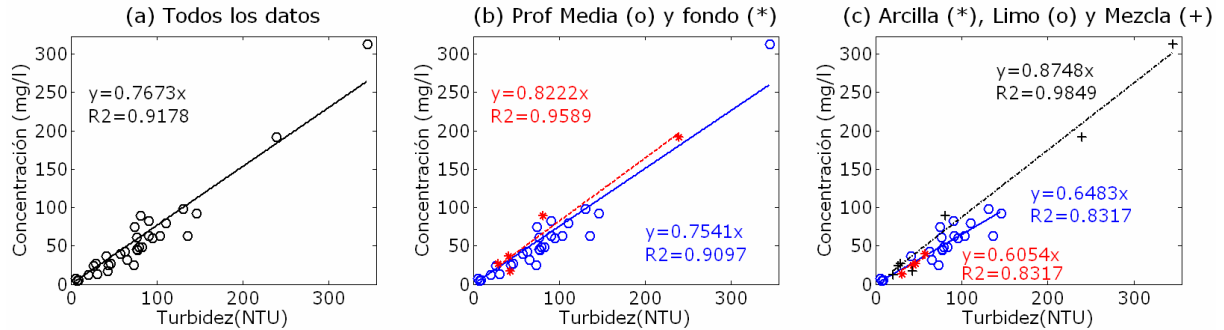


Figura 2.39: Ajustes lineales de los datos de la campaña 3 de turbidez del CTD y concentración de sedimento en suspensión, obtenidos considerando (a) todos los datos, (b) dividiendo según la profundidad de la muestra y (c) dividiendo según la composición del material en suspensión.

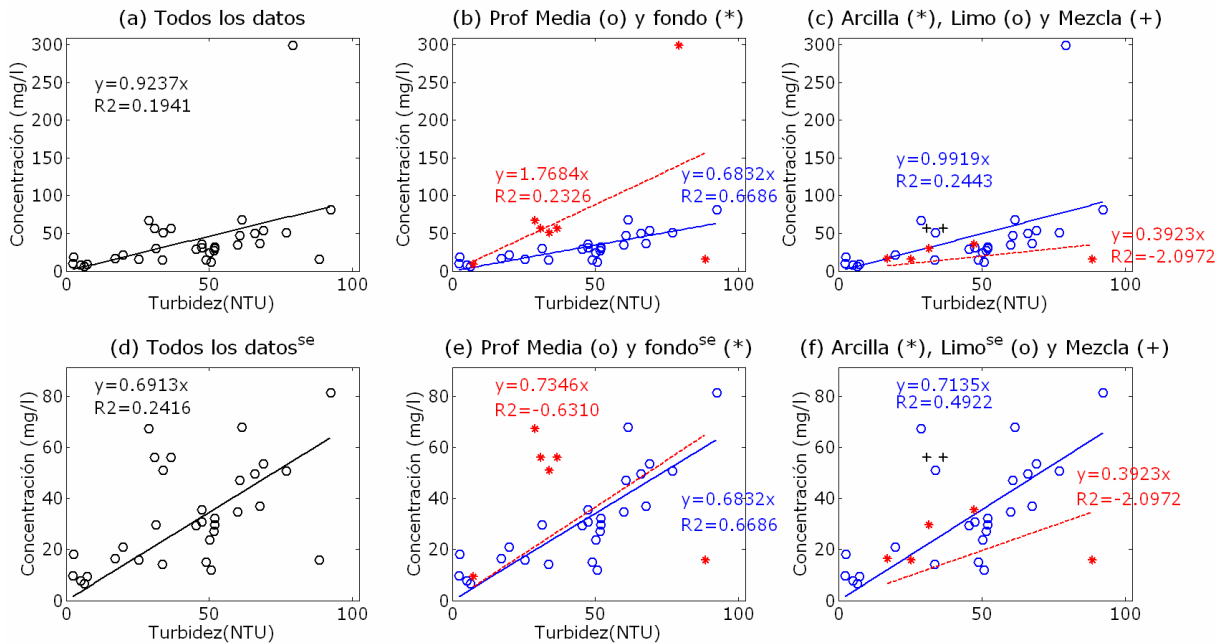


Figura 2.40: Ajustes lineales de los datos de la campaña 4 de turbidez del CTD y concentración de sedimento en suspensión, obtenidos considerando (a) todos los datos, (b) dividiendo según la profundidad de la muestra, (c) dividiendo según la composición del material en suspensión, (d) todos los datos sin el dato extremo, (e) dividiendo según la profundidad de la muestra sin el dato extremo y (f) dividiendo según la composición del material en suspensión sin el dato extremo.

Los diversos ajustes evaluados para los datos de la campaña 5 se presentan en la Figura 2.41. Se observa para los datos de esta campaña la representatividad del ajuste lineal utilizando todos los datos es aceptable. Al dividir los datos según la profundidad de extracción se obtiene que la calidad del ajuste obtenido para los datos de profundidad media (correspondiente al ajuste de todos los datos sin los 3 que corresponden al fondo de la columna de agua) mejora. Por último la división según la composición de materiales en este caso solamente permite analizar el ajuste para el material tipo limo, ya que para los restantes datos no hay información de composición disponible. Considerando estos

resultados se selecciona para los datos de la campaña 5 el ajuste obtenido con las muestras de profundidad media.

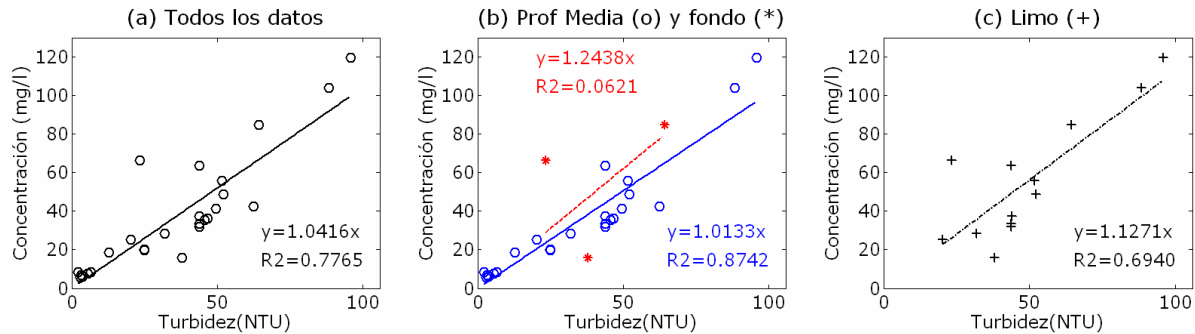


Figura 2.41: Ajustes lineales de los datos de la campaña 5 de turbidez del CTD y concentración de sedimento en suspensión, obtenidos considerando (a) todos los datos, (b) dividiendo según la profundidad de la muestra y (c) dividiendo según la composición del material en suspensión.

2.5.3.1.2. Análisis espacial

Utilizando las curvas de calibración turbidez/concentración de sedimento obtenidas se calculó en cada estación el perfil de concentración de sedimento en suspensión en cada campaña. Esta información se analizó a partir de un análisis de variación espacial y temporal. A partir de esta información se generaron mapas de los perfiles de concentración de sedimento para cada una de las campañas de medición que se utilizan para el análisis de la variabilidad espacial de los perfiles. A modo de ejemplo se presenta en la Figura 2.42 los resultados obtenidos para la información de turbidez medida con el CTD en la campaña 4.

Los perfiles de concentración obtenidos a partir de las medidas de turbidez de la campaña 2 muestran concentraciones del entorno de entre 50 y 80 mg/l en la zona interior e intermedia del Río de la Plata con perfiles homogéneos en la vertical. En las estaciones intermedias cercanas a Barra del Indio sobre la costa argentina la concentración es mayor y se superan los 100 mg/l con valores levemente mayores sobre el fondo de la columna de agua. En las estaciones exteriores las concentraciones nuevamente decrecen pero permanecen los valores mayores sobre el fondo con estratificación marcada en la dirección vertical. Los perfiles de concentración de la campaña 3 muestran perfiles homogéneos en la zona interior con concentraciones del orden de 50 mg/l. Los perfiles en la zona intermedia contra la Barra del Indio muestran concentraciones mayores del orden de 100 mg/l con leve variabilidad en la dirección vertical. En las estaciones exteriores se observan perfiles con estratificación en concentración con mayores valores sobre el fondo. Los mayores valores se registraron en esta campaña en la estación #20 exterior ubicada sobre la costa argentina con 500 mg/l en el fondo.

Los perfiles de concentración de sedimento en suspensión de la campaña 4 muestran perfiles homogéneos en la zona interior y perfiles con estratificación vertical con mayor concentración en el fondo en la zona exterior (Figura 2.42). En la zona interior las concentraciones son del orden de 30 - 40 mg/l y se observa un aumento hacia la zona intermedia sobre Barra del Indio con valores cercanos a 60 mg/l. Los valores de concentración de fondo son mayores en la zona exterior sobre la costa argentina superando en varios casos el valor de 100 mg/l. Los perfiles de concentración de sedimento en suspensión de la campaña 5 muestran nuevamente perfiles homogéneos en la región intermedia del Río de la Plata (no se cuenta en esta campaña con información de las estaciones interiores #1, #2 y #3) con valores del entorno de 50 mg/l. En las

estaciones sobre la costa argentina se observan concentraciones de casi 100 mg/l (estaciones #7 y #15). En la zona exterior se observan bajos valores de concentración en la columna de agua menores a 50 mg/l valores mayores en fondo que superan los 50 mg/l y en las estaciones #20 y #16 los 100 mg/l.

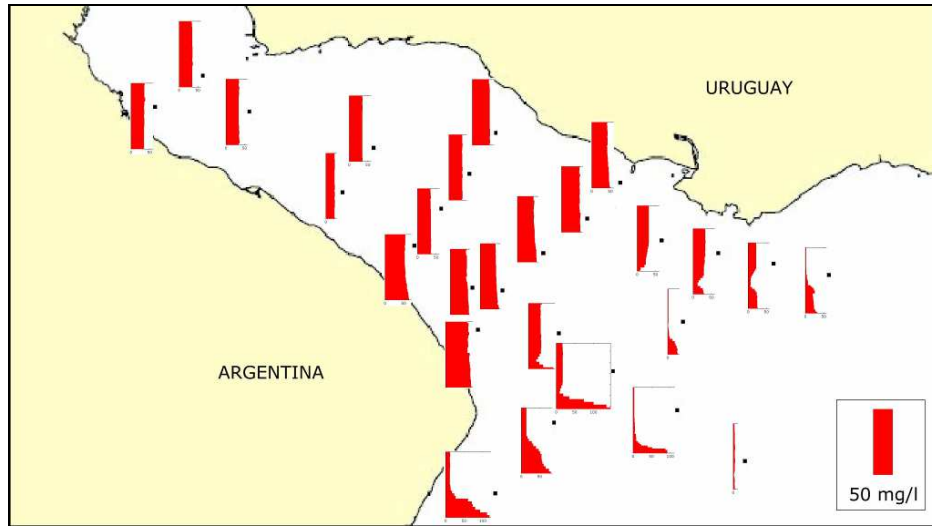


Figura 2.42: Distribución espacial de los perfiles de concentración de sedimento en suspensión obtenida a partir de los perfiles de turbidez medidos con el CTD. Campaña 4.

2.5.3.1.3. Análisis temporal

La comparación de los perfiles de concentración de sedimento en suspensión calculados a partir de los datos de turbidez del CTD para cada estación monitoreada en las campañas 2 a 5 del Proyecto FREPLATA-FFEM se presenta en la Figura 2.43.

Se observa en todas las estaciones hay variaciones de los valores de concentración de sedimento en suspensión registrados entre campañas. No obstante en general la forma predominante del perfil se mantiene. En las estaciones interiores #1, #2 y #3 los valores de concentración entre las campañas varían entre 30 y 80 mg/l aproximadamente. En las estaciones interiores #5 y #6 las concentraciones también son bajas entre 20 y 70 mg/l. En la estación intermedia #7 ubicada sobre la costa argentina los perfiles muestran concentraciones un poco mayores entre 50 y 100 mg/l mientras que en las estaciones ubicadas en la misma transecta (#8, #9 y #10) las concentraciones son más bajas entre 30 y 70 mg/l. En las estaciones #10 y #11 ubicadas en la región intermedia sobre la costa uruguaya se observa una baja variabilidad temporal con perfiles homogéneos con concentraciones entre 40 y 60 mg/l medidos en las cuatro campañas. En las estaciones intermedias #12, #13 y #14 se observan concentraciones levemente mayores de hasta 80 mg/l, y en la estación cercana #15bis concentraciones de hasta 100 mg/l. En la estación #15 ubicada en la misma transecta sobre la costa argentina se observan concentraciones mayores a las mencionadas, superándose en 3 de cuatro campañas los 100 mg/l. En estas últimas dos estaciones mencionadas se visualiza una variabilidad en la dirección vertical con mayores concentraciones en el fondo. En la estación #16 se observa una variabilidad en la forma de los perfiles medidos; en las campañas 2 y 3 se registró un perfil homogéneo con concentraciones mayores a 100 mg/l mientras que en las campañas 4 y 5 se registró un perfil marcado de concentración con valores menores a 40 mg/l en la mayor parte de la columna de agua con concentraciones dos veces más grandes sobre el fondo. En las estaciones exteriores #17, #18 y #19 todas las campañas muestran un perfil de concentración variable con mayores concentraciones en el fondo. Las concentraciones disminuyen a medida que la estación se ubica más hacia

el exterior (en la estación #19 los valores son menores a 10 mg/l mientras que en la estación #17 se registran valores mayores a 100 mg/l sobre el fondo).

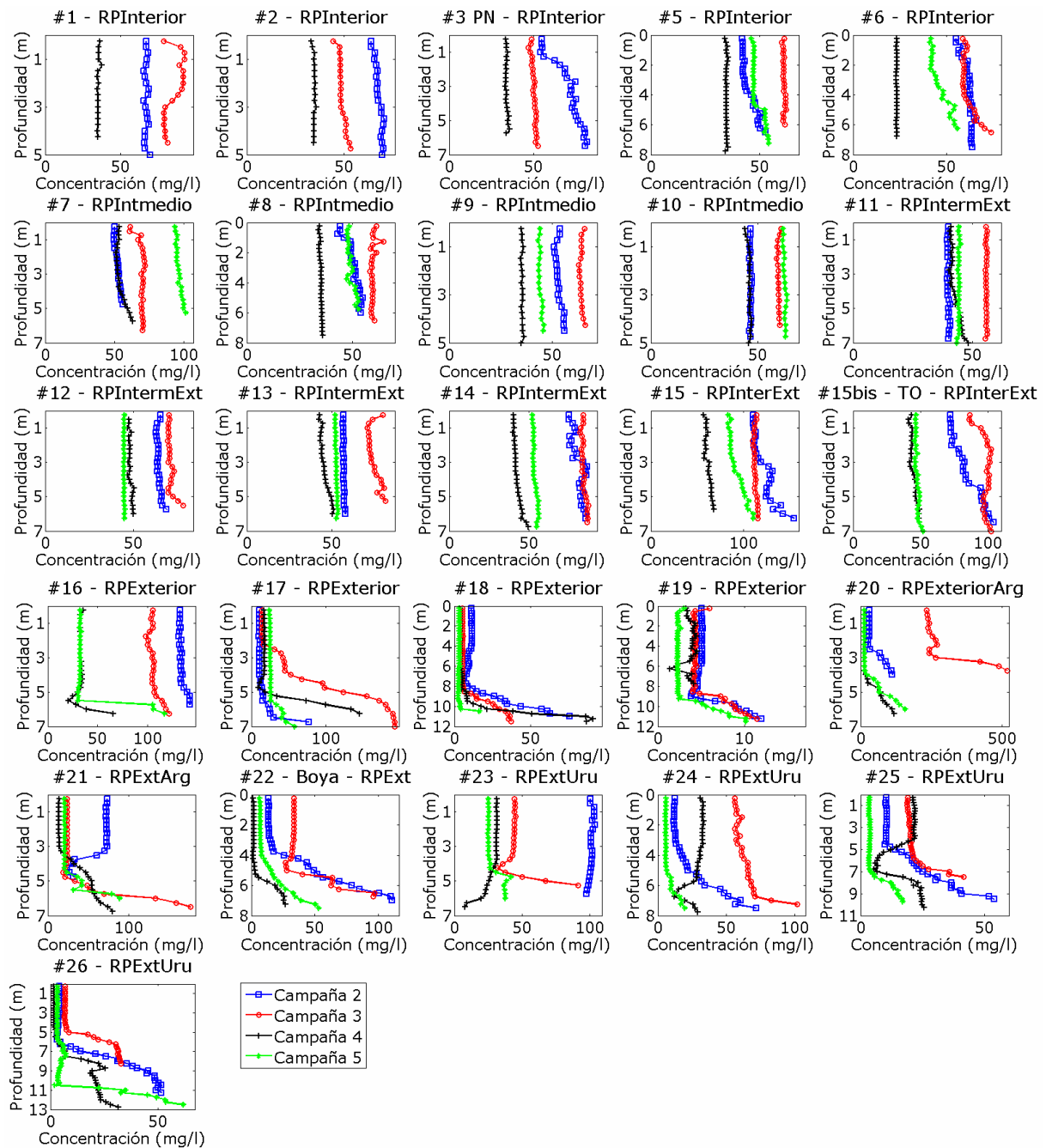


Figura 2.43: Perfiles de concentración de sedimento en suspensión obtenidos a partir de las mediciones de turbidez del CTD en las estaciones monitoreadas durante las campañas 2 a 5.

En la estación exterior #20 ubicada sobre la costa argentina la información de la campaña 3 es considerablemente distinta a la registrada en las otras campañas. No obstante en todas se observa una variación de la concentración en la vertical. En las estaciones exteriores #21 y #22 las medidas de las campañas presentan cierta variabilidad pero se observa un perfil vertical marcado con una concentración sobre el fondo igual a aproximadamente dos veces la concentración en la columna de agua. En las estaciones exteriores ubicadas sobre la costa uruguaya #23, #24, #25 y #26 los perfiles medidos en las diferentes campañas muestran una variabilidad de la concentración en la

dirección vertical y una disminución de la concentración a medida que la estación se ubica más hacia el exterior (en las dos primeras estaciones los valores alcanzan los 100 mg/l mientras que en las dos últimas los registros no superan los 50 mg/l).

2.5.3.2. Salinidad

Se extrajo de los informes publicados por el SHN correspondientes a las campañas 2 (SHN, 2010b), 3 (SHN, 2010c), 4 (SHN, 2011a) y 5 (SHN, 2011b), para su depuración y análisis, la información de los perfiles de salinidad recolectada por el CTD en cada estación de monitoreo. En las estaciones interiores e intermedias (#1 a #15bis) los valores registrados fueron nulos en todas las campañas.

2.5.3.2.1. Análisis espacial

Con el objetivo de realizar un análisis de la variabilidad espacial de los perfiles de salinidad se generaron los mapas ubicando la información medida por estación de medición. A modo de ejemplo se presenta en la Figura 2.44 los resultados obtenidos para la información de salinidad medida con el CTD en la campaña 4.

Los perfiles de salinidad medidos en la campaña 2 (marzo 2010) muestran algunos perfiles homogéneos, en las estaciones #22, #23 y #24 ubicadas sobre la zona exterior central y costa uruguaya hacia la zona intermedia. En las restantes estaciones, tanto las ubicadas sobre la costa uruguaya hacia el exterior (#25 y #26) como las ubicadas sobre la zona central hacia el Sur y costa argentina (#16 a #21) se observa un nivel de estratificación en salinidad, con una diferencia de hasta 10 ppm. Respecto a los valores de salinidad hay un aumento de la misma a medida que las estaciones son más exteriores. En la estación #26 la salinidad de fondo supera los 20 ppm y en la estación #19 se alcanzan los 18 ppm. En síntesis durante esta campaña se observa un campo salino estratificado. Los perfiles de la campaña 3 muestran un comportamiento diferente al descrito anteriormente. En las estaciones exteriores ubicadas en la zona central hacia el Sur y costa argentina se observan valores de más de 10 ppm con perfiles homogéneos en la dirección vertical. También los perfiles de las estaciones exteriores de la costa uruguaya muestran poca estratificación o mezcla en la dirección vertical con valores que alcanzan los 20 ppm. Las estaciones ubicadas cerca de Barra del Indio muestran en cambio una leve estratificación con mayores salinidades en el fondo.

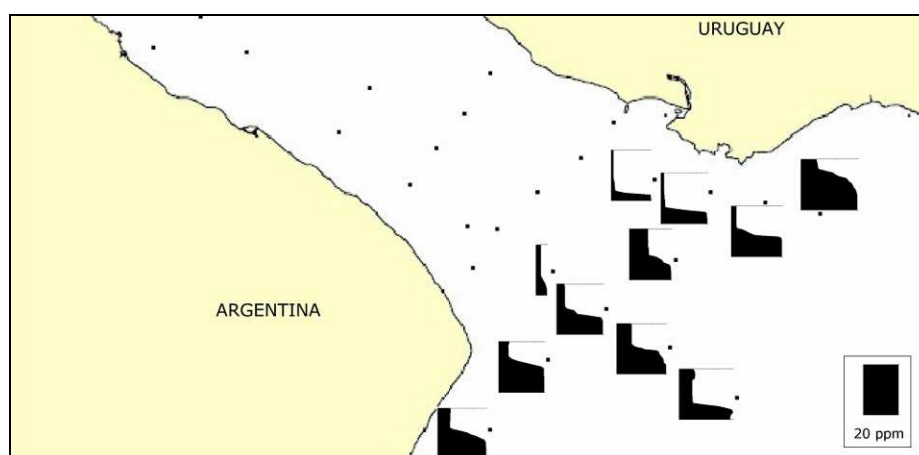


Figura 2.44: Distribución espacial de los perfiles de salinidad medidos con el CTD. Campaña 4.

Los perfiles de la campaña 4 (Figura 2.44) muestran un alto nivel de estratificación vertical de la salinidad en todas las estaciones del Río de la Plata exterior. Sobre la transecta formada por las estaciones #16 a #19 en la zona central se observa una fuerte estratificación de más de 10 ppm con un muy leve aumento de la salinidad de

fondo, lo que indica una estabilidad del campo salino. En la transecta formada por las estaciones de la costa uruguaya (#23 a #26) se observa también una estratificación marcada con diferencias de más de 15 ppm entre fondo y superficie y también con poca variación de los valores de fondo entre las estaciones. Por último los perfiles registrados en la campaña 5 muestran muy poca estratificación y por tanto perfiles con cierto nivel de mezcla en la dirección vertical en prácticamente todas las estaciones. En algunas estaciones se observa un aumento de la salinidad cerca del fondo pero las variaciones son suaves en comparación con otros perfiles medidos. Hay un aumento de la salinidad en las estaciones ubicadas sobre la zona central y costa uruguaya, superando el valor de 20 ppm en el fondo en las estaciones exteriores #19 y #26.

2.5.3.2.2. Análisis temporal

La comparación de los perfiles de salinidad medidos con el CTD para cada estación de la zona exterior en las campañas 2 a 5 del Proyecto FREPLATA-FFEM se presenta en la Figura 2.45. Se observa en general una variabilidad temporal importante en los perfiles de salinidad medidos en las estaciones presentadas característicos de la una zona de alta dinámica vinculada con el frente salino.

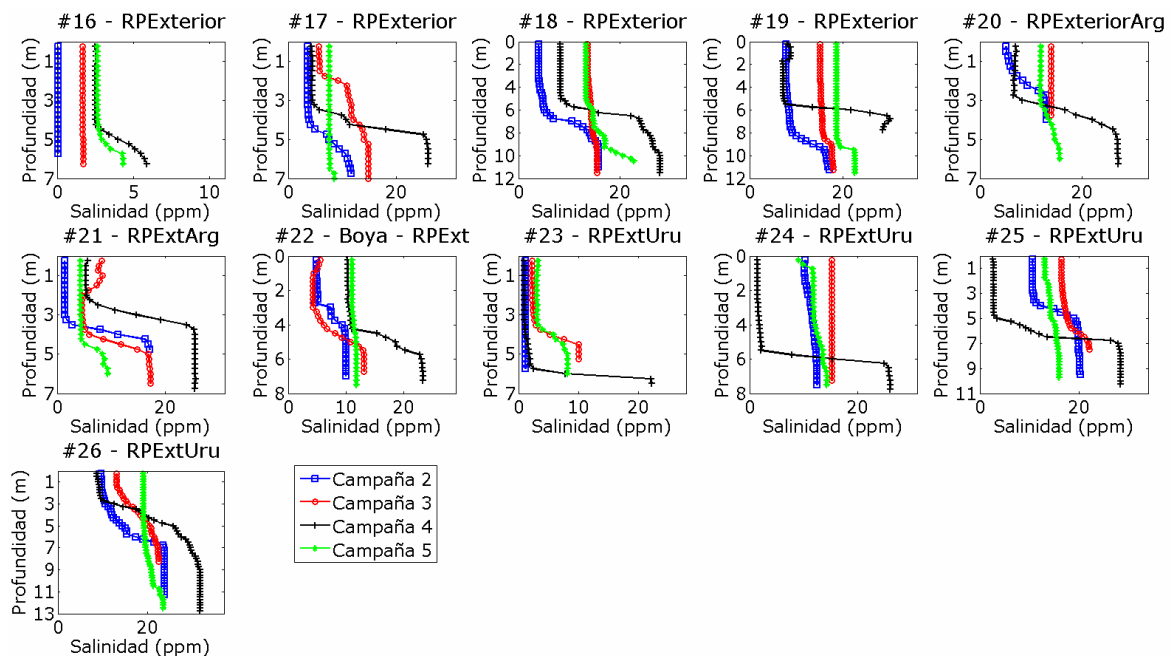


Figura 2.45: Perfiles de salinidad obtenidos con el CTD en las estaciones exteriores del Río de la Plata monitoreadas durante las campañas 2 a 5.

En la estación #16 ubicada en la zona de transición (Barra del Indio) entre la zona intermedia y exterior del Río de la Plata se observan valores en general bajos de salinidad (incluso nulos en la campaña 2) de hasta 5 ppm en el fondo con cierto nivel de estratificación a medida que dicho valor es mayor (campañas 4 y 5). En las estaciones #17, #18 y #19 la salinidad es mayor y se observan situaciones de mezcla vertical con perfiles homogéneos, situaciones de gran estratificación y situaciones de leve estratificación. La misma diversidad de perfiles se observan para las estaciones #20 y #21 ubicadas sobre la costa argentina, con valores bajos de salinidad menores a 5 ppm en la zona superficial principalmente hasta valores mayores a 20 ppm en el fondo. Por último, en las estaciones #22 a #26 ubicadas sobre la zona central hacia la costa uruguaya se observan también situaciones de mezcla vertical o situaciones de gran estratificación cuando la salinidad de fondo supera los 20 ppm.

2.5.3.3. Relación perfiles salinidad y turbidez

Se calculó el coeficiente de correlación entre cada perfil de turbidez y de salinidad medido en cada campaña (de la 2 a la 5) en las estaciones de la zona exterior #16 a #26. Además, para analizar y comparar las tendencias de ambos perfiles se graficaron simultáneamente los perfiles verticales de ambas variables normalizadas. En las Figuras 2.46 y 2.47 se presentan para cada estación de medición los perfiles de turbidez y salinidad normalizados de cada campaña y los coeficientes de correlación obtenidos.

Se observa los factores de correlación de ambos perfiles en general son positivos y mayores al valor de 0.6 aunque se observan correlaciones negativas también importantes. En la estación #16 ubicada sobre la zona inicial del campo salino se observa una buena correlación entre ambos perfiles con mayores valores sobre el fondo en todas las campañas exceptuando la campaña 4 para la cual el perfil de turbidez sobre el fondo muestra una disminución de la turbidez respecto a los valores en la zona superior de la columna de agua. Para la estación #17 se obtienen altas correlaciones y la forma de los perfiles es similar. En la estación #18 las correlaciones son positivas pero relativamente bajas, y los perfiles muestran fuertes gradientes de turbidez sobre el fondo y para la salinidad gradientes marcados a profundidad media, lo que resulta en formas de perfil vertical distintas. En la estación exterior #19 hay correlaciones altas positivas salvo para los datos de la campaña 4. En las estaciones ubicadas hacia la zona de la costa argentina, #20 y #21, las correlaciones son positivas y en general altas pero en una campaña para cada caso la correlación es negativa (comportamiento opuesto). En la estación #22 se observa una tendencia similar entre los perfiles de turbidez y salinidad medidos. En la estación #23 no es tan clara la tendencia pues solamente en dos campañas las correlaciones son altas pero de signo opuesto. Por último en las estaciones ubicadas hacia la costa uruguaya, #24, #25 y #26 en general se observa correlación alta y una forma similar entre ambos perfiles. Además de la predominancia de altas correlaciones entre los perfiles de turbidez y salinidad mencionada anteriormente, se observa en los perfiles normalizados que en general el máximo gradiente de turbidez se observa a una profundidad mayor que el máximo gradiente de salinidad.

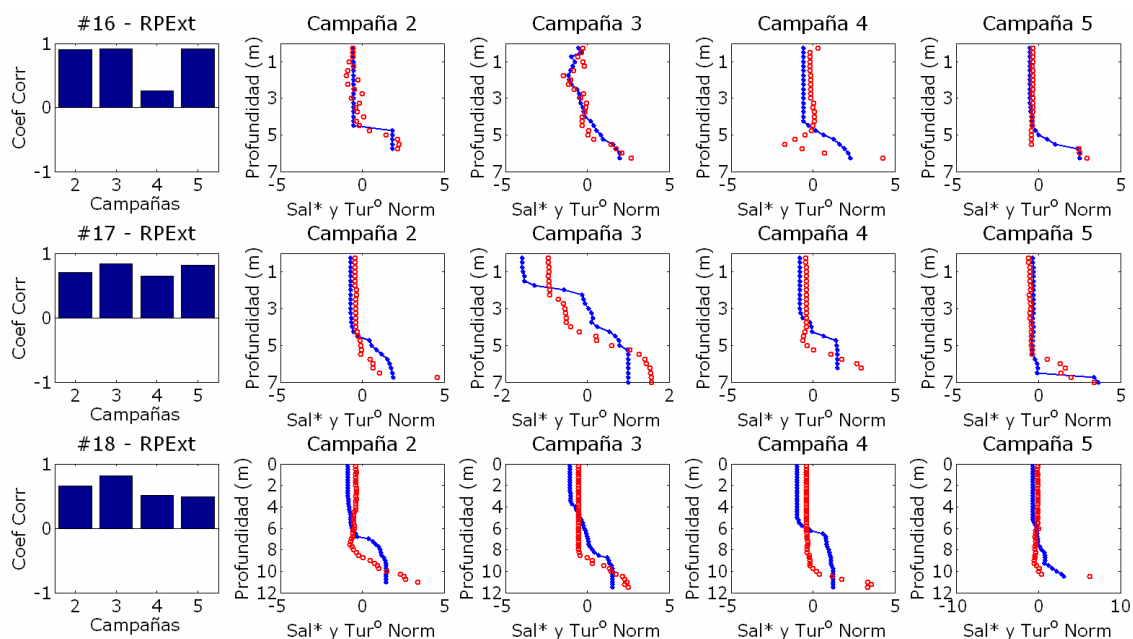


Figura 2.46: Coeficientes de correlación entre los perfiles de turbidez y salinidad medidos simultáneamente por el CTD y perfiles normalizados (campañas 2 a 5) en las estaciones de monitoreo #16, #17 y #18.

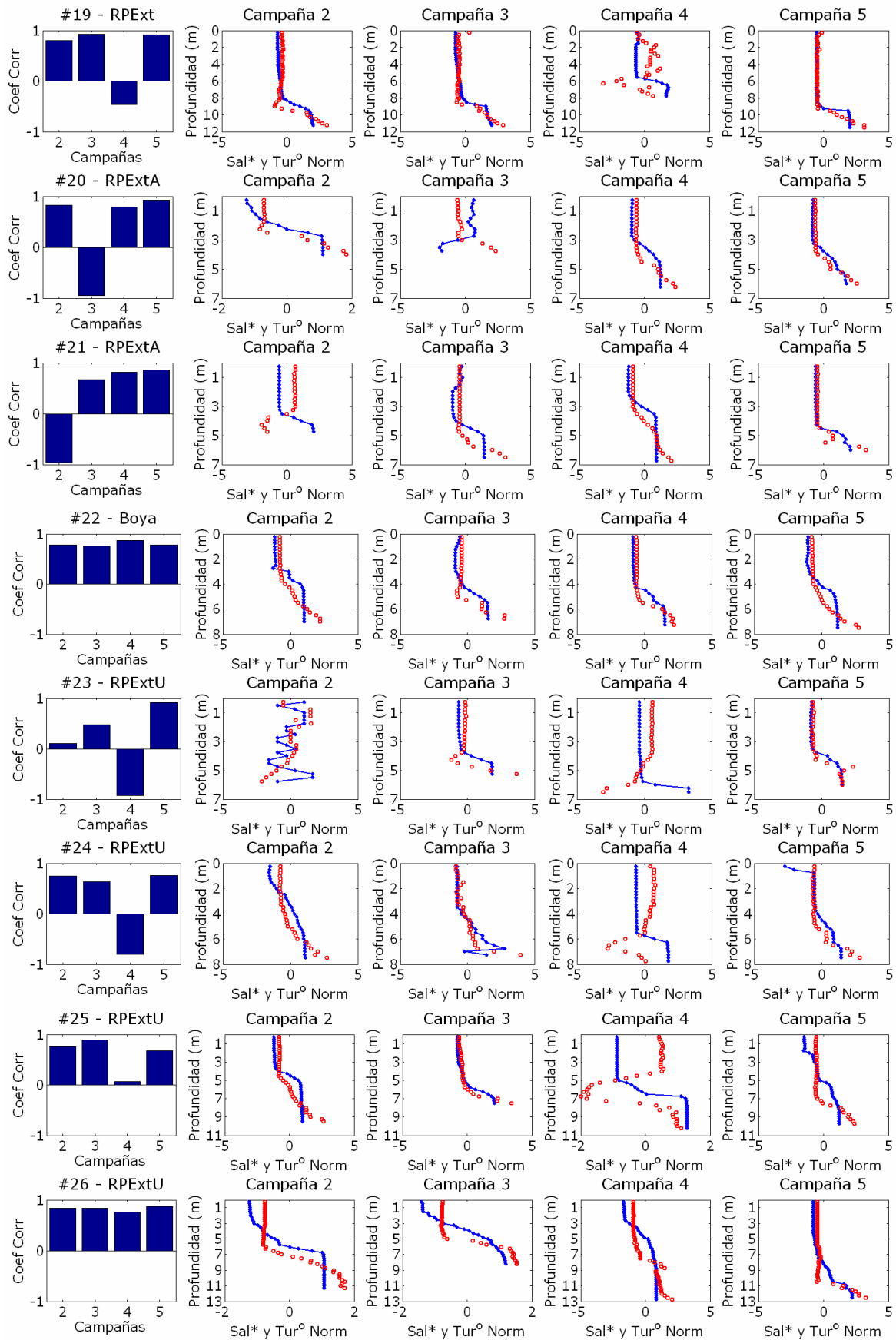


Figura 2.47: Coeficientes de correlación entre los perfiles de turbidez y salinidad medidos simultáneamente por el CTD y perfiles normalizados (campañas 2 a 5) en las estaciones de monitoreo #19, #20, #21, #22, #23, #24, #25 y #26.

2.5.3.4. Síntesis

Se extrajo la información de los perfiles verticales de turbidez y salinidad medidos con un CTD en las campañas 2, 3, 4 y 5 del Proyecto FREPLATA-FFEM para su análisis e interpretación. Utilizando los datos de concentración de sedimento en suspensión de las muestras de agua extraídas en las distintas estaciones durante las campañas oceanográficas se obtuvieron relaciones de ajuste entre turbidez y concentración. Utilizando dichos ajustes se determinaron los perfiles de concentración de sedimento en suspensión a partir de los perfiles de turbidez medidos por el CTD. Los perfiles de concentración muestran un comportamiento homogéneo en la dirección vertical en la zona interior e intermedia del Río de la Plata con un aumento del valor de concentración hacia el exterior. En la zona de Barra del Indio entre el interior y el exterior los perfiles comienzan a presentar variaciones en la vertical con mayores valores de concentración sobre el fondo y sobre la costa. La estratificación se acentúa en las medidas de la zona exterior y se observa una disminución de la concentración cuánto más hacia el exterior se ubique la estación. La información de los perfiles de turbidez muestra una zona de máxima concentración hacia el final de la zona intermedia del Río de la Plata contra el borde de la zona exterior, es decir, aguas arriba de la línea Punta Piedras-Montevideo.

En las estaciones de monitoreo #1 a #15bis ubicadas en la zona interior e intermedia el agua es dulce. A partir de la estación #16 se comenzaron a medir perfiles de salinidad no nulos. Las medidas muestran un aumento gradual de salinidad a medida que las estaciones son más externas, por ejemplo en la transecta de las estaciones #16 a #19 o la de las estaciones #23 a #26 sobre la costa uruguaya. Las medidas muestran una variación de los valores entre las campañas, con situaciones de perfiles con una mezcla en la dirección vertical y situaciones de estratificación vertical. Estos datos confirman la variabilidad del comportamiento de la zona estuarina del Río de la Plata en relación al campo salino y los flujos asociados, con situaciones de estuario parcialmente mezclado y situaciones de estuario bien mezclado.

Se exploró la correlación existente entre los perfiles de turbidez y los perfiles de salinidad medidos en cada estación de la zona exterior. En la mayoría de los casos la correlación es alta y la comparación de los perfiles normalizados muestra una forma similar en la variación de turbidez y salinidad en la dirección vertical, con mayores valores sobre el fondo. No obstante en algunos casos (principalmente durante la campaña 4) las correlaciones son negativas y valores altos de salinidad sobre el fondo corresponden a perfiles invertidos de turbidez, es decir, menores valores sobre el fondo. Estos dos comportamientos identificados podrían indicar diferentes procesos dominantes para cada caso. En las situaciones donde la forma de ambos perfiles es similar, la diferencia de densidades entre fondo y el resto de la columna de agua impediría la mezcla vertical del sedimento resuspendido desde el fondo y por tanto el sedimento permanece acotado a la zona inmediata al fondo. En cambio en las situaciones donde los perfiles son invertidos sucede que el ingreso de agua de la zona exterior por el fondo (de mayor salinidad) no aporta sedimento en suspensión, y en cambio el flujo superficial proveniente de la zona intermedia sí. Estos dos comportamientos pueden entonces mostrar dos tipos de situaciones de transporte en la zona exterior asociado con el campo salino y los distintos tipos de flujo verticales asociados.

2.5.4. Síntesis datos Campañas Oceanográficas

A partir del análisis de la información puntual recolectada reiteradamente durante varias campañas oceanográficas en estaciones de monitoreo a lo largo de gran parte del Río de la Plata es posible conocer varios aspectos de la dinámica de sedimento fino en la zona. Estas campañas están asociadas a situaciones climáticas de calma, es decir, condiciones habituales con flujos de poca energía, dominados por marea

astronómica o eventos suaves de marea meteorológica, con vientos moderados. La información por tanto no es representativa de las situaciones de alta energía como las tormentas con vientos y oleaje fuertes que ocurren con frecuencia en la zona.

La información muestra, en estas situaciones climáticas, las mayores concentraciones de sedimento en suspensión se observan sobre la costa argentina en la zona intermedia hacia la zona exterior del Río de la Plata (sobre Barra del Indio). Esto se identifica en las muestras de agua y en los perfiles de turbidez. Sobre dicha zona se produce la transición entre perfiles homogéneos y perfiles con estratificación vertical, la cual se visualiza fuertemente en la zona exterior asociada a la influencia del campo salino. En la zona interior los perfiles son homogéneos con concentraciones medias. En la zona exterior la concentración de sedimento disminuye respecto a las mayores concentraciones mencionadas, siendo éstas muy bajas sobre la costa uruguaya y un poco mayores sobre la costa argentina. La dinámica de sedimento en la zona exterior está influenciada directamente por la dinámica del campo salino.

El material del fondo de la zona estudiada del Río de la Plata está compuesto básicamente por material fino (barro), con una variación espacial entre las proporciones del material tipo arcilla y tipo limo. Hay un aumento gradual del contenido de material arcilloso entre el interior y el exterior, con mayores valores sobre la costa uruguaya, asociados también a un incremento en el contenido de materia orgánica y al contenido de agua. El material que se encuentra en suspensión es más fino que el material de fondo y presenta mayor variabilidad, pero se observa nuevamente una mayor proporción de material arcilloso sobre la zona exterior. Utilizando la clasificación completa de Flemming el sedimento fino de fondo en el Río de la Plata está formado por tres tipos, barro muy limoso ligeramente arcilloso y limo ligeramente arcilloso en la zona interior e intermedia, y limo arcilloso en la zona exterior y de Barra del Indio. Debido a la variabilidad de la composición del sedimento de suspensión entre campañas no es representativa una caracterización de este tipo para el material en suspensión. No obstante en términos generales se encuentran todos los tipos de barros definidos por Flemming salvo el tipo arcilla.

La información analizada permite visualizar una dinámica de sedimento fino variable espacialmente dominada por distintos procesos en función de las diferentes zonas del Río de la Plata. La predominancia de materiales arcillosos en la zona exterior en conjunto con la influencia del campo salino en la misma se diferencia de los procesos que puedan dominar en la zona interior. Por otra parte, los resultados confirman la complejidad de los procesos que actúan y la importancia de su entendimiento.

2.6. ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN

Se describen sintéticamente en este punto las características y los principales resultados obtenidos en los ensayos de columna de sedimentación-consolidación realizados en el IMFIA para diversas muestras de sedimento cohesivo del Río de la Plata. Mayor información se obtiene en Fossati et al. (2012). Este ensayo es simple desde el punto de vista técnico, económico en cuanto a su implementación y esencial en cuanto a la información que brinda. En los ensayos realizados se determinó la curva de consolidación o compactación de las diversas muestras ensayadas, es decir, la variación de la altura del depósito a lo largo del tiempo. En particular, se definieron tres objetivos específicos para ser estudiados con las series de ensayos realizados: la influencia de la concentración inicial del depósito, la influencia de la composición y la influencia de la salinidad, en las curvas de consolidación para el sedimento del Río de la Plata.

Se utilizaron muestras de sedimento de fondo extraídas durante las Campañas 4 y 5 del Proyecto FREPLATA-FFEM, cuyo análisis se realizó anteriormente en este

capítulo. En total se utilizaron muestras de 5 estaciones diferentes, de la estación #2 de la zona interior del Río de la Plata, de la estación #10 de la zona intermedia y de las estaciones #22, #20 y #26 de la zona exterior. Tres series de ensayos fueron planificados y realizados para responder a los objetivos específicos definidos. Las características de las tres series de ensayos realizados (9 casos en total) se presentan en la Tabla 2.7. Uno de los principales resultados que se obtienen del ensayo es la curva de evolución temporal de la altura de la interfase, es decir, las curvas de asentamiento o curvas de consolidación, como la presentada en la Figura 2.48 a modo de ejemplo. En la misma se observan diversas etapas del proceso que pueden ser ajustadas con leyes logarítmicas. Estas curvas se chequearon y compararon con curvas de otros barros medidas en otros laboratorios y presentadas en la bibliografía. Se destacan a continuación los resultados cualitativos obtenidos durante la realización de los ensayos, ya que se considera los mismos aportan a la caracterización básica de la dinámica que se está realizando en este capítulo en base a mediciones.

Ensayo	Concentración Inicial - C0 [g/l]	Altura Inicial - H0 [m]	Duración [días]	Muestra de Barro	Composición Material				Salinidad mezcla[g/l]
					% Arena	% Limo	% Arcilla	%Arcilla / %Limo	
e1t1	98	1.011	23	#22	1	68	31	0.45	0
e1t2	91	0.944	21	#22	1	68	31	0.45	0
e1t3	62	0.933	22	#22	1	68	31	0.45	0
e2t1	100	1.003	162	#2	19	71	9	0.13	0
e2t2	100	0.973	162	#26	0	66	33	0.50	0
e2t3	100	1.032	162	#10	1	86	14	0.16	0
e3t1	100	0.957	53	#20	0	56	44	0.77	0
e3t2	100	0.966	53	#20	0	56	44	0.77	18
e3t3	100	0.962	51	#22	1	68	31	0.45	18

Tabla 2.7: Características de los ensayos de consolidación en columna realizados.

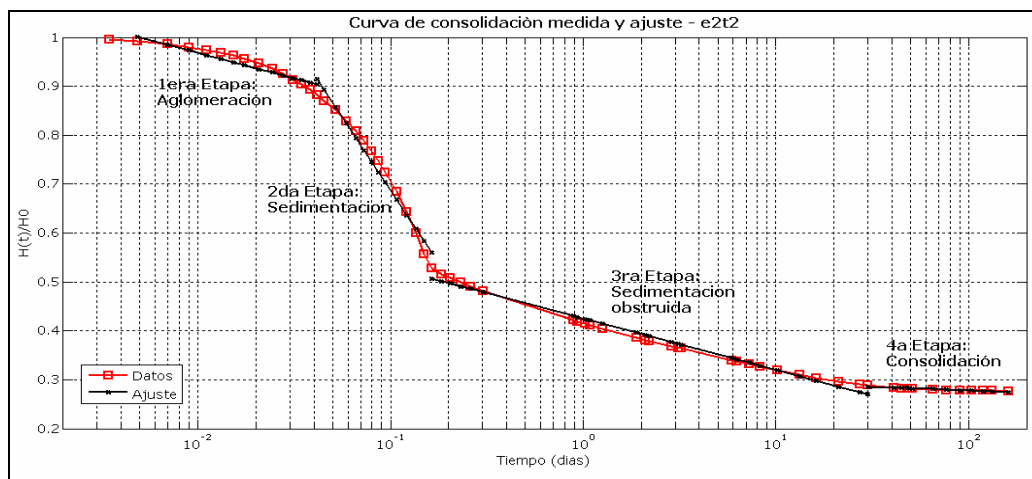


Figura 2.48: Curva de consolidación medido y ajuste de las diversas etapas para el ensayo e2t2.

En el ensayo e1t1 (y en el ensayo e1t2 por ser de condiciones muy similares) inmediatamente después del vertido se comenzó a visualizar la interfase y fue posible medir la altura de la misma, observando claramente su descenso con cierta rapidez durante las primeras horas. La zona de suspensión (superior) mantuvo un nivel de turbidez que disminuyó gradualmente a lo largo de los días del ensayo desapareciendo hacia el final. En el ensayo e1t3 en cambio no se visualizó una interfase clara que permitiera registrar mediciones hasta casi una hora después del vertido, identificándose en los primeros instantes solamente un gradiente en la capa superior de concentración. Además de estas diferencias cualitativas observadas durante los ensayos, la comparación de las curvas mostró que a grandes rasgos se observa una mayor velocidad de

sedimentación-consolidación en las primeras etapas para concentraciones menores, manteniéndose la forma general de las curvas.

La dependencia observada del proceso de consolidación con la composición del material fue grande, tanto durante los ensayos como en el análisis de las curvas. Durante los ensayos e2t1 y e2t3 el descenso inicial observado fue muy rápido. Inmediatamente después del vertido se visualizó un gradiente en la turbidez en casi toda la columna aunque no fue posible identificar una interfase clara. Por la rapidez del descenso la caída ya había sido considerable al tomar la primera medida. La columna de agua permaneció en general con sedimento fino en suspensión que fue decantando suavemente durante el ensayo y formó una capa de sedimento diferente en el depósito. En el ensayo e2t2 realizado el vertido no se observó un descenso rápido de la interfase ni un gradiente de turbidez. A los pocos minutos se diferenció una interfase clara que pudo ser medida, separando una zona superior con muy poco contenido de sedimento en suspensión. El descenso observado fue lento y en bloque, y durante el desarrollo se continuó observando una interfase bien clara con una columna de agua casi sin sedimento en la parte superior y un depósito más denso y homogéneo. El comportamiento obtenido durante el ensayo e3t1 fue muy similar al obtenido en el ensayo e2t2. Los resultados muestran que sedimentos cohesivos con alta proporción de limos frente a las arcillas sedimentan y consolidan rápidamente alcanzando una altura del depósito cuasi estable en el primer día de ensayo. Dicho comportamiento es muy diferente al que se observa en muestras con porcentaje de arcilla elevado en relación al porcentaje de limos, donde se observa que la sedimentación inicial es más lenta y la consolidación continúa con el tiempo con una tasa de descenso decreciente.

En relación al efecto de la salinidad, durante los ensayos se visualizaron diferencias cualitativas. En los ensayos e3t2 y e3t3 se observó un resultado similar, una vez realizado el vertido se observó rápidamente de forma clara la interfase entre la zona inferior de mayor turbidez (depósito) y la zona superior de menor turbidez (suspensión), incluso se visualizaron flocs inicialmente. El descenso observado de la interfase fue muy claro y rápido. Básicamente se observó que en las muestras con salinidad la interfase se observa más claramente y más rápidamente luego del vertido y que la deposición es un poco más rápida inicialmente. Esto mostraría un efecto de salinidad en la etapa de sedimentación de las muestras de sedimento fino. No obstante la altura de depósito final obtenida con salinidad fue mayor a la obtenida sin salinidad. Probablemente la salinidad incentive la formación de flocs acelerando los procesos en suspensión iniciales pero éstos luego en el depósito forman un barro con una estructura más débil y por tanto es necesario mayor tiempo para la evacuación del agua en la etapa inicial de consolidación.

2.7. DISCUSIÓN GENERAL

La gran cantidad y la gran diversidad de información analizada en este capítulo permiten plantear una discusión integrada de varios aspectos relevantes concretos sobre la dinámica de sedimento fino en el Río de la Plata.

En primer lugar, los datos recolectados muestran valores de concentraciones de sedimento en suspensión del orden de decenas a algunas centenas de mg/l en algunas ocasiones. A pesar de la incertidumbre sobre valores en zonas cercanas al fondo especialmente en eventos de resuspensión, parecería la dinámica global de sedimento fino en la zona se refiere a procesos de bajas concentraciones de sedimento en suspensión y por tanto no se trata de flujos de densidad que interactúan y pueden modificar las condiciones de flujo.

Según Winterwerp and Kesteren (2004) para un determinado ambiente, los datos de la composición del sedimento de fondo obtenidos a distintas ubicaciones y

profundidades se ubicarían sobre una línea (o una banda), entre la esquina inferior izquierda asociada a la arena y el lado opuesto asociado a los barros, en los diagramas triangulares de clasificación según composición. En ese caso el contenido de arena se utiliza como una variable, y la proporción entre los materiales finos se mantiene en el ambiente. Los resultados obtenidos analizando los nuevos datos de composición de material de fondo (Figura 2.36) revelan que una parte de los datos se ubican en cierta banda en el diagrama y otra parte de los datos que no. Es posible identificar una banda asociada a los tipos D-II (barro muy limoso ligeramente arenoso) y E-II (limo ligeramente arcilloso), que corresponden a la zona interior e intermedia del material de fondo del Río de la Plata. El resto del material es tipo E-III limo arcilloso y no forma una banda indicando proporcionalidad entre el porcentaje de limo y de arcilla sino que más bien representa una variación de ambos porcentajes. Esto indicaría entonces el material en dicha zona del Río de la Plata está vinculado a un mismo origen (posiblemente el origen fluvial) mientras que el material de fondo de la zona central estuarina no se vincularía únicamente a un mismo origen. De alguna forma esta clasificación está indicando comportamientos distintos en estas áreas que repercuten en el material de fondo. Según los resultados obtenidos durante los ensayos de consolidación, la diferenciación del material de fondo repercute también en los procesos de consolidación del material y por tanto en la evolución del depósito formado.

En relación a esta zonificación de los procesos se tiene información medida muy valiosa en tres ubicaciones del Río de la Plata de dinámicas bien diferentes, Pilote Norden, Torre Oyarvide y la Boya Oceanográfica. La información recolectada en Montevideo complementaria (Anexo A.1) muestra una dinámica de sedimento fino muy variable en el tiempo, con valores bajos de concentración durante la mayor parte del tiempo y eventos de aumento de la misma generados por resuspensión de fondo. Los perfiles observados muestran en general una estratificación con algunas situaciones de mezcla. La gran variabilidad que presenta la salinidad en esta zona es sumamente determinante para los procesos de transporte y a pesar de que no hubieron mediciones simultáneas de salinidad, es de esperar una gran correlación entre los perfiles salinos y de sedimento como se observa en el resto de la zona exterior del Río de la Plata.

La información continua de turbidez en Pilote Norden (zona interior del Río de la Plata) muestra una gran variabilidad de la señal en diversas escalas, cortas vinculadas a las fluctuaciones diurnas y semidiurnas de marea astronómica, de varios días asociada a eventos de marea meteorológica y fluctuaciones rápidas durante eventos de tormenta. Se observan valores de turbidez no nulos permanentemente, y los perfiles verticales muestran una homogeneidad en la dirección vertical. Estos valores permanentes estarían asociados al transporte del material en suspensión de lavado que proviene de la cuenca superior de aporte del Río de la Plata principalmente por el río Paraná Guazú. El valor basal parecería no responder a procesos de intercambio entre la columna de agua y el fondo por procesos de erosión-deposición. Además, no se obtuvo una correlación directa entre las tensión de corte de fondo por marea y la turbidez. No obstante si se obtuvo correlación en los eventos de alta energía asociados a tormentas. En estos casos se observa un incremento de la turbidez en la zona debido al transporte de material erosionado de fondo en los alrededores por las tormentas. La composición del sedimento en suspensión y fondo muestra contenidos similares a los descargados por los principales tributarios del Río de la Plata.

La información recopilada en Torre Oyarvide, ubicada en la zona intermedia cerca del límite con la zona exterior, muestra una turbidez permanente en la columna de agua con mayores concentraciones de sedimento que las obtenidas en la zona interior de Pilote Norden. En relación a los perfiles estos son mayormente homogéneos pero con cierta variabilidad en la zona de fondo con mayores valores de concentración. Además, los datos

muestran alrededor de la zona de Torre Oyarvide se observan los máximos de concentración (de turbidez), en períodos de calma. Se observó la señal de turbidez medida está caracterizada por una oscilación corta de escala de marea y por eventos de mayor magnitud y mayor duración. La vinculación con los forzantes muestra la mayor parte del tiempo (durante períodos de calma) no hay una correlación clara entre la turbidez y la tensión de corte de fondo, lo que indicaría una predominancia del transporte de sedimentos en la columna de agua. Esto se observa claramente en la correspondencia existente entre la frecuencia de la oscilación del nivel y la frecuencia de la turbidez durante la mayor parte del tiempo. Por otra parte, se observa una influencia de los eventos de tormenta sobre la señal de turbidez por resuspensión del material de fondo. Parecería entonces la dinámica en esta zona está dominada por procesos de transporte de material entre la zona interior y la zona exterior, con gran influencia de resuspensión de fondo durante los procesos de tormenta. El contenido de material de fondo y su clasificación indican un origen de sedimento fino no directamente vinculado al de la zona interior sino con más contenido de material arcilloso proveniente probablemente desde la zona exterior. Por último, un aspecto a destacar de las mediciones de Torre Oyarvide es que a pesar de que los perfiles de salinidad medidos en las campañas mostraron valores nulos, la serie continua obtenida con el SMATCH registró en varias oportunidades valores mayores de salinidad, lo que indica un ingreso del campo salino desde el exterior hasta dicha zona. La estación de Torre Oyarvide (y la transecta asociada) parecería entonces estar ubicada inmediatamente aguas arriba de la zona de inicio del frente, lo que sería consistente con la ubicación del frente de máxima turbidez en esta zona que muestran las distribuciones espaciales de las muestras de concentración de sedimento y de los perfiles verticales medidos.

Por otra parte las medidas recolectadas en la Boya oceanográfica y alrededores muestran una dinámica muy diferente. Por un lado no se observan valores permanentes de turbidez en la columna de agua, ni correlación con las fluctuaciones de marea, sino que las series temporales se caracterizan por una combinación de valores bajos de concentración con eventos de gran aumento de turbidez, asociados directamente con resuspensión de material de fondo por oleaje de tormentas. Las concentraciones medidas en época de calma muestran valores bajos menores a los medidos aguas arriba en la zona intermedia. No obstante los perfiles registrados muestran estratificación con mayores concentraciones en fondo, asociadas a una dinámica dominada por interacción con el fondo. Además, la correlación entre el perfil de sedimento y de salinidad, junto con la variabilidad de esta última registrada con el SMATCH muestran una gran influencia del campo salino en la intensidad de los procesos de mezcla vertical de sedimento. En general los aumentos de turbidez observados en las mediciones continuas en la zona de la Boya se observan también en las mediciones de Torre Oyarvide y con menor efecto sobre las mediciones de Pilote Norden. Esto muestra un impacto de las grandes tormentas sobre todo el dominio del Río de la Plata predominando en la zona exterior e intermedia. En cambio el efecto de la marea astronómica y meteorológica en el transporte de sedimento fino parece ser mucho mayor sobre la región intermedia e interior del Río de la Plata que sobre la región exterior.

El análisis de los perfiles verticales, muestra que la variación topográfica en el inicio de la zona exterior y el aumento de la sección transversal, junto con la variabilidad de la salinidad determinan la dinámica en esta zona. Los datos (tomados en situaciones de calma) muestran comportamientos diferentes entre la zona Sur cercana a la costa argentina y entre la zona Norte cercana a la costa uruguaya, con concentraciones mayores de sedimento en suspensión sobre la costa argentina. No obstante en ambas se observa una influencia del campo salino en los perfiles de turbidez, con correlaciones altas entre los mismos.

Capítulo 3

3. MODELACIÓN NUMÉRICA DE LOS FORZANTES HIDRODINÁMICOS: CORRIENTES Y OLEAJE

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las principales características de la implementación de los modelos MARS y SWAN utilizados para representar y estudiar los diversos procesos hidrodinámicos que actúan en la zona. El modelo MARS en una implementación 3D baroclínica reproduce la dinámica principal de marea del Río de la Plata y la zona oceánica adyacente, dada por la interacción de la descarga fluvial con la marea astronómica y meteorológica proveniente del Océano Atlántico, el campo salino y los vientos locales. El modelo SWAN resuelve la generación y propagación del oleaje en la zona. Para diferenciar los procesos y principalmente su efecto sobre la dinámica de sedimentos, nos referiremos a los resultados de la dinámica resuelta por el modelo MARS como modelo hidrodinámico de corrientes o de marea y a la dinámica de tormenta resuelta por el modelo SWAN como modelo de oleaje.

La implementación del modelo MARS para resolver la dinámica de flujo en la zona del Río de la Plata fue realizada por un grupo de investigadores en el marco del Proyecto FREPLATA-FFEM (FREPLATA, 2011). La actividad estuvo liderada por los investigadores del IFREMER participantes del proyecto que utilizan el modelo MARS habitualmente. No obstante, debido a la complejidad del área de estudio, las características principales de la implementación del modelo tuvieron en cuenta la experiencia previa de los grupos de investigación de Argentina (CIMA, INA) y del Uruguay (IMFIA) en sus trabajos de modelación numérica del Río de la Plata. Durante el proyecto además de la implementación de la componente hidrodinámica del modelo tridimensional MARS se avanzó en la calibración del mismo. En el marco de éste trabajo de tesis se continuó con el proceso de calibración con las características y resultados que se incluyen en este capítulo.

A partir de las variables determinadas en cada modelo se determinaron las tensiones de corte de fondo generadas por las corrientes de marea, por el oleaje, y de forma combinada. Se analizaron diversas aproximaciones y simplificaciones de las formulaciones existentes. Como resultado se determinan las tensiones de corte de fondo

generadas por ambos tipos de flujo como paso previo al trabajo de modelación de sedimentos finos en sí. Se realizó un análisis de la variación espacial y temporal de las tensiones de corte calculadas.

3.2. MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DE MAREA - MARS

3.2.1. Características generales del modelo numérico MARS

El modelo numérico MARS – Sistema de modelación del ambiente costero, (MARS *Système de modélisation de l'Environnement Côtier*) es un modelo de flujo a superficie libre basado en las ecuaciones de movimiento de Navier Stokes (Lazure and Dumas, 2008) desarrollado por el equipo del laboratorio de física y sedimentología del departamento de dinámica del ambiente costero (DYNECO/PHYSED) del Instituto IFREMER (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer) de Francia. El modelo está desarrollado para la modelación de la dinámica oceanográfica costera en diversas escalas espaciales y temporales con una integración de componentes ambientales (sedimentos finos y ciclos biogeoquímicos).

Los elementos descriptos aquí sobre el modelo hidrodinámico MARS se basan en los documentos de las tesis de doctorado de Tessier y Dufois (Tessier, 2006; Dufois, 2008) realizadas ambas en IFREMER; y en material específico sobre los aspectos básicos del modelo MARS disponibles en la web (wwz.ifremer.fr/mars3d), ó en publicaciones científicas específicas (Lazure and Dumas, 2008).

El sistema de modelación MARS está compuesto por varios módulos que interaccionan entre sí. El módulo hidrodinámico, el módulo de sedimentos, el módulo biogeoquímico, el módulo de contaminantes y el módulo de transporte lagrangiano. Es un modelo que utiliza el método en diferencias finitas para discretizar las ecuaciones y define una grilla escalonada tipo Arakawa C (Arakawa and Lamb, 1977) en las direcciones horizontal y vertical, con un esquema de resolución espacial centrado de segundo orden. El modelo MARS permite además trabajar con modelos encajados transmitiendo información por las fronteras desde un modelo regional de menor resolución espacial y mayor dominio a modelos locales de mayor resolución espacial.

3.2.2. Sistema de ecuaciones

El módulo hidrodinámico del MARS resuelve las denominadas ecuaciones primitivas gobernantes, es decir, las ecuaciones de movimiento de Navier Stokes junto con las ecuaciones termodinámicas para la temperatura y la salinidad, para resolver el flujo tridimensional a escalas regionales y locales en diversos cuerpos de agua. Se consideran las hipótesis de Boussinesq y la hidrostática. La primera supone que la densidad en el medio varía ligeramente respecto a una densidad de referencia y por tanto se desprecian las variaciones en densidad salvo en el término de gravedad. La segunda hipótesis refiere a que el movimiento en la escala horizontal se asume de mayor orden de magnitud que el movimiento en la vertical y por tanto se desprecian aceleraciones verticales respecto a la gravedad. Se resuelven las ecuaciones denominadas RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) donde se incluyen en las ecuaciones del movimiento medio el tensor de tensiones de Reynolds del movimiento fluctuante. Las ecuaciones describen los campos de velocidades, elevación de la superficie libre, salinidad y temperatura. Información completa y detallada del desarrollo de las ecuaciones gobernantes y sus simplificaciones se encuentra en el libro de Kowalik and Murty (1993).

El modelo considera la separación de los modos barotrópico y baroclínico de la dinámica de flujo (Blumberg and Mellor, 1987). Para la resolución de las ecuaciones se utiliza un algoritmo “splitting” para el modo rápido (externo) de movimiento y otro

algoritmo para el modo lento (interno). La componente barotrópica (externa) del flujo no necesita ser descripta por las ecuaciones tridimensionales y se utiliza entonces una aproximación integrada en vertical de las ecuaciones (2D). En este modo se resuelven las ondas superficiales de mayor celeridad, determinando la elevación de la superficie y las corrientes promedio en la vertical, denominadas corrientes barotrópicas. Por otro lado las corrientes baroclínicas se resuelven por el modelo 3D y se denomina el modo interno. La solución numérica al aplicar este método debe resolverse en dos etapas. Primero se resuelve el problema bidimensional y luego con esa información se resuelve el modelo tridimensional determinando la distribución vertical de velocidad mediante un método iterativo. Las ecuaciones en MARS-3D están escritas en coordenadas esféricas en la dirección horizontal y en coordenadas sigma en la vertical. Para mayor claridad las ecuaciones presentadas aquí se escriben en un sistema de referencia cartesiano (x, y, σ) .

3.2.2.1. Coordenada vertical sigma

La resolución de los procesos en la dirección vertical utilizando capas de espesores constantes en general fallan en la reproducción de los mismos en regiones con variaciones abruptas de topografía de fondo o en la zona de las capas límites (Kowalik and Murty, 1993). Para superar esto se define una coordenada adimensionada mediante cierta transformación. Se considera un sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z) donde x aumenta hacia el Este, y aumenta hacia el Norte y z aumenta hacia arriba. La superficie libre se ubica en $z = \eta(x, y, t)$ y el fondo se ubica en $z = -H(x, y)$. El sistema de coordenadas vertical tipo sigma, utilizado en MARS, se define a partir de la coordenada vertical cartesiana z según la ecuación 3.1.

$$\sigma = \frac{z + H}{\eta + H} \quad (3.1)$$

Definida de esta manera la coordenada sigma transforma la columna de agua desde la superficie ($z = \eta$) hasta el fondo ($z = -H$) en una nueva profundidad que varía entre $\sigma = 0$ en el fondo y $\sigma = 1$ en la superficie libre.

3.2.2.2. Ecuaciones 3D (modo interno)

En términos generales el modelo MARS resuelve el sistema de ecuaciones gobernantes primitivas. Dicho sistema incluye por un lado las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento de Navier Stokes en las tres direcciones incluyendo las aproximaciones de Boussinesq e hidrostática. Por otro lado se incluyen la ecuación de balance de masa, las ecuaciones de conservación de temperatura y salinidad, y la ecuación de estado, la cual determina la densidad del agua en función de la temperatura, salinidad y presión.

A partir de la aproximación de Boussinesq se impone que el estado básico del fluido es hidrostático definido por la presión p_0 y la densidad ρ_0 y el movimiento ocurre por las diferencias respecto al estado de referencia de presión (p') o de densidad (ρ'). Así, $p = p_0(z) + p'(x, y, z, t)$ y $\rho = \rho_0(z) + \rho'(x, y, z, t)$, con $p' \ll p_0$ y $\rho' \ll \rho_0$. A partir de la ecuación de conservación de cantidad de movimiento en la dirección vertical simplificada con la aproximación hidrostática y de Boussinesq (ecuación 3.2 en coordenada sigma ó ecuación 3.3 en coordenada z utilizada para simplificar el desarrollo), se determina la presión a partir de la integración en la vertical desde cualquier profundidad z a la superficie libre $z = \eta$. Notar que en la superficie libre la presión es la presión atmosférica (P_a) y en cualquier profundidad $p(z) = p_0 + p'$.

$$\frac{1}{D} \frac{\partial p}{\partial \sigma} = -\rho g \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -(\rho_0 + \rho')g \quad (3.3)$$

$$\int_z^\eta dp = P_a - (p_0 + p') = P_a - (p) = -\int_z^\eta g(\rho_0 + \rho')dz \quad (3.4)$$

Por tanto:

$$p = P_a + \int_z^0 g\rho_0 dz + \int_0^\eta g\rho_0 dz + g \int_z^\eta \rho' dz = P_a + \int_z^0 g\rho_0 dz + g\rho_0(\eta - z) + g \int_z^\eta \rho' dz \quad (3.5)$$

La ecuación obtenida 3.5 expresa las variaciones de presión no conocidas como la suma de términos relacionados con la presión atmosférica, las variaciones del nivel de la superficie libre y la estratificación por densidad. A partir de dicha ecuación se calculan las derivadas parciales horizontales $\partial p/\partial x$ y $\partial p/\partial y$ que intervienen en las ecuaciones horizontales de cantidad de movimiento.

Se utiliza para simplificar la siguiente notación para cualquier término advectivo:

$$L(A) = u \frac{\partial A}{\partial x} + v \frac{\partial A}{\partial y} + w^* \frac{\partial A}{\partial \sigma} \quad (3.6)$$

donde w^* es la velocidad vertical en el sistema de coordenadas sigma (x, y, σ) mientras que w es la velocidad vertical en el sistema (x, y, z) . A partir de la definición de w y aplicando la transformación del sistema de coordenadas sigma se obtiene:

$$w^* = \frac{1}{D} \left(w - \sigma \frac{\partial \eta}{\partial t} - u \left(\sigma \frac{\partial \eta}{\partial x} + (\sigma - 1) \frac{\partial H}{\partial x} \right) - v \left(\sigma \frac{\partial \eta}{\partial y} + (\sigma - 1) \frac{\partial H}{\partial y} \right) \right) \quad (3.7)$$

Las ecuaciones 3.8 y 3.9 son las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento en la dirección horizontal en coordenadas sigma incluyendo el gradiente de presiones determinado a partir de la ecuación hidrostática. La ecuación de conservación de masa se transforma en la ecuación 3.10 de la cual se obtiene el nivel.

$$\underbrace{\frac{\partial u}{\partial t}}_1 + \underbrace{L(u)}_2 - \underbrace{fv}_3 = -g \underbrace{\frac{\partial \eta}{\partial x}}_4 - \underbrace{\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x}}_5 + \underbrace{\pi_x}_6 + \underbrace{\frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{N_z}{D} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)}_7 + \underbrace{F_x}_8 \quad (3.8)$$

$$\underbrace{\frac{\partial v}{\partial t}}_1 + \underbrace{L(v)}_2 + \underbrace{fu}_3 = -g \underbrace{\frac{\partial \eta}{\partial y}}_4 - \underbrace{\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y}}_5 + \underbrace{\pi_y}_6 + \underbrace{\frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{N_z}{D} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)}_7 + \underbrace{F_y}_8 \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial Dw^*}{\partial \sigma} = 0 \quad (3.10)$$

Siendo $D = H + \eta$ la altura total de la columna de agua; $f = 2\Omega \sin \phi$ la frecuencia de Coriolis; con $\Omega = 2\pi/86164$ rad/s la frecuencia de rotación de la tierra; g la aceleración de la gravedad. Los diversos términos de las ecuaciones de cantidad de movimiento refieren a diversos procesos físicos que intervienen en la dinámica: (1) variación temporal; (2) advección; (3) fuerza de Coriolis; (4) gradiente de presión inducido por la variación de la superficie libre; (5) gradiente de presión inducido por la presión atmosférica; (6) gradiente de presión interna, dado por:

$$\pi_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[D \int_{\sigma}^1 b d\sigma \right] + b \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} - \frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad (3.11)$$

$$\pi_y = \frac{\partial}{\partial y} \left[D \int_{\sigma}^1 b d\sigma \right] + b \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} - \frac{\partial H}{\partial y} \right) \quad (3.12)$$

siendo $b = -g(\rho - \rho_0)/\rho_0$ la flotabilidad, (7) difusión vertical turbulenta parametrizada según N_z , el coeficiente de viscosidad turbulenta vertical; (8) difusión horizontal turbulenta parametrizada según ν_x y ν_y , coeficientes de viscosidad turbulenta horizontal. Despreciando los términos de mayor orden que expresan la dependencia entre las velocidades y la coordenada sigma, se tiene:

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_y \frac{\partial u}{\partial y} \right); \quad F_y = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3.13)$$

El transporte de temperatura y salinidad se resuelve a través de la conservación de masa:

$$\frac{\partial DT}{\partial t} + \frac{\partial D \left(uT - K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial D \left(vT - K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial D \left(w^*T - \frac{K_z}{D^2} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right)}{\partial \sigma} = \text{entradas} - \text{salidas} \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial DS}{\partial t} + \frac{\partial D \left(uS - k_x \frac{\partial S}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial D \left(vS - k_y \frac{\partial S}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial D \left(w^*S - \frac{k_z}{D^2} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right)}{\partial \sigma} = \text{entradas} - \text{salidas} \quad (3.15)$$

siendo T la temperatura del agua; K_x y K_y los coeficientes de difusión turbulenta horizontal; K_z el coeficiente de difusión turbulenta vertical; S la salinidad del agua; *entradas* son las fuentes de ingreso al sistema de T o S y *salidas* son las salidas del sistema de T o S.

3.2.2.3. Ecuaciones 2D integradas en vertical (modo externo)

En el modo barotrópico externo se resuelven las ecuaciones bidimensionales. Estas se determinan a partir de la integración de las ecuaciones tridimensionales entre el fondo ($\sigma = 0$) y la superficie libre ($\sigma = 1$). Las corrientes medias en la vertical se definen como:

$$(U, V) = \int_0^1 (u, v) d\sigma \quad (3.16)$$

La integración de la ecuación de continuidad de masa utilizando que las velocidades son nulas en el fondo resulta en:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} = 0 \quad (3.17)$$

Las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento horizontales están sujetas en las fronteras al intercambio de cantidad de movimiento, en la superficie libre por la acción del viento y en el fondo por la fricción de fondo. De forma general se definen las tensiones sobre la superficie $\tau_{\text{sup}}^x, \tau_{\text{sup}}^y$ y sobre el fondo $\tau_{\text{fon}}^x, \tau_{\text{fon}}^y$:

$$\text{En superficie: } \tau_{\text{sup}}^x = \rho_0 N_z \frac{\partial u}{\partial \sigma}; \quad \tau_{\text{sup}}^y = \rho_0 N_z \frac{\partial v}{\partial \sigma} \quad (3.18)$$

$$\text{En fondo: } \tau_{\text{fon}}^x = \rho_0 N_z \frac{\partial u}{\partial \sigma}; \quad \tau_{\text{fon}}^y = \rho_0 N_z \frac{\partial v}{\partial \sigma} \quad (3.19)$$

Las ecuaciones horizontales de conservación de cantidad de movimiento integradas resultan en:

$$\frac{\partial U}{\partial t} - fV = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 D} (\tau_{\text{sup}}^x - \tau_{\text{fon}}^x) + \int_0^1 [-L(u) + \pi_x + F_x] d\sigma \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + fU = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 D} (\tau_{\text{sup}}^y - \tau_{\text{fon}}^y) + \int_0^1 [-L(v) + \pi_y + F_y] d\sigma \quad (3.21)$$

3.2.2.4. Condiciones de borde

3.2.2.4.1. Superficie

Las condiciones de borde impuestas en este trabajo en la superficie libre ($\sigma = 1$) están dadas por las ecuaciones 3.22, 3.23 y 3.25.

$$K_z \frac{\partial T}{\partial \sigma} = 0; \quad K_z \frac{\partial S}{\partial \sigma} = 0 \quad (3.22)$$

Lo que indica que no se consideran flujos de calor ni de sal entre la atmósfera y el cuerpo de agua.

Se imponen también en la superficie las tensiones de fricción debidas al viento $\tau_{\text{sup}}^x, \tau_{\text{sup}}^y$:

$$\tau_{\text{sup}}^x = \rho_a C_d u_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2}; \quad \tau_{\text{sup}}^y = \rho_a C_d v_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2} \quad (3.23)$$

siendo ρ_a la densidad del aire (1,25 kg/m³), C_d el coeficiente de fricción, y u_w, v_w las componentes de la velocidad del viento a 10 m de la superficie libre. Diversas formulaciones están implementadas en el modelo MARS para determinar el coeficiente de fricción. En este estudio se trabajó con un valor constante y con la formulación de

Large et Pond desarrollada en 1981 en la cual el factor de fricción depende de la intensidad del viento $U_w = \sqrt{u_w^2 + v_w^2}$ (Dufois, 2008):

$$C_d = 10^{-03}(0,49 + 0,065U_w) \text{ si } U_w > 11 \text{ m/s, sino } C_d = 0,0012 \quad (3.24)$$

Por último se impone la condición

$$w^* = 0 \quad (3.25)$$

3.2.2.4.2. Fondo

En el fondo las condiciones de borde impuestas están dadas por las ecuaciones 3.22 y 3.25 presentadas anteriormente, y por las tensiones de corte de fondo parametrizadas con una relación del tipo cuadrática de la velocidad sobre el fondo según la ecuación 3.26.

$$\tau_{fon}^x = \rho_0 C_D u \sqrt{u^2 + v^2}; \quad \tau_{fon}^y = \rho_0 C_D v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3.26)$$

C_D es el coeficiente de tensión de corte y se calcula asumiendo que se cumple la ley logarítmica para la distribución vertical de velocidades cerca del fondo:

$$C_D = \left(\frac{\kappa}{\ln \frac{z}{z_{0h}}} \right)^2 \quad (3.27)$$

donde κ es la constante de Von Karman (0,4), y z_{0h} es la altura de rugosidad (ó rugosidad absoluta) función de las propiedades físicas del suelo. Esta tensión es una tensión global del fondo que incluye la composición, forma de grano y las formas de fondo.

Para el caso del modelo bidimensional integrado en vertical la tensión de corte de fondo se parametriza en función de la corriente promedio vertical según la formulación de Strickler, siendo K el coeficiente de Strickler (igual al inverso del coeficiente de Manning):

$$\tau_{fon}^x = \frac{\rho_0 g U \sqrt{U^2 + V^2}}{K^2 H^{1/3}}; \quad \tau_{fon}^y = \frac{\rho_0 g V \sqrt{U^2 + V^2}}{K^2 H^{1/3}} \quad (3.28)$$

3.2.2.4.3. Fronteras abiertas

En los límites abiertos del dominio se impone el valor de la elevación de la superficie libre. El valor de salinidad en la frontera es advectado dentro del dominio en condiciones de flujo entrante. Cuando se trabaja con grillas encajadas se determinan los valores primero en el modelo padre y luego se imponen las condiciones de borde al modelo hijo, en un solo sentido.

3.2.2.5. Parametrización de la turbulencia horizontal

Para representar los efectos turbulentos de pequeña escala sobre el flujo en la dirección horizontal se utiliza en este trabajo la formulación de Smagorinsky dada por la ecuación 3.29, siendo C un coeficiente de ajuste.

$$\nu = C dx dy \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} \quad (3.29)$$

$$K_x = \nu; K_y = \nu; \nu_x = \nu; \nu_y = \nu \quad (3.30)$$

3.2.2.6. Parametrización de la turbulencia vertical

Se utilizaron en este trabajo tres modelos diferentes de cierre de turbulencia en la dirección vertical ya implementados en el MARS. En primer lugar se utiliza el modelo de una ecuación del tipo $k-l$ de Gaspar (Gaspar et al., 1990). Por otro lado se utilizan dos modelos de dos ecuaciones, el modelo de cierre de nivel 2.5 de Mellor y Yamada (MY25) denominado modelo $k-kl$, y el modelo tipo $k-\varepsilon$ que comprende el desarrollo de varios autores (Warner et al., 2005).

Se define k como la energía cinética turbulenta según la ecuación 3.31; siendo u', v', w' las componentes de la velocidad turbulenta fluctuante respecto al flujo medio. Se define l como una escala de longitud característica relacionada con el tamaño de los vórtices que dominan el flujo turbulento (longitud de mezcla); ε representa la disipación de energía turbulenta.

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (3.31)$$

3.2.2.6.1. *Modelo de Gaspar*

El modelo de Gaspar calcula los parámetros de turbulencia vertical (viscosidad y difusión) a partir de la energía cinética turbulenta (ecuación 3.32) y la longitud de mezcla l_m determinada algebraicamente.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + w \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial (N_z \frac{\partial k}{\partial z})}{\partial z} + P + A - \varepsilon \quad (3.32)$$

Siendo P el término de producción de energía turbulenta por el corte vertical del flujo dado por ecuación 3.33, A el término de destrucción de energía turbulenta por estratificación según la ecuación 3.34 y ε representa el término de disipación de energía cinética turbulenta que se expresa en función de la longitud de mezcla l según la ecuación 3.35 con $C=0,7$.

$$P = N_z \left(\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right) \quad (3.33)$$

$$A = -K_z \left(\frac{\partial b}{\partial z} \right) \quad (3.34)$$

$$\varepsilon = \frac{Ck^{3/2}}{l_m} \quad (3.35)$$

La viscosidad y difusión turbulenta verticales se relacionan con la energía cinética turbulenta según la ecuación 3.36; siendo c_k una constante igual a 0,1 y l_k la escala de mezcla.

$$K_z = N_z = c_k l_k k^{1/2} \quad (3.36)$$

La escala de mezcla y la longitud de mezcla se evalúan a cada profundidad en función de las relaciones expresadas en 3.37 entre las distancias l_u y l_d , las cuales se definen respectivamente como la distancia a recorrer desde la superficie libre o desde el fondo por una partícula de fluido para convertir su energía cinética turbulenta en

energía potencial. Estas distancias son evaluadas en cada profundidad con las fórmulas 3.38 y 3.39 en las cuales intervienen k y b .

$$l_m = (l_u l_d)^{1/2} ; l_k = \min(l_u, l_d) \quad (3.37)$$

$$\int_z^{z+l_u(z)} (b(z') - b(z)) dz' = k(z) \quad (3.38)$$

$$\int_{z-l_d(z)}^z (b(z) - b(z')) dz' = k(z) \quad (3.39)$$

3.2.2.6.2. Modelo tipo $k-kl$

En este modelo se resuelve además de la ecuación 3.32 de conservación de k presentada anteriormente la ecuación 3.40 para kl , con N_z según la formulación presentada en 3.41 y F_{wall} según la ecuación 3.42, siendo d_b y d_s las distancias al fondo y a la superficie, respectivamente.

$$\frac{\partial(kl)}{\partial t} + w \frac{\partial(kl)}{\partial z} = \frac{\partial \left(N_z \frac{\partial(kl)}{\partial z} \right)}{\partial z} + l(0,9P + 0,9A - 0,5\varepsilon F_{wall}) \quad (3.40)$$

$$K_z = 0,2\sqrt{2kl} \quad (3.41)$$

$$F_{wall} = \left(1 + 1,33 \left(\frac{1}{\kappa} \frac{d_b + d_s}{d_b d_s} \right)^2 \right) \quad (3.42)$$

3.2.2.6.3. Modelo tipo $k-\varepsilon$

Este modelo resuelve las ecuaciones de conservación para k y ε según las ecuaciones 3.43 y 3.44; $\sigma_k^\varepsilon = 1.0$ es el número de Schmidt para la difusión de la energía cinética turbulenta y $\sigma_\varepsilon = 1.3$ es el número de Schmidt para la disipación de la difusión turbulenta.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + w \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial \left(N_z / \sigma_k^\varepsilon \frac{\partial k}{\partial z} \right)}{\partial z} + P + A - \varepsilon \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial \left(N_z / \sigma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right)}{\partial z} + \frac{\varepsilon}{k} (1,44P + A - 1,92\varepsilon) \quad (3.44)$$

3.2.2.7. Resolución numérica

El MARS es un modelo que utiliza el método en diferencias finitas para discretizar las ecuaciones y define una grilla escalonada tipo Arakawa C en las direcciones horizontal y vertical, con un esquema de resolución espacial centrado de segundo orden. De esta forma, la superficie libre y propiedades del agua se definen en los centros de malla, mientras que las componentes de la velocidad se definen en sus bordes. Sobre la dirección vertical, las velocidades horizontales y las concentraciones de sustancias son calculadas en el nivel sigma.

El modelo se construyó en base a la separación de los modos interno y externo. El modo externo que proporciona la elevación de la superficie libre y las corrientes

barotrópicas (promedio vertical) se acopla con el modo interno, que proporciona las corrientes y sustancias en las tres dimensiones. Las ecuaciones de movimiento según los ejes horizontales se desacoplan mediante el método de discretización temporal ADI (Alternate Direction Implicit (Leendertse and Gritton, 1971)), alternando en la dirección de cálculo; en un primer medio paso de tiempo se resuelve el eje x (por fila) y en el siguiente medio paso se resuelve la ecuación en el eje y (por columna). De esta forma la elevación de la superficie libre se calcula cada medio paso de tiempo mientras que las componentes horizontales de la velocidad integradas se calculan alternadamente. Se utiliza un esquema de segundo orden centrado espacialmente y una grilla escalonada tipo C para discretizar el sistema, obteniéndose un sistema tridiagonal que se resuelve utilizando un sistema de factorización LU.

En concreto el procedimiento de acople entre ambos modos consiste en una evaluación del tipo predictor-corrector con un sistema de 7 pasos, utilizando para ambos modos un mismo paso de tiempo, de tipo iterativo que se va ajustando progresivamente durante la resolución de los dos modos (Lazure and Dumas, 2008). Comenzando en $t = n\Delta t$; en el primer paso se resuelve la ecuación integrada en el eje x y se estiman U y η . En el segundo paso se resuelve la ecuación tridimensional utilizando la determinación inicial de η . En el tercer paso se evalúa la convergencia, comparando la distribución vertical de u y U . Si se satisface el criterio en el cuarto paso se estiman los términos implícitos y se realiza una nueva predicción de U y η . En el quinto paso se vuelve a estimar la corriente u en cada capa y en el séptimo paso se evalúa si se satisface el criterio de convergencia. En caso positivo se cuenta con los valores de U , u y η determinados para el instante de tiempo $n + 1/2$. Se realiza el mismo procedimiento con la otra dirección horizontal de cálculo y se resuelve V , v y η para el instante de tiempo $n + 1$.

Los términos de presión asociados a gradientes de presión atmosférica y variación del nivel son términos barotrópicos que se asocian a la propagación de ondas rápidas (ondas de marea y storm surges). La ventaja es que el término de onda de gravedad externa, resuelto de forma semi-implícita, remueve el criterio de estabilidad numérica más exigente ($\Delta t < \Delta x / \sqrt{gD}$) y por tanto le otorga mayor estabilidad al modelo. Esto en la práctica resulta en mayores intervalos de tiempo que los que resultan directamente del criterio. Se utiliza un paso de tiempo adaptativo para resolver el sistema considerando la máxima velocidad horizontal observada en el sistema en un período determinado. El cálculo se realiza entonces con el mayor paso de tiempo aceptado según el criterio de estabilidad CFL. El paso de tiempo se reduce a medida que el criterio no se satisface y se incrementa luego de un cierto período en el cual el criterio se satisface correctamente. No obstante se limita el paso de tiempo según un valor mínimo y máximo dependiente de cada aplicación:

$$\Delta t \frac{\max(u, v)}{\min(\Delta X, \Delta Y)} < C_{critico} = 0.7 \quad (3.45)$$

3.2.3. Implementación del modelo MARS en el Río de la Plata

3.2.3.1. Estructura de modelos encajados

En la implementación definida en el Proyecto FREPLATA-FFEM se propuso un sistema basado en dos niveles de modelos encajados que representan distintas zonas del sistema de estudio, y por lo tanto distintas dinámicas (Figura 3.1). El primer nivel, denominado rank0, es un modelo bidimensional a escala oceánica que simula la propagación de las ondas astronómicas por la región Sur del Océano Atlántico a partir de

un modelo global de marea (FES2004) y también incluye la interacción en la superficie con el forzante atmosférico (vientos y presiones) generando la componente meteorológica de marea y su propagación. El efecto de Coriolis sobre el flujo también se considera. La salinidad y la temperatura del agua se consideran constantes en el tiempo y uniformes en el espacio, no incluyéndose entonces en la modelación el efecto de la interacción de diferentes masas de agua que existe en la zona como por ejemplo la confluencia de la corriente cálida de Brasil con la corriente fría de Malvinas (Palma et al., 2004). El segundo nivel definido, denominado rank1, es un modelo que simula el flujo tridimensional en todo el Río de la Plata y en el Frente Marítimo. Los forzantes considerados son las ondas astronómicas y meteorológicas que provienen del Atlántico Sur (calculadas en el rank0), los caudales fluviales continentales de los Ríos Paraná y Uruguay, y el campo de vientos que actúa sobre la superficie libre. En la dirección vertical se definieron 10 capas. En este nivel las variables calculadas son la elevación de la superficie libre, las velocidades horizontales y la salinidad en las capas verticales.

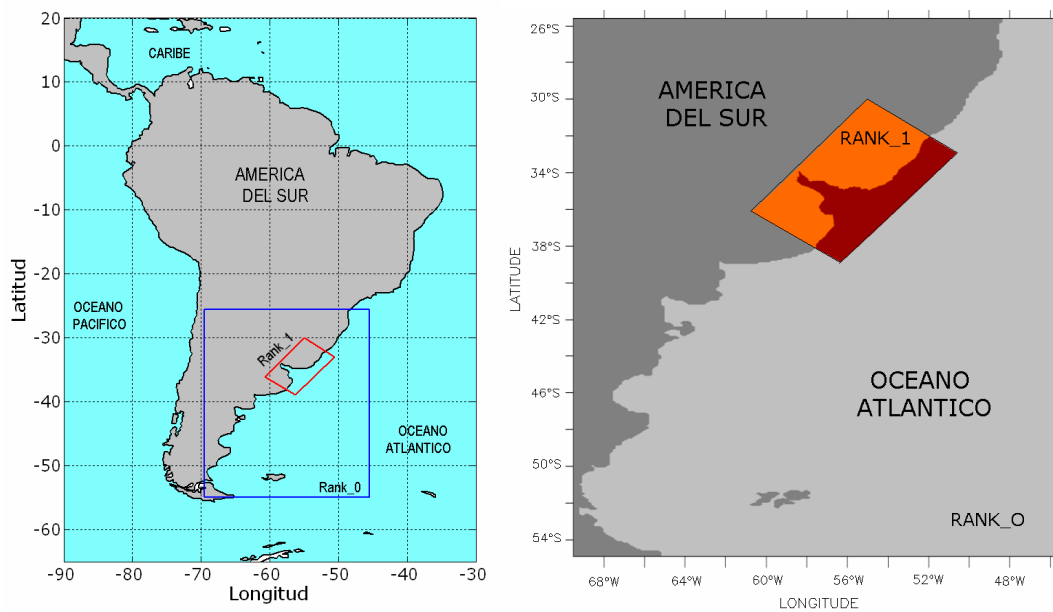


Figura 3.1: Zona de estudio. Dominios definidos en el modelo MARS.

3.2.3.2. Modelo global del Atlántico Sur: rank0

El primer nivel es un modelo a escala oceánica que simula la propagación de las ondas astronómicas por la región Sur del Océano Atlántico y la generación y propagación de ondas meteorológicas resultantes de la interacción con el forzante atmosférico. El dominio de cálculo y la batimetría se presentan en la Figura 3.2.

La batimetría del rank0 fue obtenida a partir de la base de datos del proyecto FREPLATA, derivada de digitalización de cartas náuticas del SHN, las cartas del H50 (Mar Argentino) y H1 (Acceso al Río de la Plata); e información de la base ETOPO5, entre otras (FREPLATA, 2011). La grilla definida para representar el dominio de cálculo es regular de 0.10° en latitud y 0.15° en longitud, lo que aproximadamente forma una grilla de 10 km por 12 km de resolución, respectivamente. La grilla se presenta en la Figura 3.2. Esta resolución es suficiente para representar los procesos de propagación de las ondas en el Atlántico Sur y la interacción y transformación de las mismas en la zona costera argentina. Se define un intervalo temporal variable entre 100 y 600 seg que el modelo determina en función de la estabilidad del sistema.

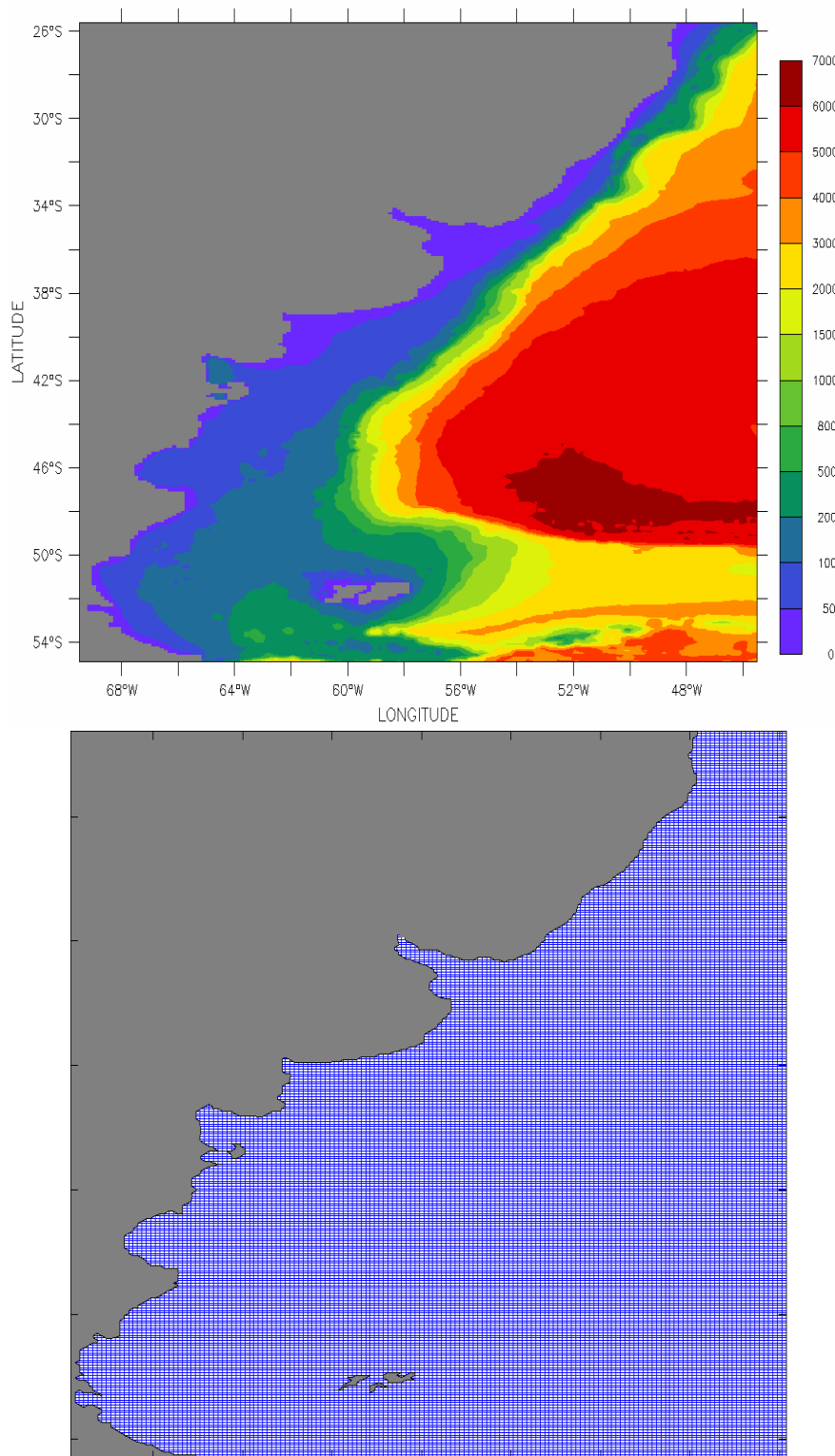


Figura 3.2: Modelo regional (rank0): Dominio de cálculo y batimetría (m) (panel superior); grilla de cálculo (panel inferior).

Los principales forzantes que actúan sobre el dominio representado en el rank0 se introducen a través de las condiciones de borde. En la frontera abierta del dominio, en el borde oceánico, se imponen las características de la marea astronómica del área obtenidas a partir del atlas global de marea FES2004 (Lyard et al., 2006). El modelo calcula el nivel de la superficie libre en la frontera abierta a partir de la interpolación espacial de la composición armónica de las ondas principales obtenidas del modelo

global. En este trabajo se incluyen las 14 componentes principales de marea disponibles: M_2 , K_1 , K_2 , $2N_2$, M_4 , MF , MM , $MSQM$, MTM , N_2 , O_1 , P_1 , Q_1 , S_2 . La salinidad y la temperatura del agua se consideran constantes en el tiempo y uniformes en el espacio en el rank0. Se definieron valores de temperatura del agua igual a 15°C y salinidad de 33 ppm. Finalmente en la superficie se impone la acción del campo de vientos y de presiones a partir de información atmosférica de mesoescala. En este caso se utilizan datos de Re-análisis del National Centers for Environmental Prediction de USA (NCEP), (Kalnay et al., 1996); dicha base de datos surge de una combinación entre datos observados y simulaciones numéricas, siendo su resolución temporal de 6 horas y espacial de 2,5° x 2,5°.

3.2.3.3. Modelo local del Río de la Plata: rank1

El segundo nivel definido es un modelo que simula el flujo tridimensional en todo el Río de la Plata y en el Frente Marítimo. El dominio representado por el rank1 incluye el aporte de los ríos Uruguay y Paraná (en sus dos brazos Paraná Guazú y Paraná Las Palmas), el Río de la Plata en su totalidad y la zona del Frente Marítimo hasta los 200 m de profundidad de la plataforma continental. El área comprendida se presenta en la Figura 3.3. Los límites del dominio de cálculo en la frontera oceánica se ubicaron normales a la costa. De esta forma la frontera abierta se sitúa aproximadamente en forma paralela a la línea Punta Rasa – Punta del Este y la frontera Sur se posiciona de tal manera que la principal componente de marea (la componente M_2) ingresa al dominio de cálculo prácticamente con su frente de onda paralelo a la frontera. Esta condición de ingreso de la onda es favorable para la modelación según estudios anteriores realizados en el IMFIA (Fossati and Piedra-Cueva, 2008; Fossati and Piedra-Cueva, 2013).

La batimetría ingresada al modelo se basó en información cartográfica relevada en el Proyecto FREPLATA-FFEM de la zona del Río de la Plata y de información global tipo GEBCO en la zona exterior. Durante dicho proyecto se aplicaron diversos filtros a la información bruta con el objetivo de mejorar la representación de la batimetría en el modelo (FREPLATA, 2011). Tanto en la Figura 3.3 donde se muestra la batimetría de todo el rank1 como en el detalle de la zona del Río de la Plata presentada en la Figura 3.4(a), se observa se representan correctamente en el modelo las principales características topográficas de la zona, como ser la zona de los Bancos Inglés y Arquímedes, el Canal Oriental y el Canal Marítimo, Barra del Indio y Playa Honda. La grilla definida para representar el dominio de cálculo es regular de 0.027° en latitud y longitud, lo que aproximadamente forma una grilla de 3.000 m de resolución (Figura 3.4(b)). Para representar correctamente los procesos que ocurren en la zona de interés se utiliza un modelo tridimensional con 10 capas en la dirección vertical. Las capas no están equiespaciadas, siendo la posición de las 10 capas verticales sigma las siguientes: 0.05, 0.20, 0.35, 0.50, 0.65, 0.75, 0.85, 0.90, 0.95 y 0.97. Se definió un intervalo temporal variable entre 50 y 300 seg que el modelo determina en función de la estabilidad del sistema. A través de la condición de borde abierta se ingresa la información de marea astronómica y meteorológica proveniente del Atlántico Sur y calculada en el nivel anterior del modelo encajado, es decir, en el modelo rank0. Respecto a las propiedades del agua se impone salinidad constante en la frontera igual a 33 ppm.

Por otro lado el caudal de los ríos Paraná Guazú, Paraná Las Palmas y Uruguay se impone en 3 celdas representativas del ingreso de los mismos al Río de la Plata. Se utilizan valores medios diarios de caudal suministrados por el INA correspondientes a agua dulce, es decir, salinidad nula. La temperatura del agua no es una variable del modelo, sino que se considera fija en todo el dominio de cálculo igual a 15°C. En las primeras versiones del modelo hidrodinámico trabajadas durante el Proyecto FREPLATA-FFEM se incluyeron en la modelación los tramos inferiores de los afluentes del Río de la Plata en la malla de cálculo. De esa manera la dinámica fluvial se

representó ingresando secciones equivalentes calculadas a partir de la información topográfica de diversas secciones de los tributarios. Las secciones transversales de los ríos ingresadas al modelo fueron suministradas por la Dirección de vías navegables de Argentina y el INA realizó un trabajo de georeferenciación (FREPLATA, 2011). En versiones posteriores generadas en éste trabajo no se incluyó en el modelo la modelación de los tramos inferiores de los principales tributarios sino que directamente se ingresó el caudal fluvial en las secciones representativas. El motivo del cambio estuvo vinculado directamente con la modelación de sedimentos finos, siendo para el modelo hidrodinámico aceptable y equivalente el uso de ambas configuraciones. Durante la calibración hidrodinámica se trabajó principalmente con la configuración inicial (denominada rank1_cr) y durante la validación se trabajó principalmente con la configuración sin los ríos (denominada rank1_sr). El detalle en la zona fluvial de ambas configuraciones se presenta en la Figura 3.5.

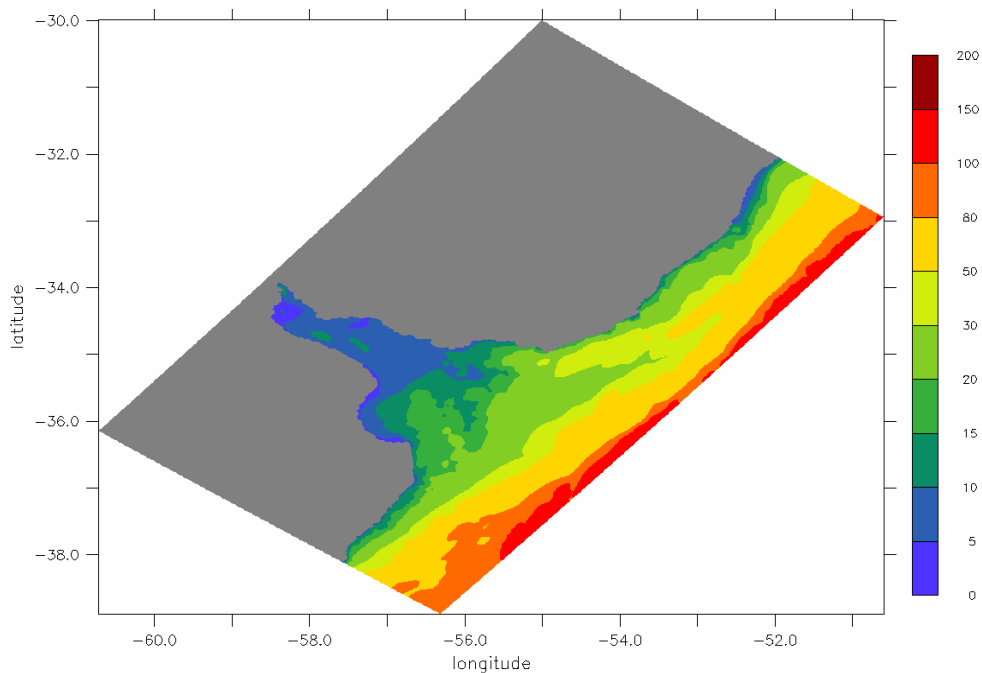


Figura 3.3: Ubicación, dominio de cálculo y batimetría (m) del modelo local (rank1).

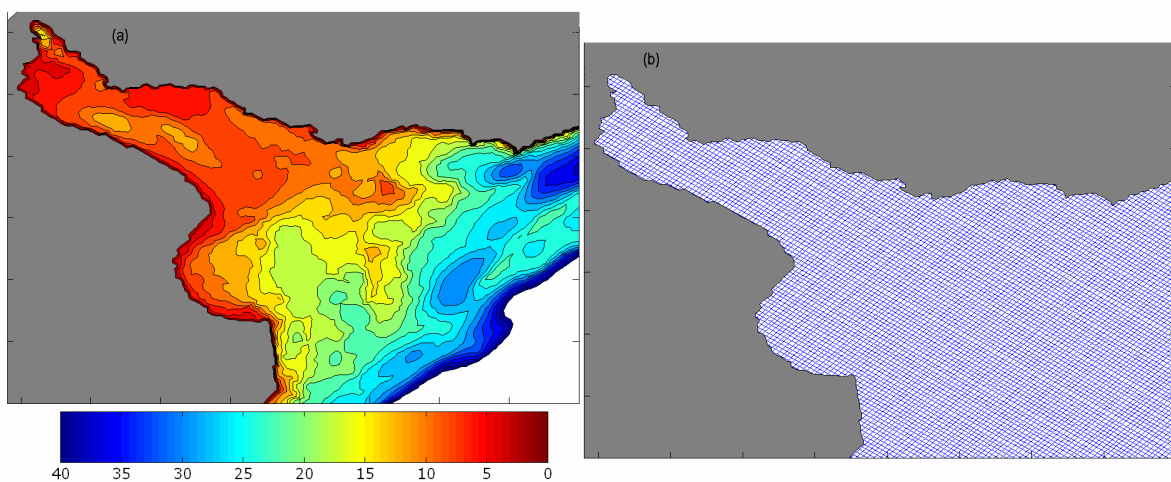


Figura 3.4: Detalle del rank1 en la zona del Río de la Plata (a) batimetría (m) y (b) grilla de cálculo.

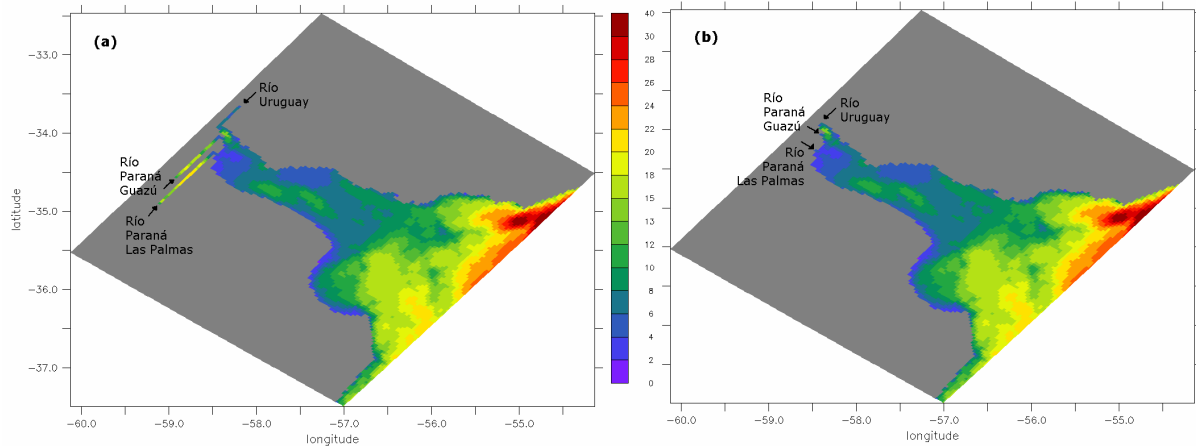


Figura 3.5: Secciones de ingreso de caudales fluviales en (a) la configuración rank1_cr y (b) la configuración rank1_sr. Detalle de batimetría (m) en el Río de la Plata.

Por último en la superficie libre se impone la acción del campo de vientos y de presiones a partir de información atmosférica de mesoescala. Se utilizaron dos bases de datos de Re-análisis de información atmosférica en las diferentes etapas de modelación hidrodinámica. Inicialmente en el marco del Proyecto FREPLATA-FFEM se utilizó la información atmosférica, utilizada en el rank0, proveniente de los Re-análisis NCEP de baja resolución espacial y 6 horas de resolución temporal (Kalnay et al., 1996). Posteriormente en el ajuste de la calibración realizada en este trabajo se utiliza la información del Re-análisis atmosférico global producido por el Centro Europeo de Pronósticos Climáticos (ECMWF) en el marco del proyecto denominado ERA-Interim (Dee et al., 2011). Se utilizó la información de 0,25° de resolución espacial y de 6 horas de resolución temporal. Para facilitar la mención de ambas bases de datos en éste trabajo se denomina vientos NCEP a la base de datos de baja resolución (Kalnay et al., 1996) y vientos CEP a la base de datos de la comunidad europea (Dee et al., 2011).

3.2.4. Calibración y validación del modelo

El modelo hidrodinámico MARS implementado en los dos niveles se viene desarrollando y trabajando desde el año 2008. Durante todo este tiempo diversos tests y etapas fueron llevadas a cabo, la mayoría en el marco del Proyecto FREPLATA-FFEM por el grupo de investigadores participantes (IFREMER, CIMA, INA, IMFIA). Debido a esto no resulta sencillo plasmar todo el proceso y los diversos avances en esta sección. Se opta en cambio por presentar en primer lugar lo que se consideran los principales ajustes realizados (calibración) y en segundo lugar diversos chequeos (validación) del modelo que se realizaron durante la etapa de modelación de sedimentos finos. De esta manera se pretende cuantificar la calidad del modelo hidrodinámico mediante la evaluación de la representación de la hidrodinámica del sistema al comparar con diversos tipos de medidas en el área. Diversas versiones del modelo MARS se han utilizado durante las diversas etapas de trabajo con el modelo hidrodinámico por lo que se especifica la versión utilizada en cada análisis presentado en este trabajo.

3.2.4.1. Metodología utilizada

El trabajo de calibración y validación del modelo hidrodinámico de marea desarrollado puede dividirse en tres etapas. Una Etapa 1 de validación hidrodinámica del rank0, una Etapa 2 de calibración hidrodinámica del rank1 y una Etapa 3 de validación hidrodinámica del rank1. Estas etapas se presentan en mayor detalle en el esquema de la Figura 3.6.

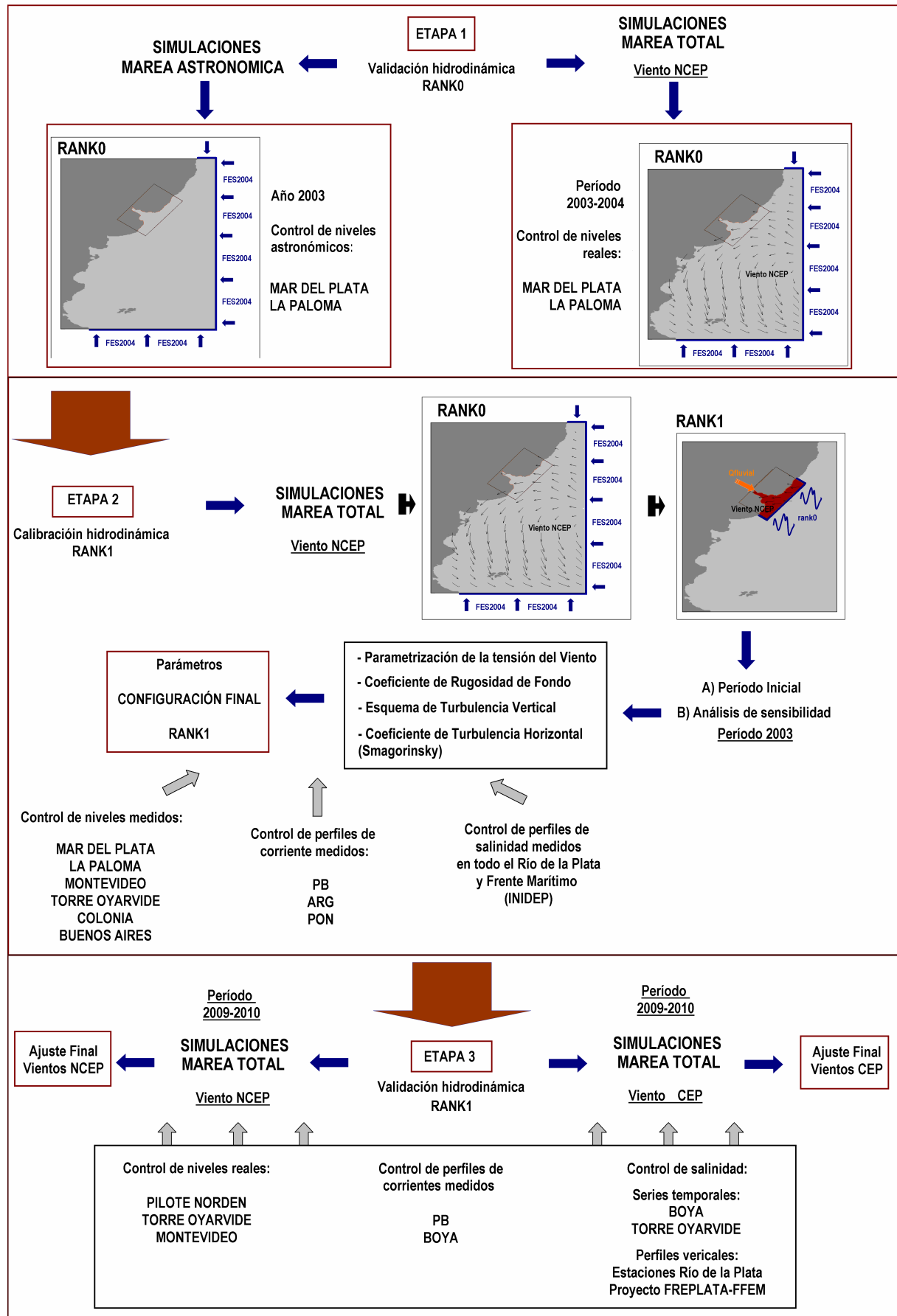


Figura 3.6: Esquema de las características principales de las etapas de calibración y validación de los modelos hidrodinámicos rank0 y rank1 implementados en el MARS.

El modelo bidimensional implementado en el rank0 se calibró durante el Proyecto FREPLATA-FFEM mediante el ajuste del coeficiente de rugosidad de fondo analizando la propagación de la componente principal de marea astronómica M_2 (Fossati et al., 2010; FREPLATA, 2011). Debido a esto la Etapa 1 comprende la validación de los resultados obtenidos con el modelo a partir de los parámetros definidos en dicho Proyecto. En relación al modelo tridimensional implementado en el rank1 se realizaron ambas etapas, la calibración y la validación de los procesos hidrodinámicos representados por el modelo.

Considerando que en el Río de la Plata tanto la marea astronómica como la marea meteorológica son forzantes relevantes para su dinámica, se realizaron dos tipos de simulaciones: simulaciones simples que representan la propagación de la onda astronómica (denominadas simulaciones tipo MA) y simulaciones más complejas en las cuales se le agrega la propagación de la marea meteorológica y por tanto se simula la marea total (denominadas simulaciones tipo MT). En las simulaciones de la onda astronómica el modelo global rank0 es forzado solamente por las condiciones del modelo global de marea astronómica FES2004 y el modelo local rank1 recibe del mismo la onda propagada por el Atlántico Sur, incluyéndose también en éste último caso la descarga fluvial de los tributarios. En las simulaciones completas el modelo global rank0 es forzado por el modelo global FES2004 y por el forzante atmosférico (viento NCEP), y el modelo local rank1 recibe del mismo la onda total (astronómica y meteorológica) propagada por el Atlántico Sur, incluyéndose además como forzantes externos el caudal fluvial de los tributarios y el forzante atmosférico en el dominio.

Diferentes tipos de análisis pueden ser aplicados durante los procesos de calibración y validación de modelos hidrodinámicos bidimensionales y tridimensionales aplicados a cuerpos de agua del tipo estuarino, los cuales se presentan en diversas publicaciones (por ejemplo, Blumberg et al., 1999; Hsu et al., 1999; Larson et al., 2005; Trancoso et al., 2005; Liu et al., 2008; Fossati and Piedra-Cueva, 2013). En este trabajo se realiza por un lado una evaluación cualitativa a partir de la comparación de las series temporales de variables de flujo medidas y obtenidas con el modelo. Por otra parte se realiza una evaluación cuantitativa a partir del cálculo del error medio cuadrático (RMSE) según la formulación 3.46, y del factor de correlación lineal de Pearson dado por la formulación 3.47, entre las series de datos medidos y los respectivos valores obtenidos con el modelo. La propagación de la marea astronómica en el dominio de cálculo se evaluó comparando los principales armónicos obtenidos con el modelo con los principales armónicos de la marea astronómica en la zona (Foreman and Henry, 1989). Las constantes armónicas para la marea en la zona fueron determinadas a partir de series anuales de duración utilizando la herramienta t_tide (Pawlowicz et al., 2002).

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X_0(t_i) - X_m(t_i)]^2 \right\}^{1/2} \quad (3.46)$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N (X_0(t_i) - X_m(t_i))}{\left[\sum_{i=1}^N X_0(t_i)^2 \right]^{1/2} \left[\sum_{i=1}^N X_m(t_i)^2 \right]^{1/2}} \quad (3.47)$$

siendo $X_0(t_i)$ y $X_m(t_i)$ las variables observadas y modeladas, respectivamente, y N es el número de medidas en la serie temporal.

3.2.4.1.1. Etapa 1: Validación hidrodinámica rank0

Debido a la disponibilidad de datos históricos diversos (niveles, corrientes y salinidad) de gran cobertura espacial en el Río de la Plata y el Frente Marítimo, se

seleccionaron los años 2003 y 2004 para ser utilizados en las simulaciones de ajuste del modelo hidrodinámico. La gran cantidad de datos disponibles durante este período se deben principalmente a las campañas de medición realizadas en el marco del Proyecto binacional FREPLATA PNUD/GEF RLA/99/G31.

A partir de la información obtenida con el modelo en las simulaciones tipo MA y MT de los años 2003 y 2004 se evaluó el ajuste del mismo. Los parámetros de base utilizados para la representación de la rugosidad de fondo y tensión del viento son un coeficiente de Strickler $K=30$ y un coeficiente de fricción del viento $C_d=0,0016$. Las simulaciones se realizaron a partir de una condición inicial de reposo. La variable de control utilizada para la evaluación de la calidad del modelo hidrodinámico rank0 es la elevación de la superficie libre. A pesar de que el dominio rank0 cubre una gran área que incluye el Atlántico Sur, el interés de este trabajo de modelación se centra en el Río de la Plata y el Frente Marítimo, y el control de los valores obtenidos con el modelo se realiza solamente en dicha zona. Se utilizaron los datos de las estaciones mareográficas de la zona externa del Río de la Plata, Mar del Plata y La Paloma. El control de la marea astronómica se realizó a partir de la comparación de las componentes armónicas principales de los niveles simulados (simulación tipo MA) durante el año 2004 con las componentes armónicas teóricas obtenidas del análisis armónico de las series anuales de niveles registrados con frecuencia horaria en ambas estaciones. El control de la marea total se realizó a partir de la comparación directa de los niveles simulados (simulación tipo MT) con los niveles medidos en ambas estaciones mareográficas durante dos períodos de tiempo; entre el 1° de enero y el 18 de marzo del 2003, y entre diciembre 2003 a noviembre 2004.

3.2.4.1.2. Etapa 2: Calibración hidrodinámica rank1

La aproximación utilizada para calibrar el modelo 3D MARS implementado en el rank1 consiste en lograr que los valores determinados con el modelo de las variables de flujo coincidan con las medidas de campo, dentro de rangos aceptables de aproximación, mediante un procedimiento de ajuste de los diversos parámetros de calibración.

La condición inicial establecida en el rank1 es el reposo y agua salada (33 ppm) en todo el dominio. Una vez impuestos los forzantes el flujo se inicia y estabiliza rápidamente. No obstante debido al gran tamaño del dominio simulado para alcanzar un campo salino representativo es necesario realizar una simulación inicial previa de más de 6 meses de duración a partir de la condición inicial establecida. Durante el trabajo de calibración se trabajó con el año 2003 utilizando como período previo la simulación de todo el año 2002. El caudal fluvial descargado por los tributarios en el Río de la Plata incluidos en el rank1 para los años 2002 y 2003 se presenta en la Figura 3.7. El caudal medio total ingresado durante dicho período es igual a 25.560 m³/s.

Como primera etapa se establecieron como parámetros de referencia una rugosidad absoluta $z_{oh}=0,001$ m, y un valor del coeficiente de Smagorinsky $C=0,27$ y se evaluó la representación de la marea astronómica en todo el Río de la Plata. Se compararon las componentes armónicas de marea obtenidas con el modelo simulando el año 2003 con las componentes armónicas obtenidas de series anuales de niveles horario medidas en las estaciones de Mar del Plata, La Paloma, Punta del Este, Montevideo, Buenos Aires y Colonia. Los resultados preliminares (no presentados) fueron aceptables. A partir de esta situación de referencia se realiza la calibración hidrodinámica considerando la marea total y finalizado el proceso se realiza el chequeo y evaluación de la representación astronómica.

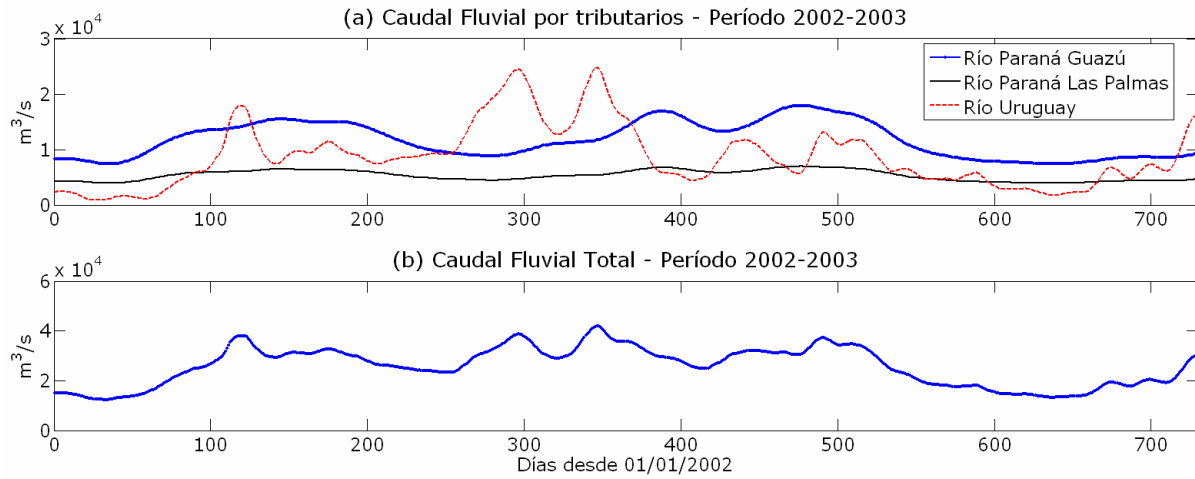


Figura 3.7: Variación temporal del caudal medio diario de (a) cada uno de los tributarios del Río de la Plata y (b) total, durante los años 2002 y 2003.

Para la calibración se realizaron diversos análisis de sensibilidad utilizando simulaciones completas (tipo MT), es decir, simulando las ondas astronómicas y meteorológicas. La estrategia en el análisis fue la realización de diversas simulaciones (7) modificando un sólo parámetro a la vez de forma de poder identificar claramente el efecto específico de dicho parámetro en los resultados del modelo. En concreto se modificaron: a) la forma de representar la fricción del viento sobre la superficie libre; b) la forma de representar la rugosidad de fondo sobre el flujo; c) la parametrización de la turbulencia vertical en la columna de agua, y d) el valor del coeficiente de Smagorinsky utilizado en su formulación de la turbulencia horizontal en toda la columna de agua. En cada uno de los análisis se controlaron resultados en niveles, perfiles de corriente y perfiles de salinidad, comparando valores calculados por el modelo con datos medidos. Las simulaciones se realizaron para el año 2003 implementado en el MARS considerando como forzantes el caudal fluvial medido de los ríos Paraná y Uruguay, el viento NCEP y las ondas de marea total provenientes del Océano Atlántico del rank0. El paso de tiempo en todas las simulaciones es variable entre 200 y 300 seg. En la Tabla 3.1 se presentan los parámetros principales y nomenclatura utilizada en las diversas simulaciones realizadas durante los análisis de sensibilidad del modelo hidrodinámico. La configuración de referencia corresponde a los parámetros iniciales de partida testeados con la simulación de marea astronómica.

PARAMETROS				
Simulaciones	Fricción del viento	Coefficiente de Rugosidad de fondo	Turbulencia vertical	Turbulencia horizontal (Smagorinsky)
Referencia	$C_d = 0.0016$	$z_{0h} = 0.001$	Modelo 1 ec Gaspar	$C = 0.27$
p1	$C_d = 0.002$	$z_{0h} = 0.001$	Modelo 1 ec Gaspar	$C = 0.27$
p2	Formulación Large & Pond	$z_{0h} = 0.001$	Modelo 1 ec Gaspar	$C = 0.27$
p3	$C_d = 0.0016$	$z_{0h} = 0.001$	Modelo 2 ec $k-\kappa$	$C = 0.27$
p4	$C_d = 0.0016$	$z_{0h} = 0.001$	Modelo 2 ec $k-\epsilon$	$C = 0.27$
p5	$C_d = 0.0016$	$z_{0h} = 0.0001$	Modelo 2 ec $k-\epsilon$	$C = 0.27$
p6	$C_d = 0.0016$	$z_{0h} = 0.0001$	Modelo 2 ec $k-\epsilon$	$C = 0.10$
p7	$C_d = 0.0016$	$z_{0h} = 0.0001$	Modelo 2 ec $k-\epsilon$	$C = 0.10$

Tabla 3.1: Parámetros utilizados en las distintas simulaciones del tipo MR realizadas en el análisis de sensibilidad del modelo hidrodinámico del rank1.

Las comparaciones con los datos se realizaron en diversos subperíodos del año 2003 en función de la disponibilidad de los mismos. En el caso de niveles los datos son mediciones horarias de mareógrafos del SOHMA (La Paloma, Montevideo y Colonia) o del SHN (Mar del Plata, Torre Oyarvide y Buenos Aires). En el caso de corrientes se utilizaron mediciones de intensidad y dirección de corrientes en diversos puntos de la vertical realizados con 3 ADCPs (Acoustic Doppler Current Profilers): PON (35°02'S, 55°51'W) ubicado del lado uruguayo y ARG (35°40'S, 56°30'W) ubicado del lado argentino, realizados por FREPLATA (Simionato et al., 2005) y en un punto ubicado a 3 km de la costa de Montevideo PB (34° 57' 36" S, 56°09' 39" W), cuyas mediciones han sido realizadas por la Intendencia Municipal de Montevideo (IMM) en cooperación con el SOHMA (Fossati et al., 2009). Los tres equipos fueron fondeados en el lecho del Río de la Plata y tomaron mediciones desde el fondo hacia la superficie del fujo en la columna de agua. En la Figura 3.8 se muestran las celdas de control utilizadas como representativas de los puntos de medición de los niveles y corrientes. Las mediciones en ARG son de una resolución vertical de 0,5 m a partir de 1 m desde el fondo y una resolución temporal de 10 minutos. Las mediciones en PON tienen una resolución vertical de 0,5 m a partir de 1,5 m desde el fondo y una resolución temporal de 10 minutos. Las mediciones en PB tienen una resolución vertical de 0,35 m a partir de 1,27 m con una resolución temporal de 30 minutos. Este es el mismo equipo que se mencionó en el Anexo A.1 en relación a mediciones indirectas de concentración de sedimento en suspensión.

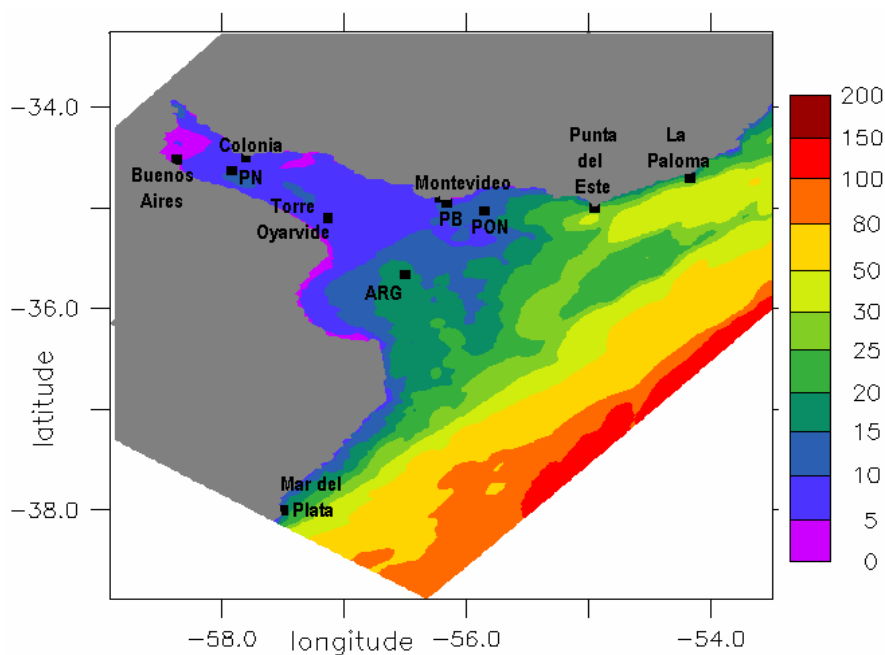


Figura 3.8: Ubicación de los puntos de medición de niveles y de perfiles de corriente en el rank1. Batimetría en metros.

Respecto a los datos de salinidad se utilizaron perfiles verticales instantáneos medidos por el INIDEP durante diversos días del año 2003. En la Figura 3.9 se muestra la ubicación de los puntos donde se hicieron perfiles y los meses a los cuales corresponden. En general son puntos que se hacen durante campañas de algunos días en distintas zonas del Río de la Plata y por eso se agrupan espacialmente según el mes de la campaña a la cual corresponden. Se observa por ejemplo que los datos correspondientes al mes de junio fueron recolectados en la zona de mezcla del campo salino sobre la costa uruguaya.

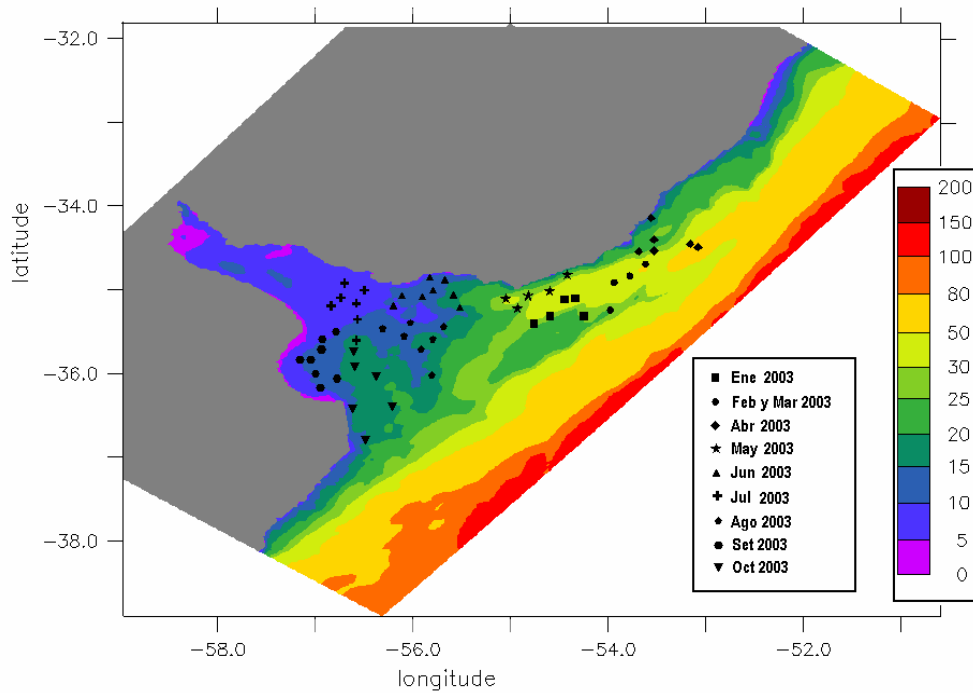


Figura 3.9: Ubicación de los puntos de medición de salinidad en el rank1. Batimetría en metros.

Para la comparación de las series temporales de niveles y velocidades se utilizaron métodos cualitativos como gráficas de comparación de series temporales y también métodos cuantitativos como el error medio cuadrático y la correlación. La comparación de las medidas de salinidad (perfiles instantáneos) con los resultados del modelo se realiza solamente cualitativamente graficando los perfiles, a partir de los cuales se evalúa por un lado la similitud del rango de salinidad que muestra el modelo en relación a las medidas, así como también la forma de los perfiles y por tanto el nivel de estratificación.

La comparación de los campos de corrientes en las tres estaciones se realizó para varias profundidades. Para esto es necesario tomar algunas hipótesis ya que las mediciones se realizan para determinadas profundidades que permanecen constantes durante el período de medición y en cambio los resultados obtenidos con el modelo son el campo de corrientes a lo largo del período de simulación pero en las capas de resolución vertical tipo sigma, lo que significa que corresponden a distintas profundidades en función de la variación de la superficie libre. Debido a esto, para realizar la comparación se selecciona el bin (celda de registro de los ADCPs) más representativo para la capa del modelo, teniendo en cuenta la profundidad de las mismas. Tanto la numeración de capas del modelo como de los bin de las mediciones es ascendente desde el fondo hacia la superficie, lo que significa que el Bin1 y la capa1 corresponden al fondo.

3.2.4.1.3. Etapa 3: Validación hidrodinámica rank1

La validación del modelo hidrodinámico se realiza utilizando las simulaciones del período denominado en este trabajo “Período Actual”, formado por los años 2009 y 2010. El caudal fluvial descargado por los tributarios en el Río de la Plata durante los años 2009 y 2010 se presenta en la Figura 3.10. El valor promedio del caudal total ingresado para el período simulado es igual a 24.590 m³/s. Durante este período se cuenta con la nueva información de campo medida durante el Proyecto FREPLATA-FFEM (analizada en el Capítulo 2); la ubicación de las estaciones de monitoreo en la grilla del rank1 del modelo se presenta en la Figura 3.11.

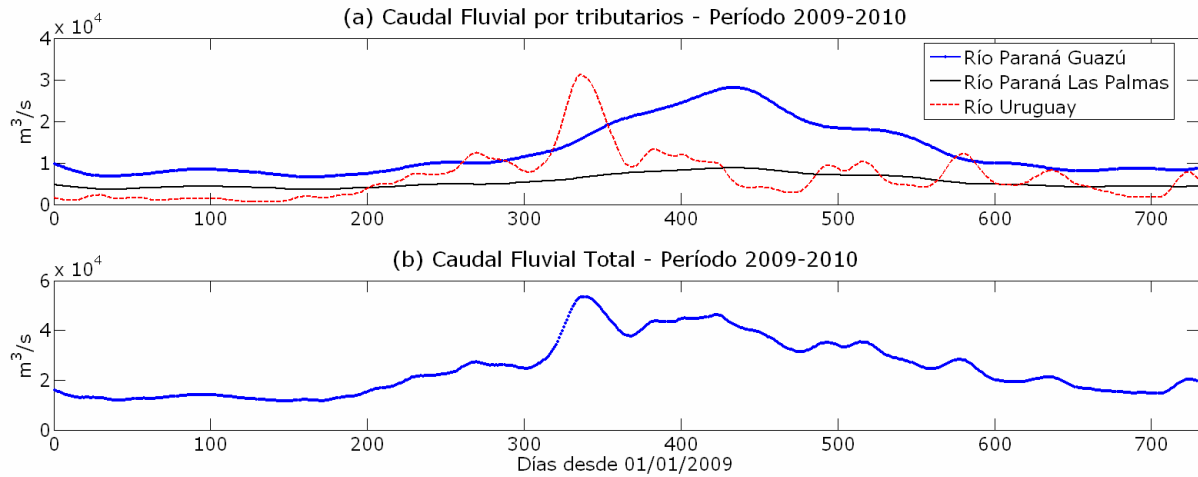


Figura 3.10: Variación temporal del caudal medio diario de (a) cada uno de los tributarios del Río de la Plata y (b) total, durante los años 2009 y 2010.

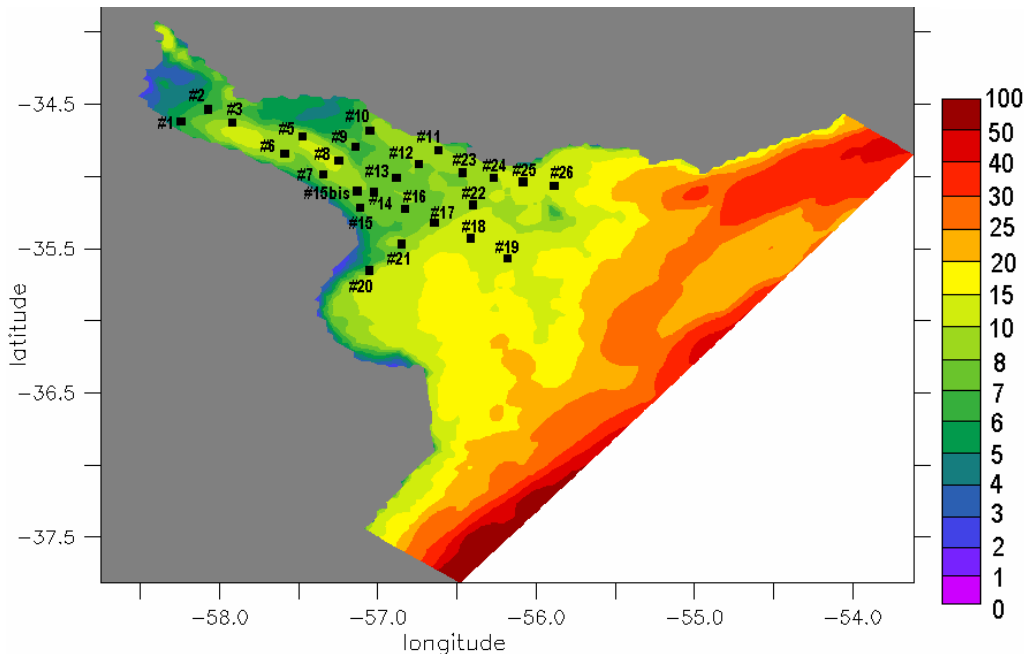


Figura 3.11: Celdas de control definidas en la grilla rank1 del modelo del Río de la Plata representativas de las estaciones de monitoreo de las campañas del Proyecto FREPLATA-FFEM. Batimetría en metros.

Específicamente en relación a información vinculada a la hidrodinámica de marea se cuenta con niveles medidos en Pilote Norden y Torre Oyarvide, corrientes medidas en PB (Montevideo) y en la Boya Oceanográfica, perfiles de salinidad en varias estaciones de control en la zona exterior del Río de la Plata y series continuas de salinidad medidas en la Boya y en Torre Oyarvide. En la Tabla 3.2 se señalan los meses para los cuales se cuenta con información válida de los diferentes tipos de medidas consideradas y que se utilizan en la etapa de validación para comparar con el modelo y evaluar el ajuste. Se aclara las mediciones de niveles en Pilote Norden durante el año 2009 provienen de información adquirida por la empresa Riovía S.A. Las estrategias de comparación de resultados del modelo con los datos disponibles son las mismas que las utilizadas durante la calibración, es decir, comparación visual cualitativa a través de gráficos y cálculo de los errores medios cuadráticos y coeficientes de correlación entre las distintas series.

Medición	Estación	MESES DEL AÑO 2009												MESES DEL AÑO 2010											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Nivel	Pilote Norden Torre Oyarvide Montevideo	[Gráfico de disponibilidad de datos para Nivel en 2009]												[Gráfico de disponibilidad de datos para Nivel en 2010]											
Corrientes	PB BOYA	[Gráfico de disponibilidad de datos para Corrientes en 2009]												[Gráfico de disponibilidad de datos para Corrientes en 2010]											
Salinidad	#16 a #26	[Gráfico de disponibilidad de datos para Salinidad en 2009]												[Gráfico de disponibilidad de datos para Salinidad en 2010]											

Tabla 3.2: Disponibilidad de datos de niveles, perfiles de corriente y salinidad durante los años 2009 y 2010 para comparar con los resultados del modelo rank1.

La etapa de validación se realizó inicialmente con la misma base de información de vientos utilizada en la calibración, es decir, los vientos NCEP. Sin embargo, debido a la mayor calidad de los vientos CEP y la mejor representación del campo de oleaje generada por los mismos (ver sección 3.3), se exploró la posibilidad de evaluar el modelo hidrodinámico de marea forzado también por los vientos CEP. Luego de realizados ciertos test preliminares, donde se evaluaron los parámetros definidos en la calibración con los vientos NCEP, se definieron ciertas variaciones de los parámetros requeridas al utilizar los vientos CEP. Debido a esto, se realizó otra validación del modelo utilizando los vientos CEP. De esta manera se cuenta con una doble calibración y validación del modelo hidrodinámico de marea, dependiendo del forzante de viento utilizando (información NCEP ó CEP), con un conjunto de parámetros seleccionados con los cuales se obtiene una buena representación de la dinámica a partir de las dos fuentes de información del campo de vientos.

3.2.4.2. Resultados obtenidos

3.2.4.2.1. Etapa 1: Rank0 – Marea astronómica (V8.07)

En la Figura 3.12 se presentan los resultados del modelo astronómico obtenidos en Mar del Plata. En el gráfico superior se presenta el nivel calculado por el modelo obtenido como la superposición de las componentes principales de marea representadas con el modelo (componentes del modelo FES2004) comparado con el nivel astronómico calculado a partir de las medidas como la superposición de las mismas componentes armónicas en el lugar. En los restantes gráficos se presenta la comparación de cada uno de los armónicos principales calculados por el modelo con los obtenidos a partir de las mediciones de niveles en Mar del Plata.

Los resultados muestran que básicamente el modelo representa correctamente las características astronómicas de la elevación de la superficie libre en la zona de Mar del Plata. En el detalle por componente se observa que la mayoría de las componentes se representan correctamente, tanto en fase como en amplitud, como ser la M_2 , la O_1 , la N_2 , la Q_1 y la K_2 . La componente S_2 es la más sobreestimada y la componente K_1 subestimada. El mayor desfase se observa en la componente de alta frecuencia M_4 generada en el dominio de cálculo por la combinación de las ondas astronómicas largas.

En la Tabla 3.3 se muestran los valores de las amplitudes y fases de las componentes armónicas de marea obtenidas de las medidas y con el modelo en Mar del Plata. También se muestra el error medio cuadrático (RMSE) correspondiente a la comparación de ambas series para cada componente en Mar del Plata. Debido a diferencias en la fase en algunas componentes el error es significativo aunque la amplitud se represente correctamente (por ejemplo para M_4), mientras que en otros casos el error es más importante por diferencias en la amplitud (K_1 y S_2 por ejemplo). El RMSE obtenido al comparar la serie obtenida con la superposición de las componentes armónicas principales es 0,095 m, lo que representa en relación a la máxima amplitud en Mar del Plata un 11% de la señal astronómica.

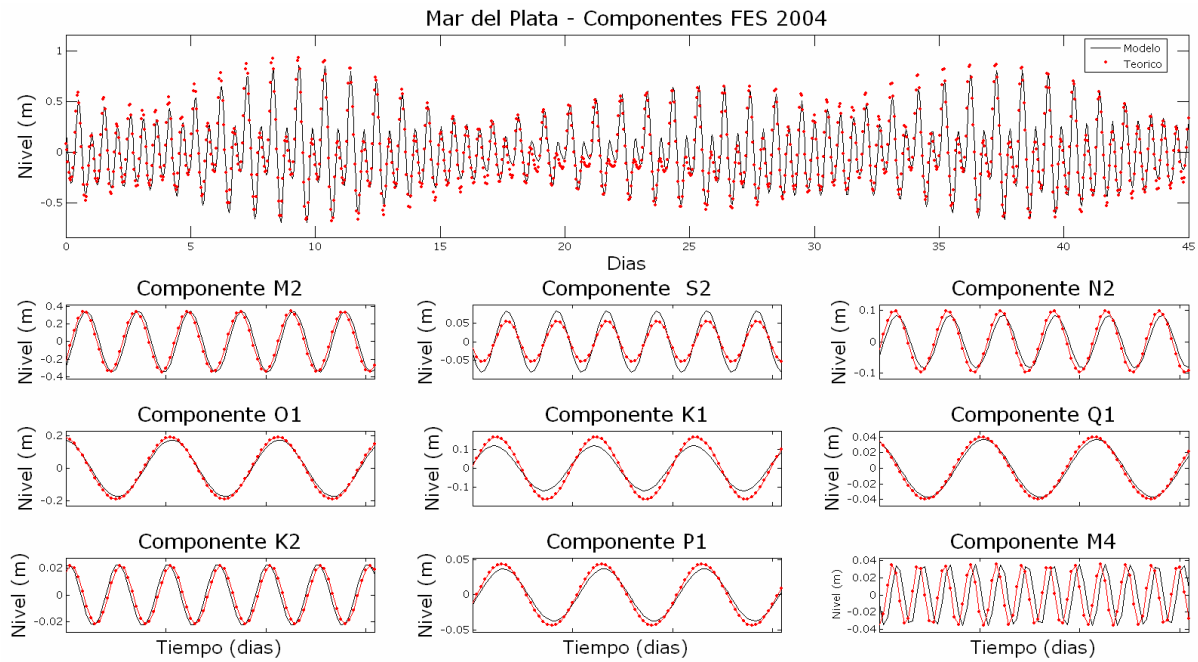


Figura 3.12: Comparación de la serie astronómica de niveles medida y obtenida con el modelo rank0 en Mar del Plata: para la composición de las componentes principales ingresadas al dominio por el modelo FES y para cada componente armónica principal.

		MAR DEL PLATA			LA PALOMA		
		Medida	Modelo	RMSE (m)	Medida	Modelo	RMSE (m)
M₂	Ampl (m)	0.347	0.353	0.066	0.117	0.149	0.044
	Fase (°)	212.7	228.0		213.1	236.9	
K₁	Ampl (m)	0.162	0.116	0.036	0.050	0.082	0.041
	Fase (°)	124.1	116.2		68.56	109.84	
S₂	Ampl (m)	0.055	0.084	0.021	0.021	0.039	0.015
	Fase (°)	281.8	276.5		328.4	308.2	
O₁	Ampl (m)	0.181	0.165	0.015	0.046	0.090	0.034
	Fase (°)	33.7	37.4		33.7	40.9	
M₄	Ampl (m)	0.036	0.037	0.027	0.072	0.059	0.052
	Fase (°)	358.5	63.9		22.2	90.5	
N₂	Ampl (m)	0.100	0.086	0.021	0.059	0.054	0.015
	Fase (°)	174.5	190.6		183.9	204.3	
Q₁	Ampl (m)	0.039	0.036	0.004	0.015	0.021	0.005
	Fase (°)	357.1	3.3		40.8	27.6	
P₁	Ampl (m)	0.044	0.037	0.006	0.011	0.029	0.014
	Fase (°)	105.5	112.2		83.1	110.6	
K₂	Ampl (m)	0.021	0.022	0.005	0.010	0.010	0.004
	Fase (°)	293.7	274.5		336.2	306.9	

Tabla 3.3: Amplitudes y fases de las componentes armónicas principales (medidas y calculadas por el modelo) y errores asociados obtenidos con el modelo rank0 en Mar del Plata y La Paloma.

La oscilación astronómica en La Paloma es menor a la oscilación en Mar del Plata; los resultados obtenidos se presentan en la Figura 3.13. La elevación de la superficie libre generada por las componentes astronómicas principales en el lugar no supera los 0,3 m. Los resultados muestran que la elevación obtenida de la superposición

de los armónicos principales del modelo supera los niveles astronómicos calculados a través de las medidas. El detalle de las características de cada armónico (medidos y modelados en La Paloma) se presenta en la Tabla 3.3. Salvo las componentes M_4 , N_2 y K_2 el modelo sobrestima la amplitud del resto de las ondas principales. Se observa también un leve desfase en varias componentes. En consecuencia los errores medios cuadráticos obtenidos son más importantes proporcionalmente a cada componente que los obtenidos en Mar del Plata. El RMSE correspondiente a la serie global de las componentes ingresadas a partir del modelo FES2004 es igual a 0,09 m. La amplitud máxima de la envolvente teórica es 0,33 m por lo que la relación del error respecto a la amplitud de la onda es del 27%.

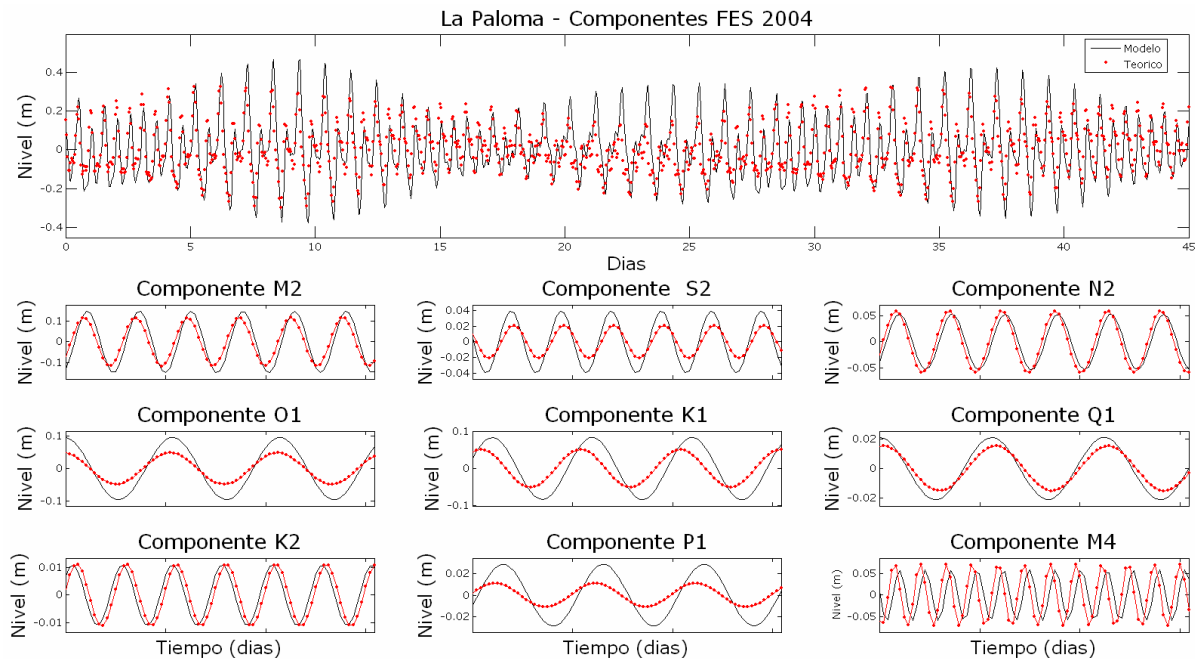


Figura 3.13: Comparación de la serie astronómica de niveles medida y obtenida con el modelo rank0 en La Paloma: para la composición de las componentes principales ingresadas al dominio por el modelo FES y para cada componente armónica principal.

3.2.4.2.2. Etapa 1: Rank0 – Marea total (V8.07)

Una vez ajustada la propagación de las ondas astronómicas se agregó en la modelación el efecto atmosférico sobre el Atlántico Sur. Las características de los dos campos atmosféricos (viento y presiones) utilizados en la zona de interés se obtienen de la base de datos proveniente de los Reanálisis de NCEP frecuentemente utilizada para estudios de diagnóstico de eventos pasados. El dominio definido se extiende entre los 70°W y 42°W de longitud, y entre los 65°S y 20°S de latitud, y la información contenida tiene una resolución espacial de 2,5° tanto en latitud como en longitud. La resolución temporal de los datos atmosféricos es cada 6 horas.

Para evaluar la calidad del modelo se controla nuevamente el nivel modelado en Mar del Plata y La Paloma, comparando los resultados del modelo con medidas reales. Dos períodos de tiempo fueron utilizados para analizar el ajuste del modelo. Por un lado el comprendido entre el 1° de enero y el 18 de marzo del 2003, y el segundo desde diciembre 2003 a noviembre 2004 inclusive. Como ejemplo se presenta en la Figura 3.14 la comparación de niveles medidos y obtenidos con el rank0 del modelo en Mar del Plata durante enero 2003. Se observa que el modelo en general reproduce correctamente las fluctuaciones de la superficie libre. En la misma figura se presenta el ajuste del nivel

obtenido en La Paloma para febrero 2003. Se observa que las fluctuaciones de los niveles son en general representados por el modelo, ya sea períodos de niveles altos o períodos de niveles bajos. Sin embargo en algunos períodos hay diferencias importantes entre ambas series. El nivel del ajuste obtenido para el período 2003 se mantiene en el ajuste del nivel durante el período del 2004, mucho más extenso, (enero a noviembre exceptuando setiembre por falta de datos). En el Anexo B.1 se presenta la comparación de las series temporales de elevación de la superficie, medidas y obtenidas con el modelo, para algunos meses del período 2004 en ambas estaciones de control. Para cada uno de los períodos de tiempo considerados se calculó el RMSE entre ambas series, y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.4. Los mayores errores se observan en La Paloma pero en ambas estaciones el error en la representación del nivel es menor a 20 cm, en el modelo de baja resolución rank0.

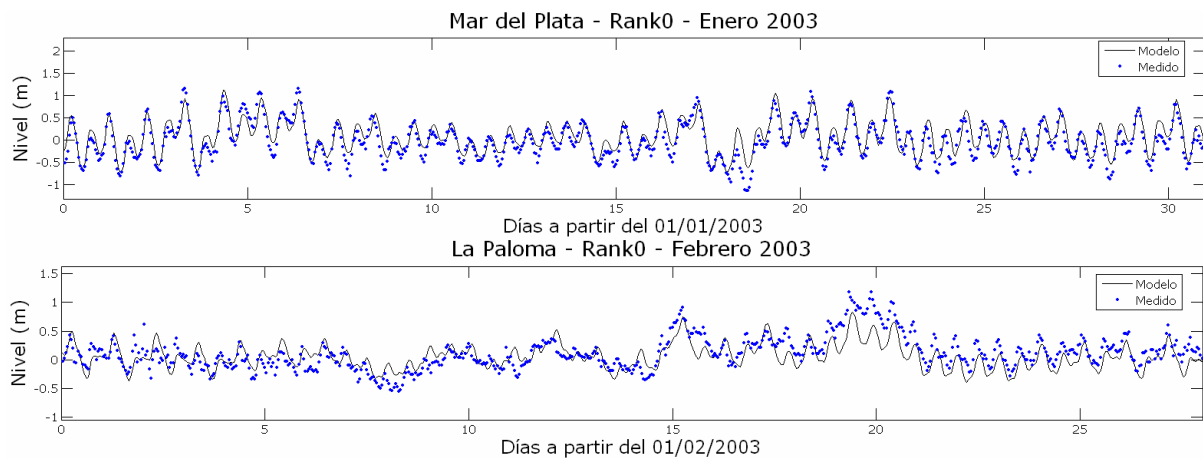


Figura 3.14: Comparación de los niveles medidos y obtenidos con el modelo rank0 en Mar del Plata para enero 2003 (panel superior) y en La Paloma para febrero de 2003 (panel inferior).

PERIODO	MAR DEL PLATA	LA PALOMA
	RMSE (m)	RMSE (m)
2003	0.1722	0.1996
2004	0.1847	0.1974

Tabla 3.4: Errores (RMSE) del modelo hidrodinámico rank0 en el ajuste de niveles medidos en Mar del Plata y La Paloma.

3.2.4.2.3. Etapa 2: Rank1 – Calibración (V8.07 y Vr977)

Las diversas modificaciones en los parámetros del modelo generan diferentes soluciones de las variables simuladas. Para cada una de las simulaciones realizadas (Tabla 3.1) se compararon los resultados obtenidos con el modelo en niveles, corrientes y perfiles de salinidad, con los datos correspondientes. Los resultados completos se presentan en el Informe del IMFIA para el Proyecto FREPLATA-FFEM (IMFIA, 2010), extrayendo una síntesis de resultados para presentar en éste trabajo.

En términos generales el modelo representa correctamente las fluctuaciones de los niveles y las características generales de los perfiles de corriente en todo el Río de la Plata y el Frente Marítimo. Variaciones de los parámetros vinculados con la fricción del viento y de la rugosidad de fondo muestran variaciones en el ajuste de niveles, principalmente en la zona interior. Analizando el RMSE el menor valor se obtiene en niveles para la configuración p3, pero la desviación estándar de los datos se representa mejor con la configuración p5. En relación al campo de corrientes los resultados

muestran una leve variación de los valores calculados por el modelo al modificar los parámetros pero no se obtienen cambios cuantitativos importantes en la distribución vertical del campo de corrientes en los puntos analizados. En términos generales la estructura de los perfiles se representa adecuadamente pero en las capas superficiales en general el ajuste es de menor calidad. En este sentido las limitaciones están asociadas a la resolución de la batimetría (asociada al tamaño de celda) y a la resolución espacial del campo de vientos pero principalmente a la resolución temporal del mismo, igual a 6hs. Posiblemente existan variaciones del campo de vientos en distintas zonas del dominio que afectan al campo de corrientes pero que el modelo no puede representar por no tener el forzante adecuado. En este sentido para mejorar el ajuste de los perfiles de corriente se deberá incrementar la resolución y utilizar algún modelo atmosférico de mayor resolución para transferir al modelo local otros efectos de menor escala que en la configuración actual no se están incluyendo. En relación a la salinidad se observó una gran sensibilidad a la mayoría de los parámetros analizados, principalmente los vinculados con viento, rugosidad y turbulencia vertical. Claramente el esquema vertical de turbulencia influye directamente en el esquema de mezcla y estratificación. En términos generales las configuraciones p3 y p4 muestran resultados aceptables, con una buena representación de la salinidad en la mayor parte de la zona de mezcla así como también del nivel de estratificación. No obstante es importante mencionar que la comparación utilizada es sumamente exigente para el modelo.

Como resultado de la calibración realizada se seleccionó la parametrización p5 como la que mejor representa la hidrodinámica para los forzantes y resolución seleccionados. Los parámetros estadísticos obtenidos para la configuración final en las estaciones de control se presentan en la Tabla 3.5, y en la Figura 3.15 se presenta la comparación de la variación temporal de niveles medidos y obtenidos con el modelo para enero 2003. Se observa se representa correctamente la tendencia general de los niveles en todo el Río de la Plata, tanto los niveles astronómicos como la mayoría de los eventos meteorológicos importantes como el observado alrededor del día 18 de enero. El máximo error absoluto se obtiene en Buenos Aires (0,37 m) y la mínima correlación se obtiene en Colonia igual a 0,72.

	Desviación estándar Datos (m)	Desviación estándar modelo (m)	RMSE (m)	Correlación
Mar del Plata	0.42	0.3	0.2	0.9
La Paloma	0.29	0.26	0.17	0.81
Montevideo	0.39	0.35	0.24	0.79
Torre Oyarvide	0.47	0.45	0.26	0.84
Colonia	0.48	0.38	0.33	0.72
Buenos Aires	0.54	0.48	0.37	0.75

Tabla 3.5: Parámetros estadísticos calculados para la representación con el modelo ajustado de los niveles medidos en las estaciones mareográficas de control.

La calidad del ajuste del campo de corrientes en las estaciones PB, ARG y PON con la configuración seleccionada se presenta en las Tablas 3.6, 3.7 y 3.8, respectivamente. En las capas de fondo la representatividad del modelo es mayor, siendo mayores las diferencias con los datos en las capas superficiales. Las desviaciones estándar de las componentes de corriente que muestran los datos en general son mayores a las que muestra el modelo.

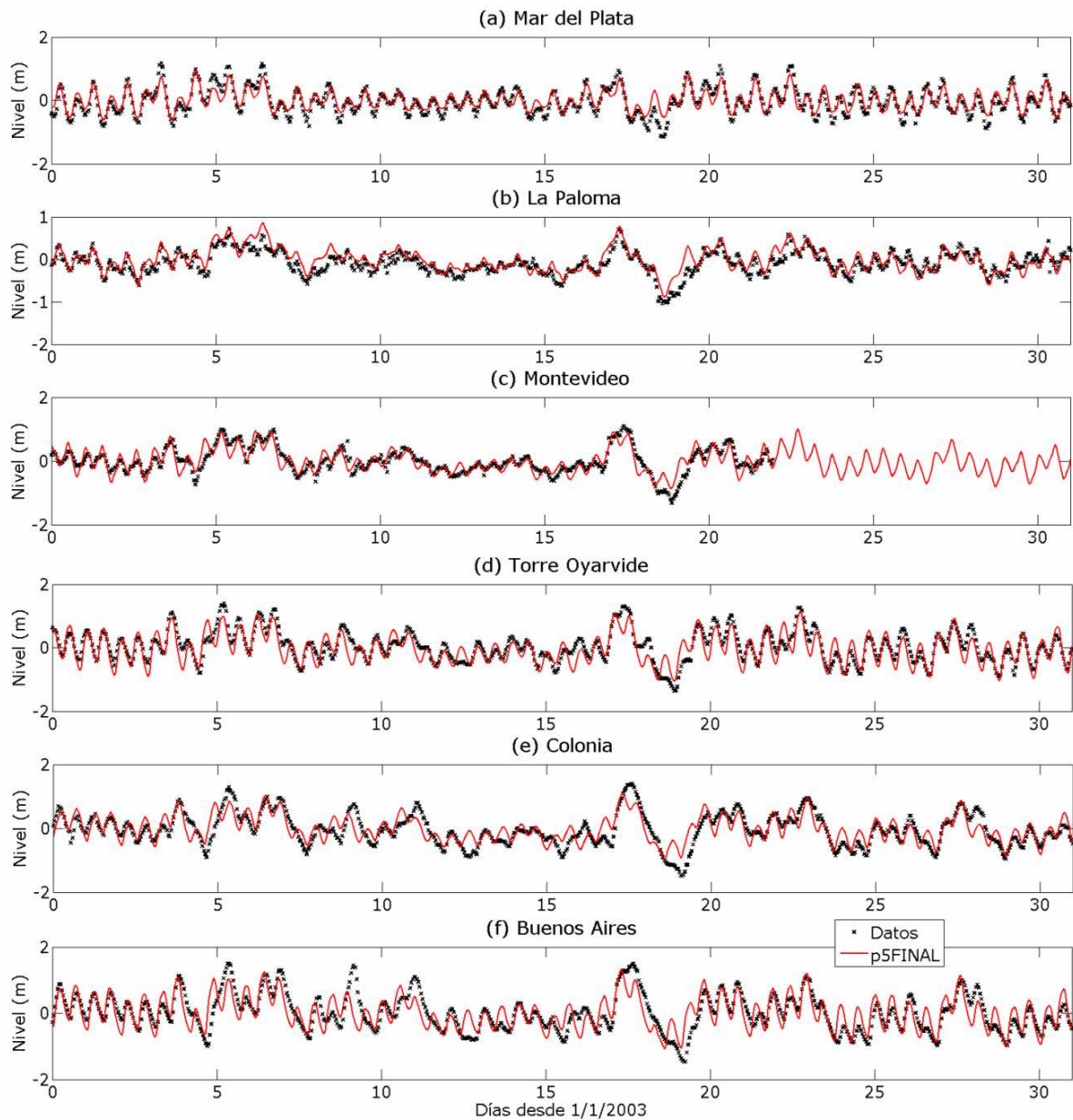


Figura 3.15: Comparación de la variación temporal del nivel medido en (a) Mar del Plata, (b) La Paloma, (c) Montevideo, (d) Torre Oyarvide, (e) Colonia y (f) Buenos Aires obtenida con el modelo ajustado durante enero 2003.

		Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5	Capa 6	Capa 7	Capa 8	Capa 9
Componente Este-Oeste	Desv est Datos (m/s)	0.3	0.36	0.413	0.457	0.492	0.507	0.523	0.52
	Desv est Modelo (m/s)	0.216	0.244	0.256	0.266	0.268	0.273	0.276	0.28
	RMSE (m/s)	0.234	0.273	0.318	0.354	0.377	0.385	0.402	0.423
	Correlación	0.661	0.671	0.646	0.645	0.673	0.702	0.701	0.606
Componente Norte-Sur	Desv est Datos (m/s)	0.108	0.119	0.127	0.101	0.101	0.113	0.143	0.192
	Desv est Modelo (m/s)	0.133	0.137	0.154	0.154	0.15	0.149	0.152	0.158
	RMSE (m/s)	0.123	0.134	0.164	0.154	0.158	0.157	0.175	0.209
	Correlación	0.513	0.462	0.336	0.417	0.409	0.453	0.459	0.497

Tabla 3.6: Parámetros estadísticos calculados para la representación con el modelo ajustado de los perfiles verticales de corriente medidos en PB.

		Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5	Capa 6	Capa 7	Capa 8
Componente Este-Oeste	Desv est Datos (m/s)	0.157	0.197	0.213	0.193	0.195	0.21	0.249	0.375
	Desv est Modelo (m/s)	0.143	0.203	0.216	0.21	0.215	0.221	0.227	0.229
	RMSE (m/s)	0.117	0.159	0.187	0.177	0.197	0.22	0.261	0.398
	Correlación	0.699	0.688	0.621	0.615	0.557	0.509	0.415	0.225
Componente Norte-Sur	Desv est Datos (m/s)	0.133	0.179	0.237	0.254	0.269	0.287	0.32	0.433
	Desv est Modelo (m/s)	0.115	0.154	0.176	0.185	0.2	0.213	0.228	0.234
	RMSE (m/s)	0.087	0.127	0.191	0.199	0.221	0.238	0.278	0.416
	Correlación	0.763	0.723	0.615	0.637	0.603	0.588	0.532	0.384

Tabla 3.7: Parámetros estadísticos calculados para la representación con el modelo ajustado de los perfiles verticales de corriente medidos en ARG.

		Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5	Capa 6	Capa 7	Capa 8
Componente Este-Oeste	Desv est Datos (m/s)	0.174	0.219	0.286	0.317	0.339	0.358	0.399	0.468
	Desv est Modelo (m/s)	0.142	0.213	0.241	0.237	0.232	0.236	0.243	0.247
	RMSE (m/s)	0.118	0.15	0.182	0.21	0.253	0.287	0.357	0.415
	Correlación	0.752	0.77	0.773	0.763	0.685	0.624	0.533	0.52
Componente Norte-Sur	Desv est Datos (m/s)	0.092	0.116	0.141	0.161	0.204	0.243	0.328	0.38
	Desv est Modelo (m/s)	0.055	0.083	0.094	0.106	0.134	0.158	0.182	0.193
	RMSE (m/s)	0.103	0.132	0.143	0.143	0.153	0.182	0.268	0.313
	Correlación	0.085	0.161	0.317	0.491	0.662	0.668	0.581	0.581

Tabla 3.8: Parámetros estadísticos calculados para la representación con el modelo ajustado de los perfiles verticales de corriente medidos en PON.

A modo de ejemplo en la Figura 3.16 se muestra la comparación espacial de las corrientes medidas y obtenidas con el modelo en PB durante 5 días de diciembre 2003. Estos resultados muestran que el modelo reproduce en general las características principales del flujo en la mayoría de las capas, siendo un poco mayores las diferencias en las capas superficiales con el modelo representando intensidades menores a las medidas.

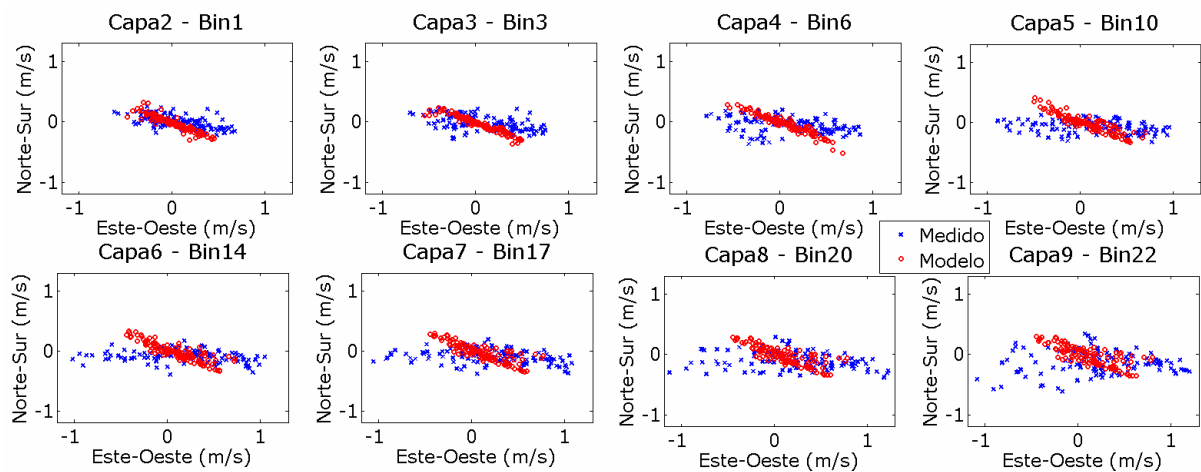


Figura 3.16: Comparación espacial de las corrientes obtenidas con el modelo ajustado y medidas en PB entre el 27 y 31 de diciembre de 2003 en varias profundidades.

Un ejemplo del ajuste obtenido para las corrientes en ARG presentando la comparación espacial del perfil de flujo obtenido con el modelo y medido se presenta en la Figura 3.17. Se observa una buena representación en las capas de fondo de la distribución espacial y temporal, mientras que en las capas superficiales el modelo (y principalmente la componente y) no reproduce el comportamiento observado en los datos subestimando las intensidades. Un ejemplo de los resultados obtenidos en PON se presenta en la Figura 3.18. Se observa nuevamente una representación del comportamiento general de las corrientes en la zona, principalmente en las capas inferiores.

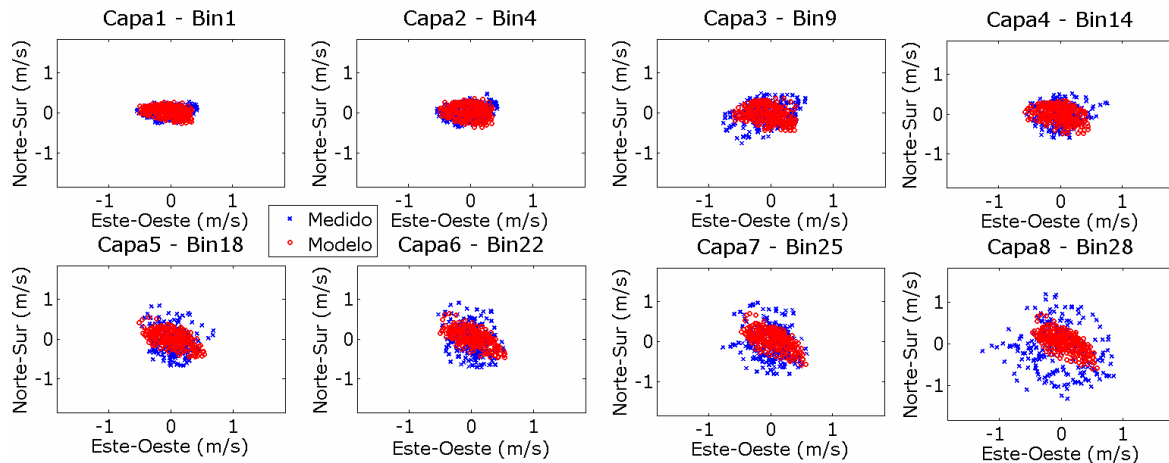


Figura 3.17: Comparación espacial de las corrientes obtenidas con el modelo ajustado y medidas en ARG entre el 1° y el 10 de enero 2003 en varias profundidades.

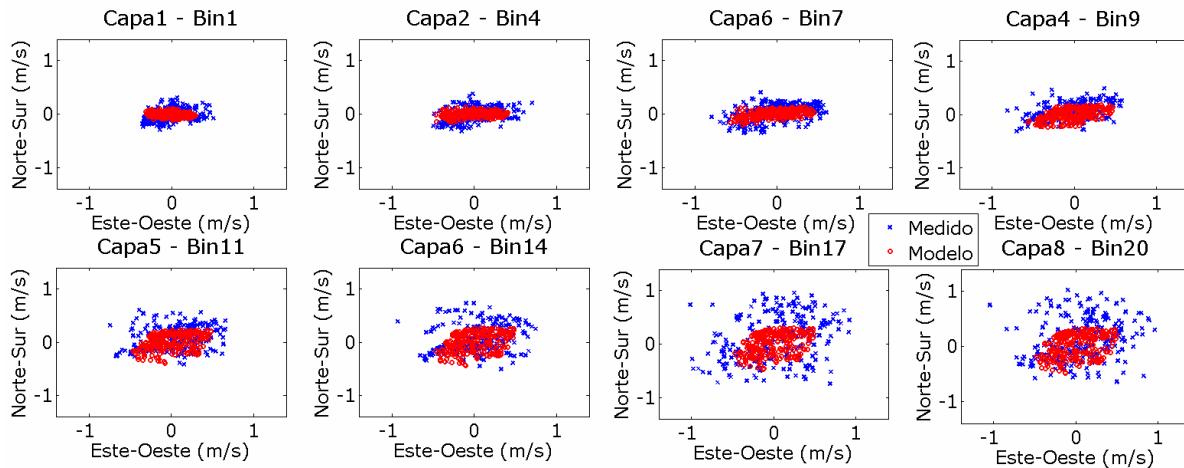


Figura 3.18: Comparación espacial de las corrientes obtenidas con el modelo ajustado y medidas en PON entre el 3 y el 13 de setiembre de 2003 en varias profundidades.

Por último, en las Figuras 3.19 a 3.27 se presenta el ajuste de los perfiles de salinidad medidos durante 2003 y utilizados para comparar con el modelo. Se observa que en la zona del frente (mes de julio) y en la zona de Samborombón (setiembre) el modelo representa aceptablemente los perfiles; en la zona interior del Río de la Plata sobre la costa uruguaya (junio) el modelo representa valores más bajos de salinidad pero la forma de la estratificación es similar; en la zona central (agosto) el modelo representa salinidades menores a las que muestran los datos pero reproduce bien la estratificación; en la costa argentina (setiembre y octubre) la representación es muy buena; en la costa uruguaya exterior (mayo) la salinidad simulada es menor a la medida; finalmente en la

zona exterior el modelo reproduce algunos perfiles correctamente (enero, febrero y marzo 2003) y en otros casos reproduce valores más bajos (abril) de salinidad. En términos generales el modelo representa las características generales de la pluma en la zona interior, de mezcla y en la costa argentina, representando una mayor extensión de la pluma (salinidades más bajas a las medidas) sobre la costa uruguaya.

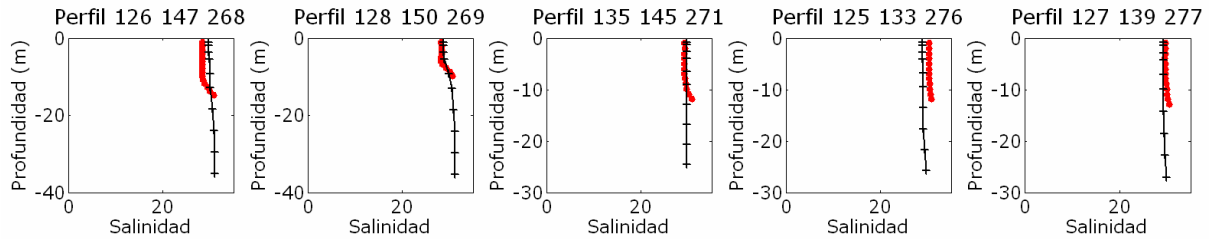


Figura 3.19: Comparación de los perfiles verticales de salinidad obtenidos con el modelo ajustado (* rojo) con los perfiles medidos (+ negro) durante enero 2003.

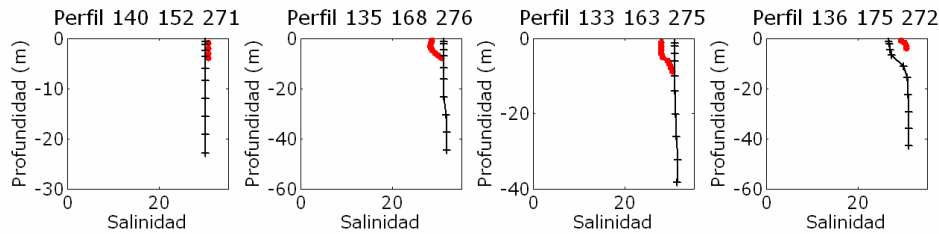


Figura 3.20: Comparación de los perfiles verticales de salinidad obtenidos con el modelo ajustado (* rojo) con los perfiles medidos (+ negro) durante febrero y marzo 2003.

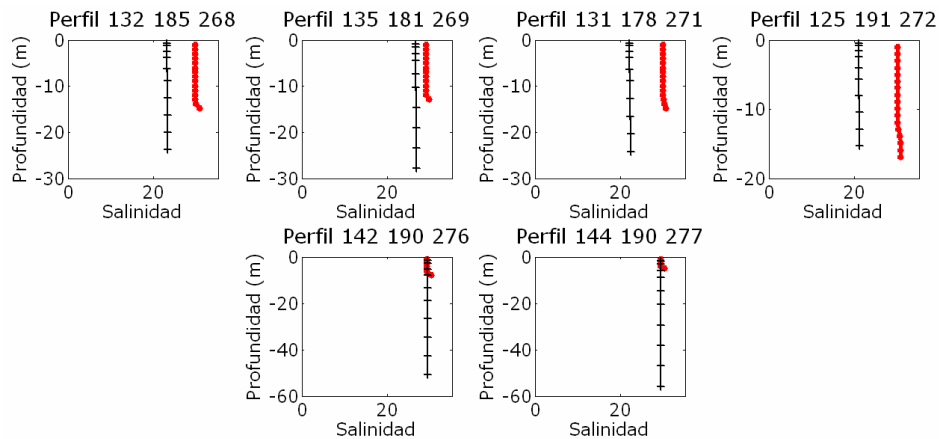


Figura 3.21: Comparación de los perfiles verticales de salinidad obtenidos con el modelo ajustado (* rojo) con los perfiles medidos (+ negro) durante abril 2003.

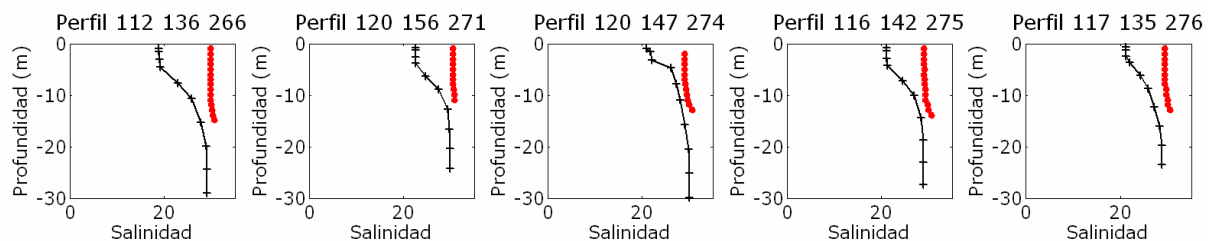


Figura 3.22: Comparación de los perfiles verticales de salinidad obtenidos con el modelo ajustado (* rojo) con los perfiles medidos (+ negro) durante mayo 2003.

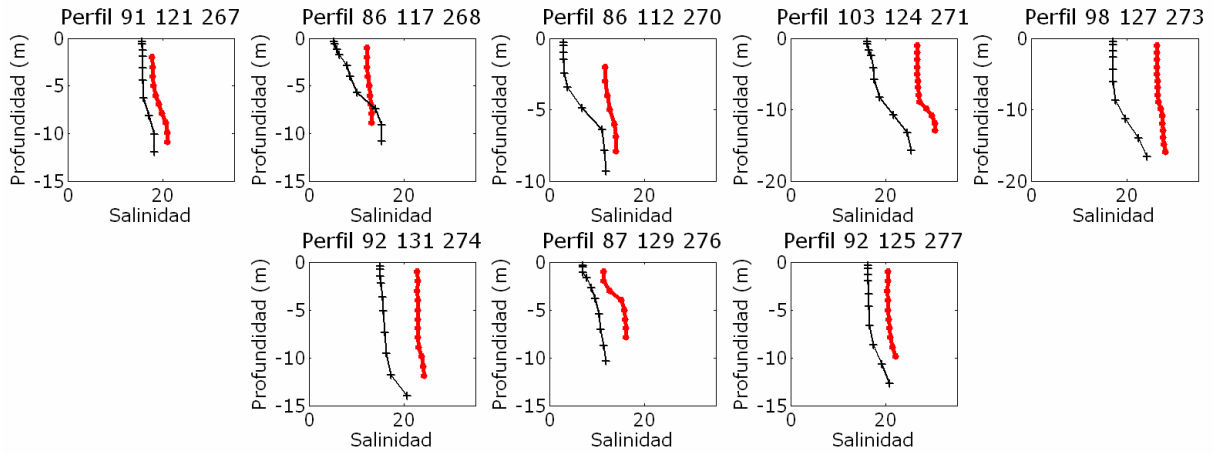


Figura 3.23: Comparación de los perfiles verticales de salinidad obtenidos con el modelo ajustado (* rojo) con los perfiles medidos (+ negro) durante junio 2003.

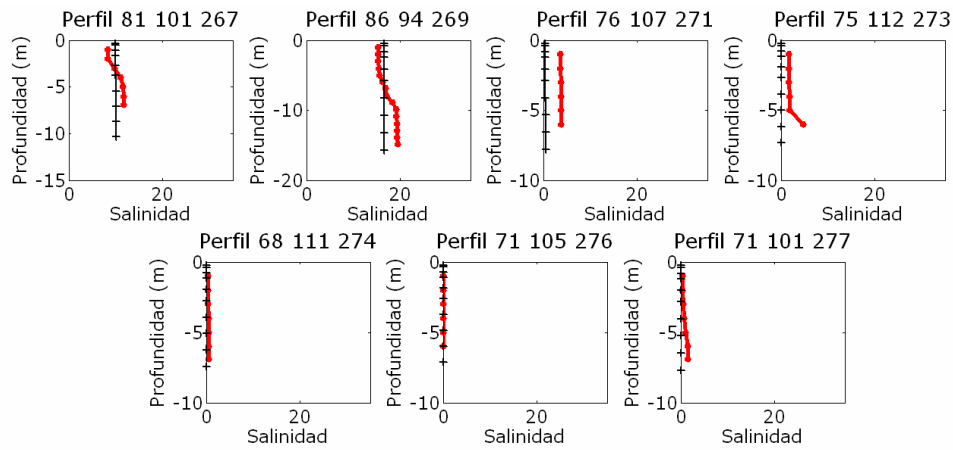


Figura 3.24: Comparación de los perfiles verticales de salinidad obtenidos con el modelo ajustado (* rojo) con los perfiles medidos (+ negro) durante julio 2003.

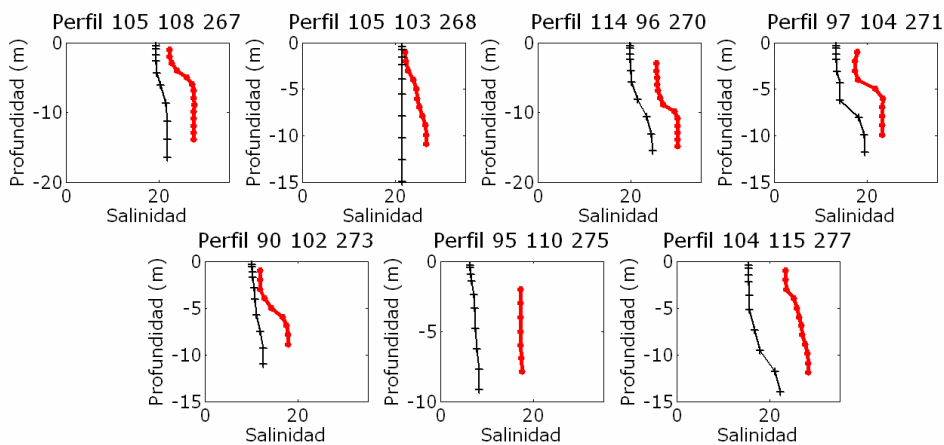


Figura 3.25: Comparación de los perfiles verticales de salinidad obtenidos con el modelo ajustado (* rojo) con los perfiles medidos (+ negro) durante agosto 2003.

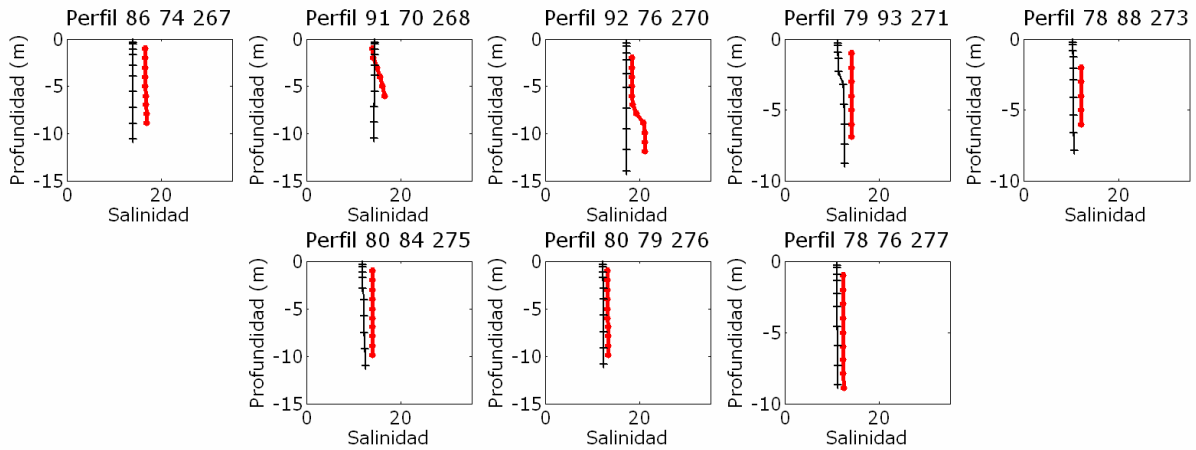


Figura 3.26: Comparación de los perfiles verticales de salinidad obtenidos con el modelo ajustado (* rojo) con los perfiles medidos (+ negro) durante setiembre 2003.

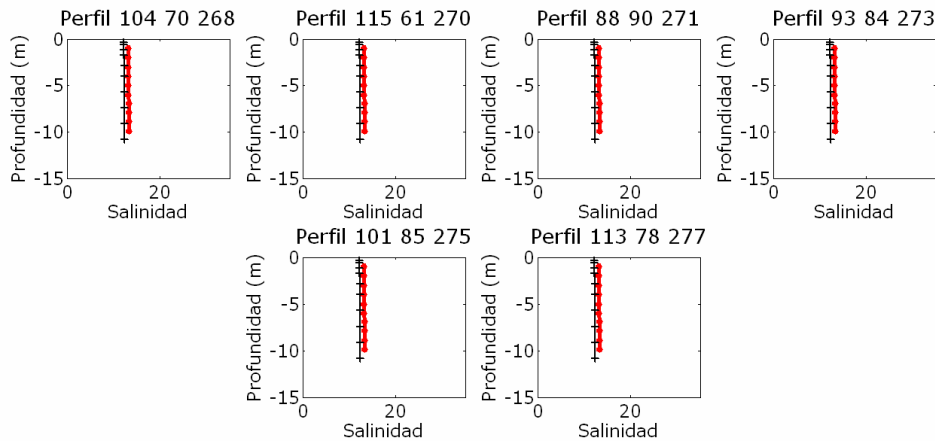


Figura 3.27: Comparación de los perfiles verticales de salinidad obtenidos con el modelo ajustado (* rojo) con los perfiles medidos (+ negro) durante octubre 2003.

3.2.4.2.4. Etapa 3: Rank1 – Validación (V8.19)

En la etapa de validación hidrodinámica del modelo de marea MARS (rank1) se trabaja con el período de tiempo 2009-2010 seleccionado por la cantidad de información de campo vinculada con la dinámica de sedimentos finos y variables hidrodinámicas asociadas. En esta sección se presentan los resultados obtenidos utilizando el viento CEP de mayor resolución pues con dichos forzantes se realizan la mayor parte de las simulaciones de los sedimentos finos. No obstante se realizaron también las simulaciones de validación para el forzante NCEP (no presentados). Al final de la sección se presenta una discusión sobre la influencia de la resolución del campo de vientos sobre la hidrodinámica del rank1.

Al modificar el forzante viento se realizaron test preliminares utilizando los parámetros obtenidos de la calibración anterior y como resultado debieron ajustarse algunos parámetros al utilizar los vientos CEP para obtener una calidad de ajuste similar al obtenido con el viento NCEP. Por un lado el parámetro que interviene en la formulación de fricción de viento utilizada varía (disminuye) respecto al utilizado con vientos NCEP, siendo en este caso 0,0014. Además, se obtiene una mejor representación de los datos (principalmente en relación a la representación del campo salino) utilizando una parametrización de la turbulencia vertical con el modelo de 1 ecuación de Gaspar en vez del modelo de dos ecuaciones del tipo $k-\varepsilon$. Es importante aclarar se cuenta con

información de vientos CEP hasta agosto 2010 inclusive y por tanto el período de tiempo simulado con dicho forzante es el comprendido entre enero 2009 y agosto 2010 inclusive; mientras que con el forzante NCEP se trabaja con los dos años completos, entre enero 2009 y diciembre 2010 inclusive.

3.2.4.2.4.1. Niveles

En función de los datos disponibles es posible evaluar la calidad del modelo en cuanto a la representación de la oscilación de los niveles medidos en la zona interior e intermedia del Río de la Plata principalmente. La comparación entre los niveles medidos y obtenidos con el modelo en Montevideo para el mes de febrero 2009 se presenta en la Figura 3.28. Se observa el modelo reproduce correctamente la variabilidad principal de los niveles medidos aunque las oscilaciones cortas que muestra el modelo son de mayor amplitud. El factor de correlación obtenido entre ambas series es igual a 0,83 y el error (RMSE) obtenido en la representación de los niveles en Montevideo con el modelo validado es 0,24 m.

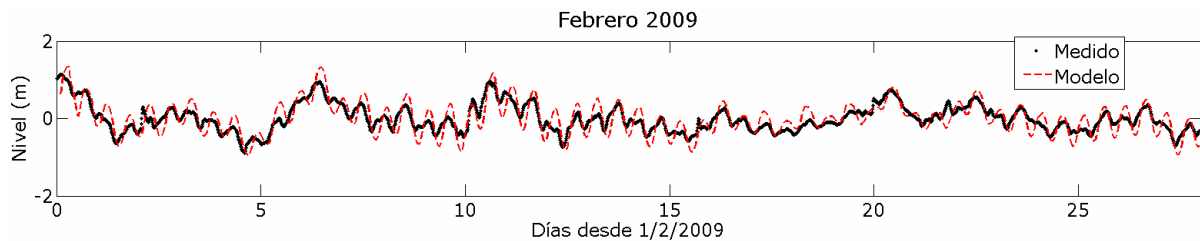


Figura 3.28: Comparación de la variación temporal del nivel medido y obtenido con el modelo ajustado en Montevideo durante febrero 2009.

En Pilote Norden se cuenta con doble fuente de información de niveles medidos. Por un lado mediciones del mareógrafo durante el año 2009 están disponibles y por otro lado las mediciones obtenidas con el sensor de presión del SMATCH durante varios meses del año 2010. A modo de ejemplo se presentan en la Figura 3.29 la comparación entre niveles medidos y obtenidos con el modelo para los meses de setiembre 2009 y julio 2010. Se observa el modelo representa correctamente la variabilidad temporal de los niveles en Pilote Norden. Se calcularon los parámetros estadísticos para el ajuste de ambas series de datos. El factor de correlación entre el modelo y los datos del año 2009 (año 2010) es igual a 0,83 (0,84) mientras que el error del ajuste de nivel en Pilote Norden es de 0,285 m (0,258 m).

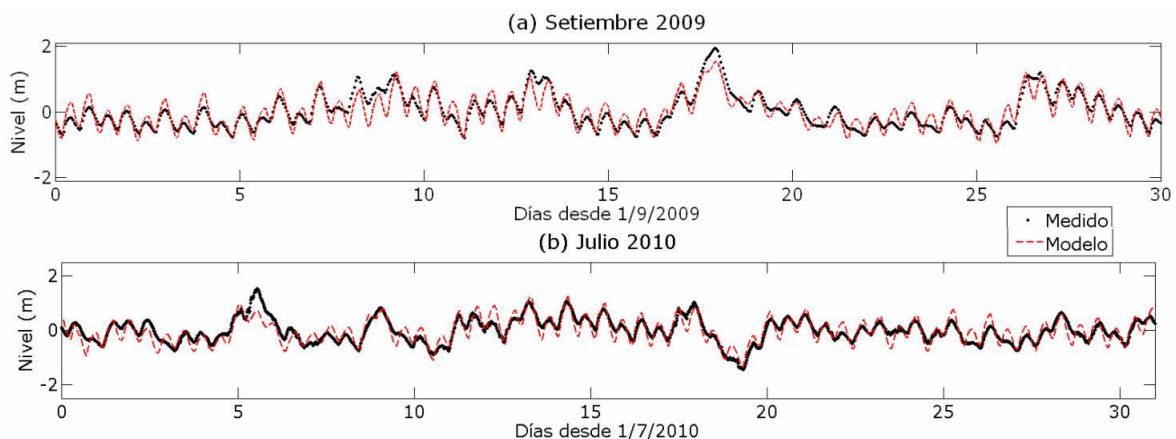


Figura 3.29: Comparación de la variación temporal del nivel medido y obtenido con el modelo ajustado en Pilote Norden durante (a) setiembre 2009 y (b) julio 2010.

El ajuste de los niveles medidos en Torre Oyarvide durante los meses de julio y agosto de 2010 se presenta en la Figura 3.30. Se observa el modelo representa correctamente la fase de la marea astronómica así como también los eventos de fuerte marea meteorológica donde los niveles alcanzan valores mínimos y máximos extremos. Para este caso solamente se cuenta con un período de 60 días de datos para el cálculo de los parámetros estadísticos. El ajuste de los datos de niveles en Torre Oyarvide presenta un factor de correlación igual a 0,84 y un error medio cuadrático igual a 0,278 m.

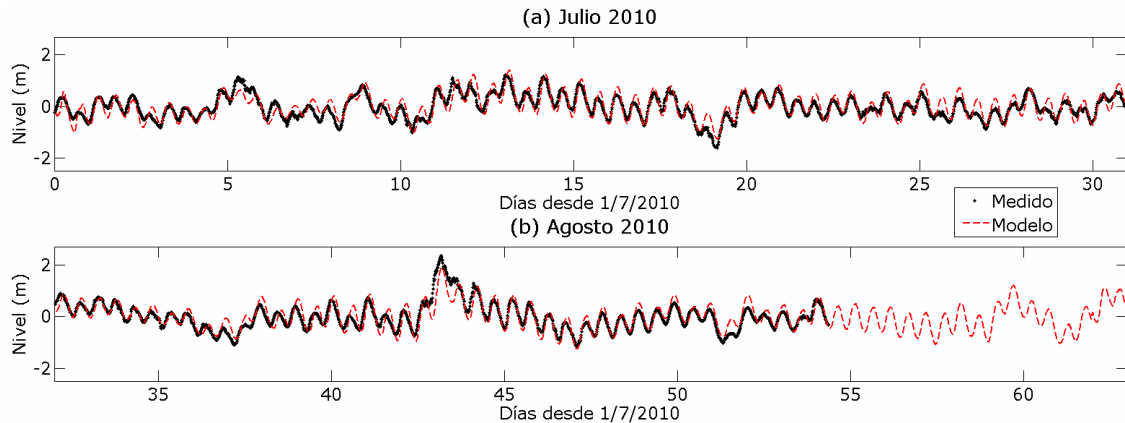


Figura 3.30: Comparación de la variación temporal del nivel medido y obtenido con el modelo ajustado en Torre Oyarvide durante (a) julio y (b) agosto de 2010.

3.2.4.2.4.2. Perfiles de corriente

Se utilizaron perfiles de corriente medidos en Montevideo (punto de medición PB) y en la Boya oceanográfica para validar el modelo hidrodinámico. Un ejemplo de la comparación espacial del flujo medido y obtenido con el modelo a diversas profundidades en PB se presenta en la Figura 3.31.

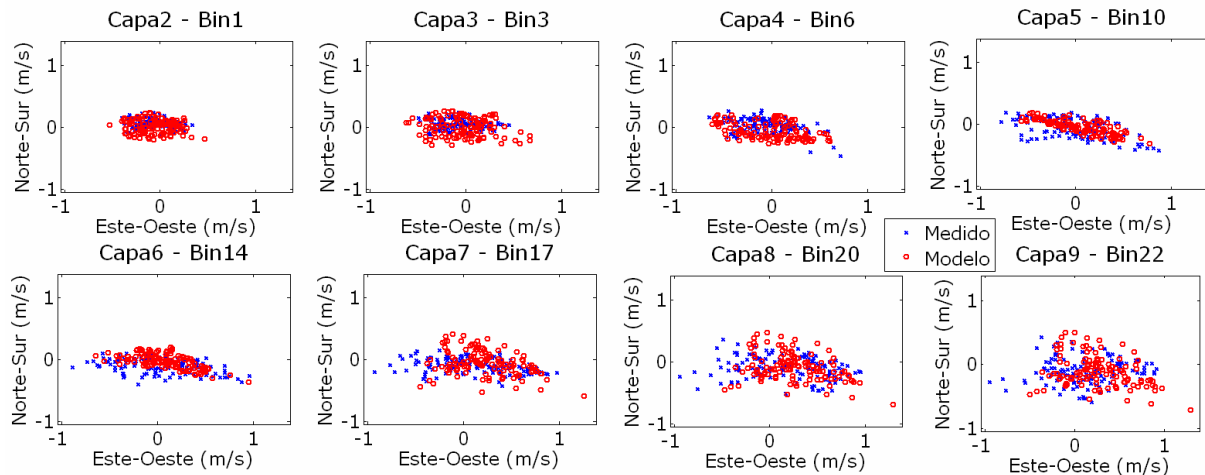


Figura 3.31: Comparación espacial de las corrientes obtenidas con el modelo ajustado y medidas en PB para el período de tiempo comprendido entre el 5 y 10 de abril de 2009 en varias profundidades.

Se observa el modelo representa las principales direcciones del flujo del período analizado en todas las profundidades representando el incremento de intensidades entre fondo y superficie. Los parámetros estadísticos calculados utilizando las mediciones comprendidas entre el 1° enero y el 10 de marzo, y entre el 4 de abril y 12 de junio de 2009, y el modelo ajustado se presentan en la Tabla 3.9. Se observa la calidad del ajuste

obtenido durante la calibración se mantiene durante la validación del modelo hidrodinámico. Comparando la intensidad de flujo medida y obtenida con el modelo se obtiene un valor de RMSE igual a 0,15 m/s en la capa 2 del fondo, 0,28 m/s a profundidad media (capa 5) y 0,34 m/s en la capa 9.

		Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5	Capa 6	Capa 7	Capa 8	Capa 9
Componente Este-Oeste	Desv est Datos (m/s)	0.238	0.287	0.341	0.392	0.417	0.431	0.431	0.427
	Desv est Modelo (m/s)	0.206	0.272	0.316	0.315	0.312	0.319	0.327	0.334
	RMSE (m/s)	0.217	0.246	0.291	0.351	0.383	0.395	0.386	0.427
	Correlación	0.531	0.615	0.638	0.598	0.558	0.544	0.556	0.483
Componente Norte-Sur	Desv est Datos (m/s)	0.11	0.126	0.14	0.129	0.115	0.126	0.156	0.21
	Desv est Modelo (m/s)	0.119	0.14	0.151	0.167	0.188	0.212	0.222	0.232
	RMSE (m/s)	0.132	0.159	0.184	0.191	0.199	0.209	0.221	0.257
	Correlación	0.349	0.329	0.228	0.181	0.209	0.327	0.366	0.329

Tabla 3.9: Parámetros estadísticos calculados para la representación con el modelo ajustado de los perfiles verticales de corriente medidos en PB.

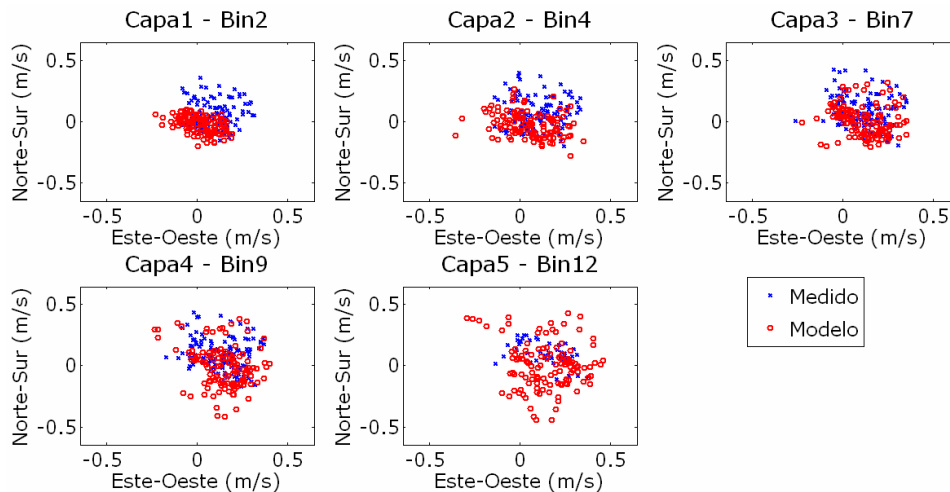


Figura 3.32: Comparación espacial de las corrientes obtenidas con el modelo ajustado y medidas en la Boya para el período de tiempo comprendido entre el 1° y 5 de agosto de 2010 en varias profundidades.

Respecto al ajuste del modelo validado de los datos de perfil de corriente medidos en la Boya se presenta en la Figura 3.32 un ejemplo de la comparación espacial del flujo (medido y obtenido con el modelo) en varias profundidades. Además en la Tabla 3.10 se presentan los principales estadísticos obtenidos, utilizando para la comparación los datos medidos con el ADCP durante los Período 1 y 3 de medición de una resolución vertical de 0,5 m. Es importante aclarar que solamente hay mediciones permanentes del ADCP en la zona de profundidad media hacia el fondo, entre los bins 1 a 8, y en función de la variación del nivel de la superficie libre se registraron medidas ocasionalmente entre los bins 9 a 13. En función de la profundidad del área, la correspondencia entre las capas del modelo y los bins de medición indica que se cuenta solamente con mediciones para comparar con las capas 1 a 4 del modelo durante la mayor parte del período de tiempo, y ocasionalmente mediciones para comparar con la capa 5 (16% de las medidas comparadas). Debido a esto se presentan los estadísticos calculados para el ajuste de las capas 1 a 5 del modelo solamente. Se observa el modelo representa aceptablemente bien las corrientes de fondo en la zona de la Boya aunque a profundidad media el ajuste es de

menor calidad aunque la desviación de los datos es similar a la de los valores calculados por el modelo. Al comparar las intensidades de flujo del modelo con lo que muestran las medidas se obtiene un error de 0,14 m/s en el fondo (capa 1), 0,19 m/s en la capa 4 y 0,21 m/s en la capa 5.

		Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5
Componente Este-Oeste	Desv est Datos (m/s)	0.159	0.182	0.209	0.23	0.271
	Desv est Modelo (m/s)	0.189	0.221	0.231	0.238	0.273
	RMSE (m/s)	0.166	0.197	0.211	0.213	0.239
	Correlación	0.554	0.548	0.553	0.608	0.654
Componente Norte-Sur	Desv est Datos (m/s)	0.165	0.208	0.247	0.259	0.238
	Desv est Modelo (m/s)	0.152	0.212	0.223	0.257	0.287
	RMSE (m/s)	0.166	0.198	0.219	0.218	0.208
	Correlación	0.479	0.564	0.574	0.645	0.705

Tabla 3.10: Parámetros estadísticos calculados para la representación con el modelo ajustado de los perfiles verticales de corriente medidos en la Boya.

3.2.4.2.4.3. Salinidad

Para evaluar la calidad del modelo se cuenta por un lado con información continua de salinidad medida por el SMATCH ubicado en la Boya durante varios meses. Por otra parte se cuenta con información puntual (perfiles verticales) medidos durante las campañas oceanográficas 2 (Marzo 2010), 3 (Junio 2010) y 4 (Agosto 2010) realizadas en el Proyecto FREPLATA-FFEM en las 26 estaciones de control del Río de la Plata (Capítulo 2). Además, se cuenta con información continua de salinidad medida por el SMATCH ubicado en Torre Oyarvide.

A partir de los resultados de la depuración de las mediciones del SMATCH de la Boya que se presentó en el Capítulo 2 se comparan los resultados del modelo con las medidas válidas del Período 1 (27 noviembre 2009 al 21 enero 2010) y del Período 3 (25 de junio al 25 de agosto 2010). A partir de la ubicación del sensor del SMATCH en la columna de agua se determina que las medidas correspondientes en el modelo son las de las capas 5 y 6 (en función de la variabilidad del nivel del mar). Debido a esto se evalúa la calidad del modelo considerando ambos resultados del modelo. En la Figura 3.33 se presenta la comparación de las series temporales medidas y obtenidas con el modelo de salinidad en la Boya. Los resultados presentados permiten visualizar varios aspectos interesantes. Por un lado se observa que, durante la mayor parte del período analizado, el modelo representa las características principales de la salinidad en la zona, es decir, los principales aumentos y disminuciones de la misma. No obstante, es interesante observar también que hay eventos de variación de salinidad (por ejemplo entre los días 15 y 20 de diciembre 2009) que el modelo no es capaz de representar. El error obtenido al comparar las series de datos con la capa 5 (capa 6) del modelo es igual a 3,62 ppm (3,67 ppm). En cuanto al factor de correlación se obtiene un valor de 0,64 (0,68), lo que expresa el comportamiento diferente que muestra el modelo en relación a los datos en determinados casos.

Con respecto a la comparación del modelo con la información de los perfiles de salinidad recolectados durante las Campañas de medición 2, 3 y 4, se presentan en las Figuras 3.34, 3.35 y 3.36 los resultados obtenidos en las estaciones de control. Es importante aclarar que en todas las restantes estaciones no se registraron valores de salinidad durante las mediciones y el modelo reproduce lo mismo (es decir, reproduce agua dulce).

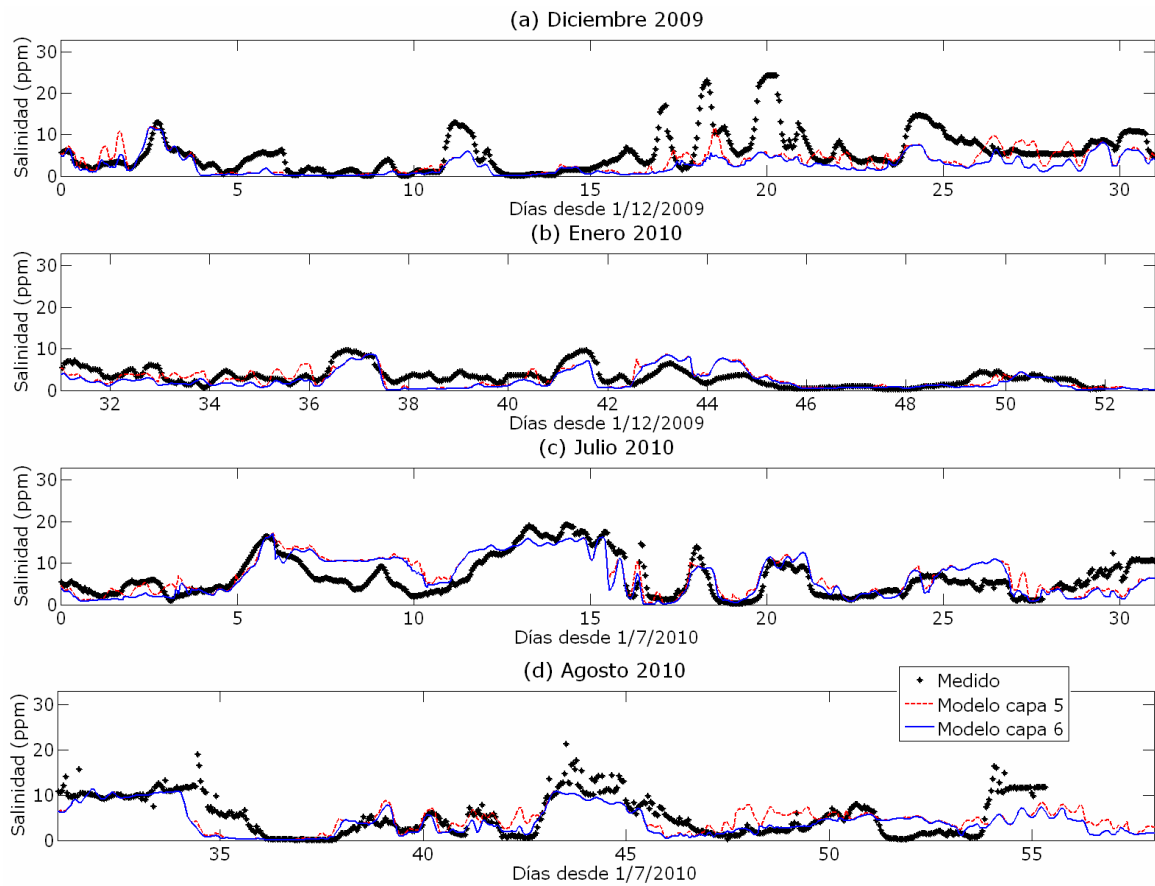


Figura 3.33: Comparación de la variación temporal de la salinidad medida y obtenida con el modelo en las capas correspondientes a la ubicación del sensor del SMATCH de la Boya durante (a) diciembre 2009, (b) enero, (c) julio y (d) agosto 2010.

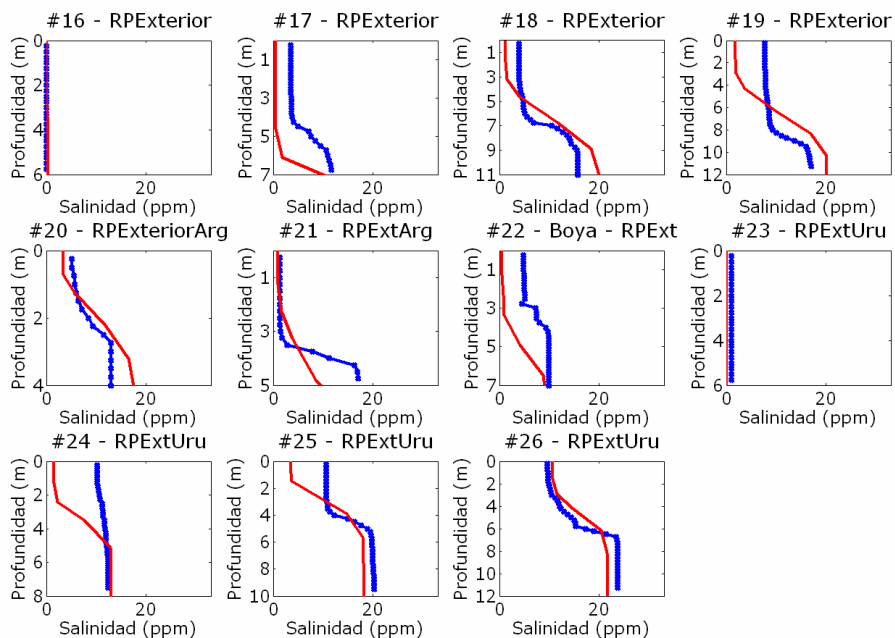


Figura 3.34: Comparación de los perfiles de salinidad medidos (x azul) en las estaciones de medición #16 a #26 durante la campaña 2 de marzo de 2010 con los perfiles obtenidos con el modelo (- rojo) en celdas de control representativas de dichos puntos de medición.

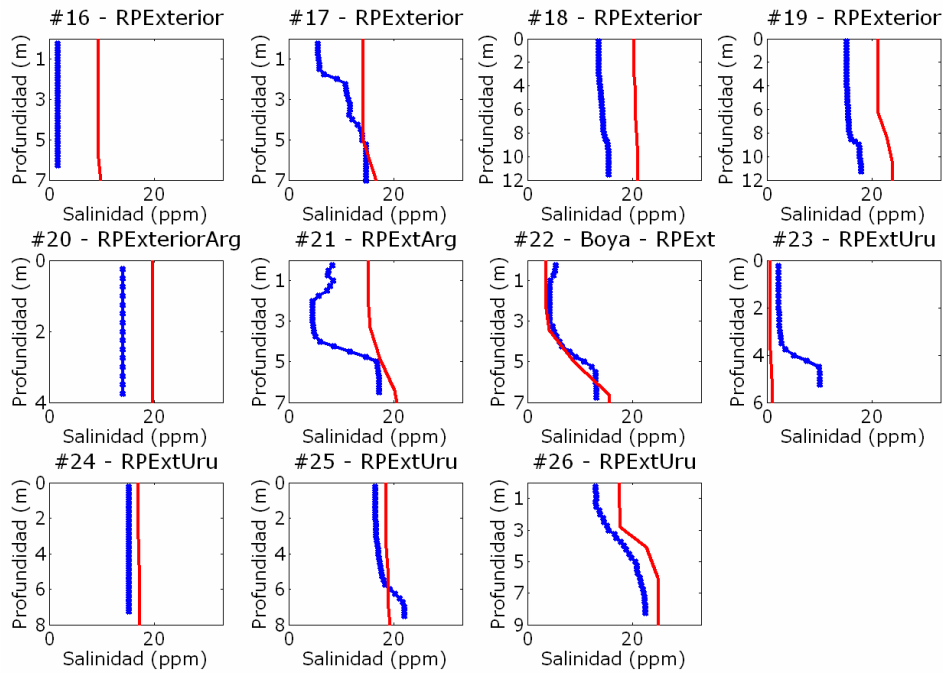


Figura 3.35: Comparación de los perfiles de salinidad medidos (x azul) en las estaciones de medición #16 a #26 durante la campaña 3 de junio de 2010 con los perfiles obtenidos con el modelo (- rojo) en celdas de control representativas de dichos puntos de medición.

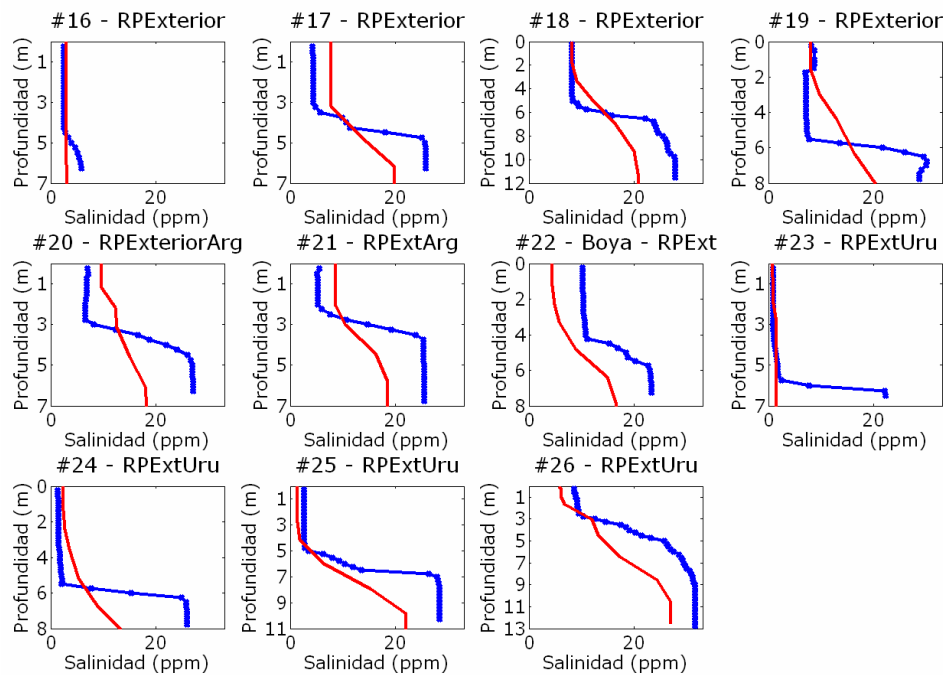


Figura 3.36: Comparación de los perfiles de salinidad medidos (x azul) en las estaciones de medición #16 a #26 durante la campaña 4 de agosto de 2010 con los perfiles obtenidos con el modelo (- rojo) en celdas de control representativas de dichos puntos de medición.

La comparación visual permite observar que aunque no se reproducen exactamente los valores exactos de salinidad medida en los perfiles, en general el modelo representa valores similares. Es importante analizar también cómo el modelo representa la estratificación vertical observada en las medidas, ya que la misma tiene gran influencia sobre otros procesos como por ejemplo la dinámica de sedimentos finos.

Considerando lo extremadamente exigente que es para el modelo realizar una comparación por perfiles como la desarrollada, se considera los resultados son sumamente satisfactorios y por tanto el modelo parecería resolver correctamente las características generales de la dinámica del campo salino. No obstante resulta muy importante realizar un análisis detallado de la comparación de perfiles verticales con el objetivo de comprender el estado del modelo hidrodinámico y sus potencialidades, así como también sus debilidades. Los resultados obtenidos para la campaña 2 muestran que el modelo en general presenta valores de salinidad menores a los medidos en la zona superficial mientras que sobre el fondo los valores son similares. Esto indica que en este caso el modelo sobrevalúa la estratificación vertical y que indica una pluma salina superficial más extendida hacia el exterior del Río de la Plata en relación al campo salino medido. La comparación presentada para la campaña 3 muestra un comportamiento inverso, pues el modelo reproduce salinidades levemente mayores en toda la columna de agua respecto a lo que indican las medidas. Se destaca en este caso cómo el modelo reproduce correctamente los perfiles medidos con estratificación vertical en ciertas estaciones y también los perfiles mezclados en otras estaciones. Por último en la campaña 4 se observa las medidas muestran una gran estratificación vertical y el modelo por su parte también, con diferencias en los valores extremos de superficie y de fondo.

Con el objetivo de cuantificar la calidad del modelo hidrodinámico en cuanto a la representación del campo salino en la zona de estudio se calcularon los errores medios cuadráticos de los perfiles obtenidos con el modelo en relación a cada perfil medido (Tabla 3.11). Los resultados muestran una variabilidad de los valores de RMSE obtenidos entre las estaciones y entre las campañas. Los valores máximos son 7 ppm (estación #16 campaña 3) y 6,5 ppm (estación #24 campaña 4).

	RMSE (ppm)										
	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23	#24	#25	#26
Campaña 2	0.13	4.24	2.59	5.02	1.73	0.70	4.18	0.99	6.36	4.72	1.46
Campaña 3	6.84	5.50	5.74	5.74	4.36	6.63	1.51	3.33	1.62	1.77	3.38
Campaña 4	1.00	4.54	3.48	3.97	5.26	4.50	5.83	0.24	5.47	4.87	5.46

Tabla 3.11: Valores del error medio cuadrático obtenido para cada perfil medido en las campañas 2, 3 y 4 en las estaciones #16 a #26.

Por último se evaluó la calidad del modelo hidrodinámico comparando la salinidad medida en Torre Oyarvide con los valores reproducidos con el modelo. Esta estación se ubica en la zona intermedia del Río de la Plata y la mayor parte del tiempo la salinidad es nula. No obstante, en eventos de fuerte ingreso de agua salada del exterior la salinidad aumenta. Con el objetivo de evaluar si el modelo representa los eventos excepcionales de ingreso de la pluma salada a la zona intermedia se compara la salinidad del modelo en la celda representativa de la estación Torre Oyarvide con las medidas registradas por el SMATCH durante el Período 3 de medición (Figura 3.37). En este caso la capa 6 del modelo corresponde a la ubicación del sensor del SMATCH. La comparación muestra que el modelo es capaz de reproducir los dos eventos de aumento de salinidad (ingreso excepcional de pluma salina) registrados por los datos en Torre Oyarvide. El modelo además representa dos eventos más de incremento de salinidad que los datos no registran. Se considera sumamente importante que el modelo sea capaz de reproducir las situaciones no habituales de la dinámica del campo salino. Ajustes de estos eventos probablemente puedan realizarse mejorando la resolución espacial del modelo, tarea que no ha sido posible incluir en el marco de este trabajo.

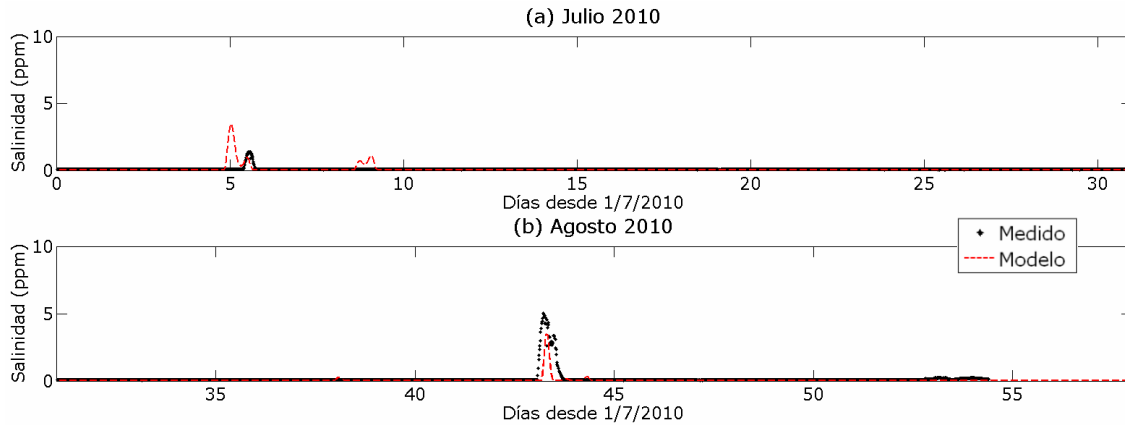


Figura 3.37: Comparación de la variación temporal de la salinidad medida y obtenida con el modelo en la capa correspondiente a la ubicación del sensor del SMATCH de Torre Oyarvide durante (a) julio y (b) agosto de 2010.

3.2.4.2.4.4. Influencia del campo de vientos sobre la calidad del modelo hidrodinámico

Los resultados obtenidos (no presentados) durante la etapa de validación del modelo hidrodinámico utilizando la misma base de datos de vientos utilizada durante la calibración (vientos NCEP) mantuvieron la calidad del ajuste obtenido en dicha calibración. No obstante, es importante mencionar que no se obtienen los mismos resultados utilizando la base de vientos NCEP (resolución $2,5^\circ$) y la base de vientos CEP (resolución $0,25^\circ$). A pesar de que las características principales de la hidrodinámica de marea se representan con ambas bases de datos, la mayor calidad de la base de datos de vientos CEP genera mejores resultados en el modelo MARS (rank1), principalmente en la representación de la dinámica del campo salino. En la Tabla 3.12 se presenta la comparación de los principales errores obtenidos de los ajustes de niveles, corrientes y salinidad utilizando los vientos CEP y vientos NCEP. Dicho cálculo se basa en los resultados hidrodinámicos obtenidos con las dos versiones del modelo para el período en común de información, es decir, entre enero 2009 y agosto 2010 inclusive. Para el caso de las corrientes se presenta el error promedio en las capas comparadas y para los perfiles de salinidad se presenta el error promedio en todos los perfiles durante las campañas comparadas (2, 3 y 4). Se observa que los errores son mayores en niveles y en salinidad con la configuración utilizando vientos NCEP, mientras que para las corrientes no es tan claro el comportamiento con valores muy similares en los errores.

Variable	Estación	RMSE	
		Viento CEP	Viento NCEP
Nivel (m)	Torre Oyarvide	0.29	0.30
	Pilote Norden	0.25	0.29
	Montevideo	0.24	0.26
Perfil Corriente (m/s)	PB (Comp Este-Oeste)	0.34	0.35
	PB (Comp Norte-Sur)	0.19	0.18
Perfil Corriente (m/s)	Boya (Comp Este-Oeste)	0.21	0.21
	Boya (Comp Norte-Sur)	0.20	0.21
Salinidad (ppm)	Boya	3.62	5.01
	Perfiles	3.73	3.93

Tabla 3.12: Comparación de los RMSE obtenidos durante la validación del modelo hidrodinámico con vientos CEP y vientos NCEP.

Más allá de la comparación cuantitativa que muestran los RMSE calculados para ambas configuraciones, la comparación cualitativa muestra que en general los vientos CEP reproducen mejor la variabilidad temporal de las series de niveles y salinidad principalmente. Por ejemplo, las situaciones excepcionales de salinidad mencionadas anteriormente en las medidas en Torre Oyarvide (Figura 3.37) son representadas por la configuración con vientos CEP y no con la configuración con vientos NCEP.

3.2.4.3. Síntesis

El modelo hidrodinámico de marea MARS implementado para resolver el flujo en el Río de la Plata se calibró y validó con el objetivo de representar correctamente las principales características del flujo tridimensional en la zona. El procedimiento se realizó para los dos niveles de resolución, el modelo bidimensional rank0 del Atlántico Sur y el modelo tridimensional rank1 del Río de la Plata y el Frente Marítimo.

En el nivel rank0 el coeficiente de rugosidad es el parámetro de mayor influencia y se tomó como base el ajuste realizado en los análisis previos del Proyecto FREPLATA-FFEM. No obstante se controló la propagación de la marea astronómica y meteorológica desde el Atlántico Sur al Río de la Plata a partir de la comparación de niveles (astronómicos y totales) en Mar del Plata y en La Paloma. El modelo rank0 es forzado en las fronteras abiertas por las componentes astronómicas principales provenientes del modelo FES2004 y en la superficie libre por el forzantes atmosférico a partir de los campos NCEP. Los resultados muestran una buena representación tanto de las ondas astronómicas y meteorológicas en la zona, con errores en Mar del Plata (La Paloma) para la principal componente armónica M_2 igual a 0,066 m (0,044 m), y para el nivel real igual a 0,178 m (0,198 m).

El modelo tridimensional rank1 resuelve el flujo en la zona del Río de la Plata y el Frente Marítimo a partir de las condiciones de borde provenientes del rank0. Además, se incluyen los caudales fluviales de los ríos Paraná y Uruguay, y el forzante atmosférico. En este caso se trabajó utilizando los campos atmosféricos NCEP y los campos de mayor resolución CEP, calibrando el modelo para ambas fuentes de información. En primer lugar se realizó un análisis de sensibilidad a los principales parámetros que influyen en el flujo analizando las variaciones en niveles, corrientes y salinidad. Durante el mismo se realizaron diversas simulaciones del período de tiempo 2002-2003. Como resultado se definieron las parametrizaciones que representan correctamente los datos medidos. Luego de la calibración del modelo se realizó la validación del mismo a partir de la simulación del período 2009-2010 y se controló el ajuste a partir de la comparación de niveles, corrientes y salinidad. Los resultados obtenidos muestran que el modelo hidrodinámico representa correctamente las principales variaciones de flujo y del campo salino en la zona de interés. En particular se observó la base de datos vientos CEP genera mejores resultados que la base de datos de menor resolución vientos NCEP. A grandes rasgos es posible afirmar el modelo hidrodinámico de marea rank1 representa los niveles reales en el Río de la Plata con un error promedio asociado entre 0,2 m en la zona exterior aumentando hacia la zona interior a valores entre 0,3 y 0,4 m. En relación a las corrientes el modelo presenta errores del orden de los 0,2 m/s en las capas de fondo, el cual se incrementa hacia las capas superficiales superando los 0,4 m/s.

3.2.5. **Patrones principales de flujo**

Como parte inicial del trabajo de modelación numérica de la dinámica de sedimentos finos se trabajó en el modelo hidrodinámico implementado en la zona según lo descrito anteriormente. La gran relevancia del flujo en la dinámica mencionada genera que la calidad de un trabajo de modelación de dinámica de sedimentos finos esté directamente limitada por la calidad del modelo hidrodinámico. En este caso particular

los procesos de transporte por las corrientes, la tensión de corte de fondo generada por las mismas y las variaciones de la densidad por el campo salino son los aspectos que influyen directamente sobre la componente sedimentológica.

Las características principales de la circulación en la zona de estudio se representan correctamente con el modelo implementado y validado según muestran las diversas comparaciones entre el modelo y datos que se presentaron en este capítulo. Además de dichas comparaciones puntuales, es posible determinar a partir de los resultados del modelo los patrones principales de circulación en base al análisis del flujo instantáneo durante diversos instantes de tiempo o a partir de la determinación de los campos residuales de flujo. Estos patrones generales pueden ser comparados con otros modelos numéricos hidrodinámicos tridimensionales implementados en la zona con estrategias similares (Fossati and Piedra-Cueva, 2013).

Con el objetivo de conocer las principales características del campo hidrodinámico de marea a partir de los resultados obtenidos con el modelo calibrado se analizan los patrones de flujo en diversas condiciones, marea astronómica y marea meteorológica. Se presentan a modo de ejemplo en las Figuras 3.38 y 3.39 los campos de corrientes para distintos instantes de tiempo (cada 3 horas) obtenidos en las capas 2 (fondo) y 7 (zona superficial) del modelo durante un día de un período de tiempo de características básicamente astronómicas. El objetivo es mostrar la dinámica y variabilidad del flujo en la zona (en sentido y en intensidad) en función de la evolución del ciclo de marea. Se observa en particular la diferencia entre el flujo de fondo y de superficie en la zona exterior del Río de la Plata. Por otro lado se presenta en las Figuras 3.40 y 3.41 los campos de corrientes instantáneos obtenidos con el modelo en la capa 2 de fondo y la capa 7 cercana a la superficie durante una tormenta ocurrida entre el 12 y el 14 de agosto 2010, que corresponde a condiciones de altos niveles de marea meteorológica (ver Figura 3.30).

Se observa en los ejemplos presentados cómo varía el flujo en las diversas zonas del Río de la Plata. En la zona interior e intermedia se observa un flujo de igual sentido en fondo y superficie con intensidades que aumentan hacia la superficie libre, característicos de un flujo bidimensional. No obstante se observan en general mayores intensidades sobre la costa argentina. En la zona exterior se observa una gran diferencia tanto en el sentido como en la intensidad de corriente espacialmente, con canales preferenciales de flujo. Se destaca la zona del Canal Oriental por el Norte sobre la costa uruguaya y el Canal Marítimo sobre la costa Sur argentina. No obstante la gran variabilidad de campos presentada muestra situaciones donde en las zonas centrales las corrientes son bajas o en situaciones de tormenta (fuertes vientos) donde hay un ingreso o salida fuerte de corrientes por la zona central del Río de la Plata. Por otra parte se observan mayores variaciones en el patrón de corrientes, principalmente en las capas superficiales, durante períodos de tormenta y marea meteorológica, que durante períodos de marea astronómica.

Claramente estos resultados muestran la gran diversidad de flujo en la zona y por tanto no resulta sencillo caracterizar los principales patrones de circulación. A pesar de que las características del flujo instantáneo son las que influyen en la dinámica de sedimentos, resulta también de interés clasificar los patrones de circulación residuales en la zona. Debido a esto se calcularon en este análisis los campos residuales (promedio) de flujo en fondo y en superficie para distintos períodos de integración. El campo residual en fondo y en superficie obtenido para el mes de febrero 2010 se presenta en la 3.42 mientras que en la 3.43 se presentan los campos residuales correspondientes al mes de agosto 2010. Estos campos se obtuvieron promediando el flujo calculado por el modelo durante todo el mes.

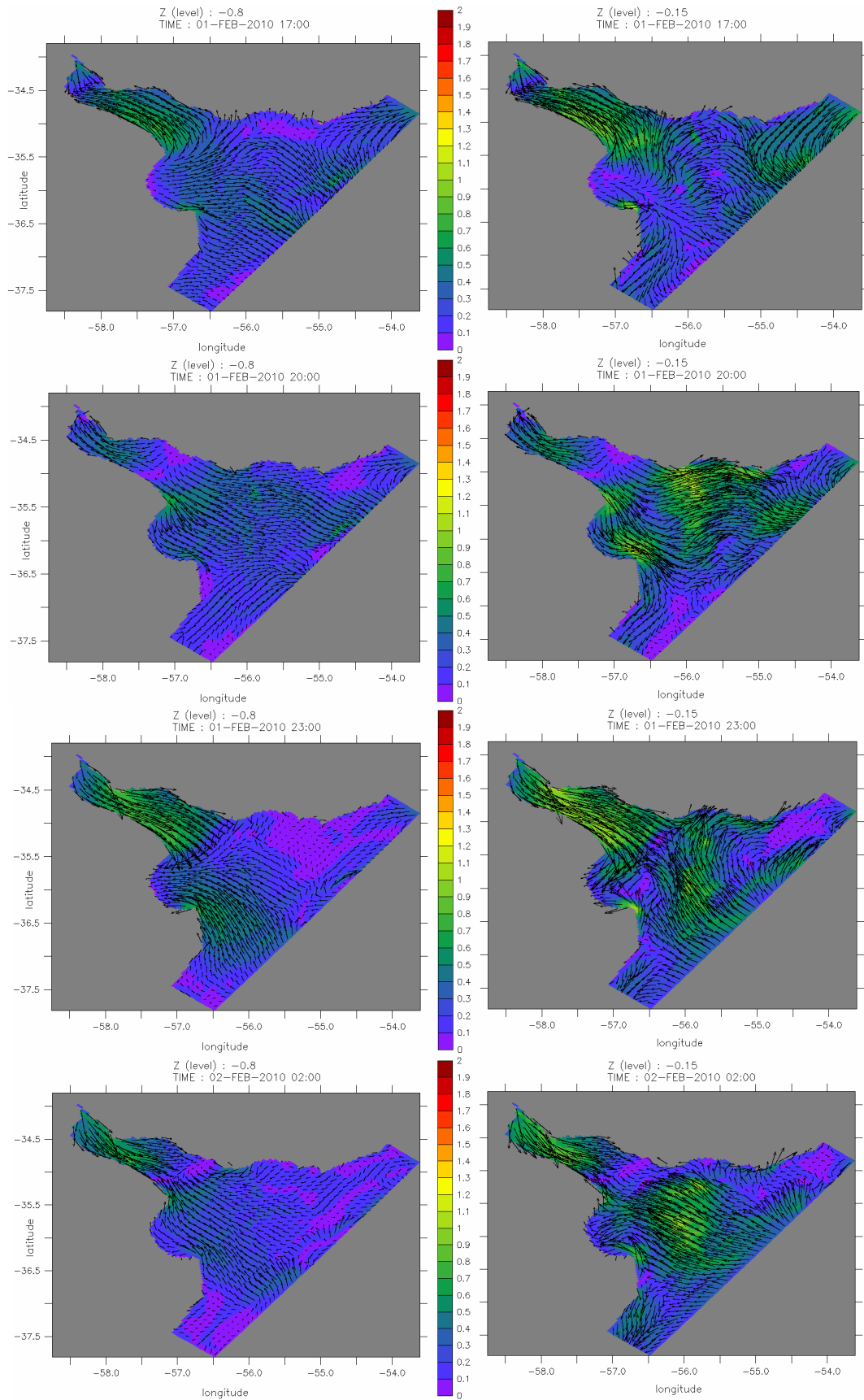


Figura 3.38: Campos de corrientes (m/s) instantáneos en la capa de fondo (paneles izquierdos) y en la capa superficial (paneles derechos) cada 3 horas durante un día de condiciones astronómicas; 01/02/2010 17:00hs al 02/02/2010 02:00hs.

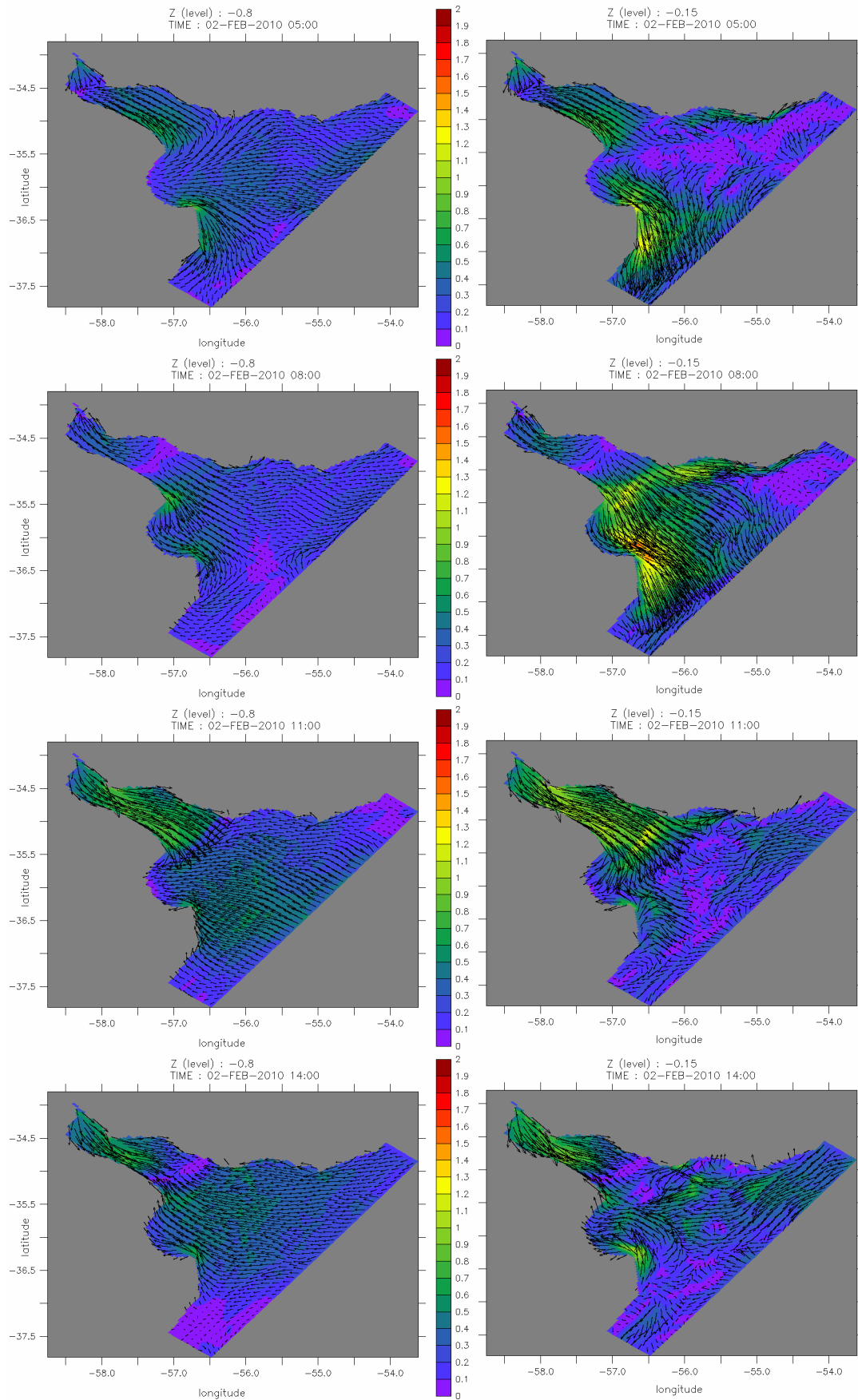


Figura 3.39: Campos de corrientes (m/s) instantáneos en la capa de fondo (paneles izquierdos) y en la capa superficial (paneles derechos) cada 3 horas durante un día de condiciones astronómicas; 02/02/2010 05:00hs al 02/02/2010 14:00hs.

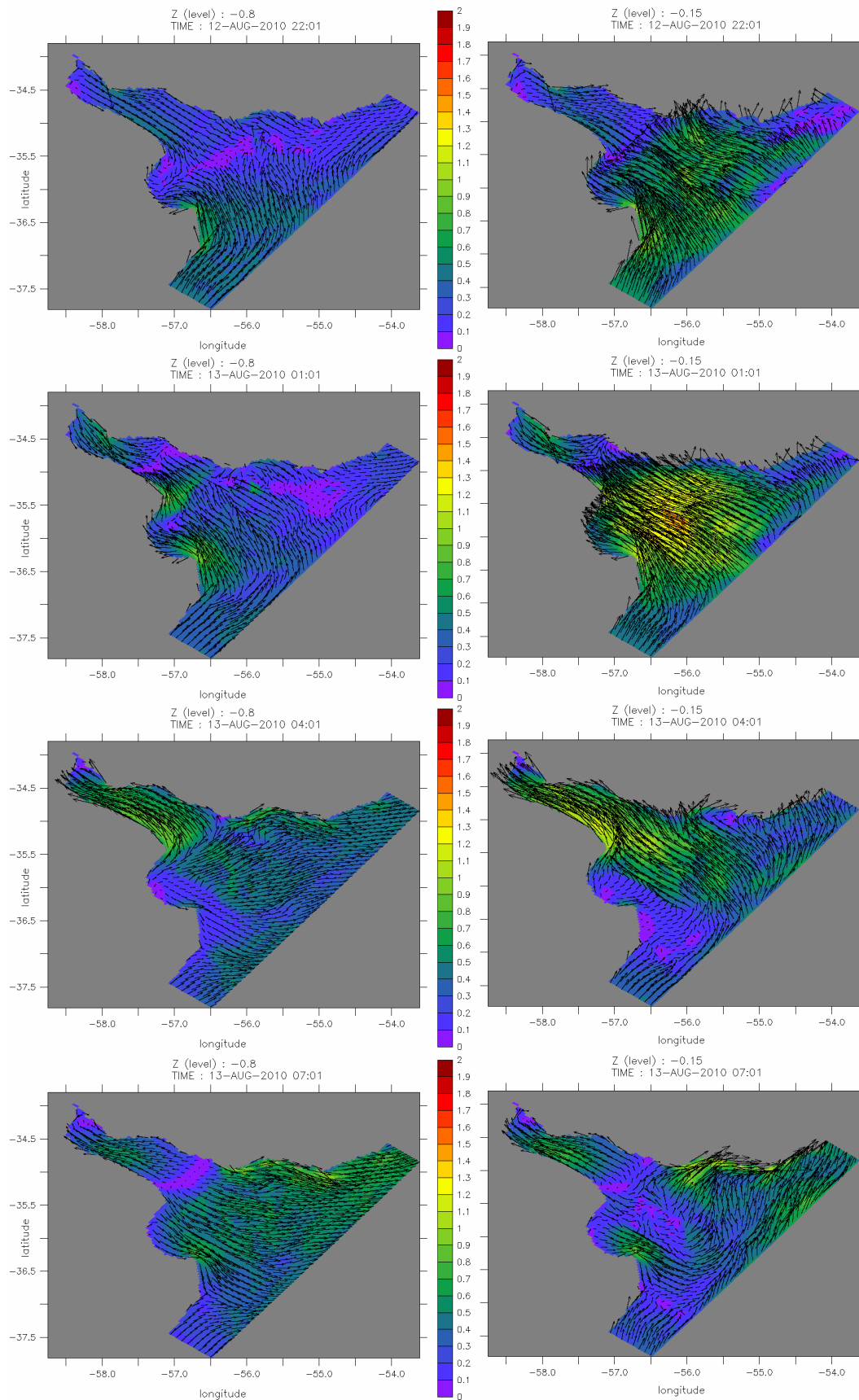


Figura 3.40: Campos de corrientes (m/s) instantáneos en la capa de fondo (paneles izquierdos) y en la capa superficial (paneles derechos) cada 3 horas durante condiciones de tormenta; 12/08/2010 22:00hs al 13/08/2010 07:00hs.

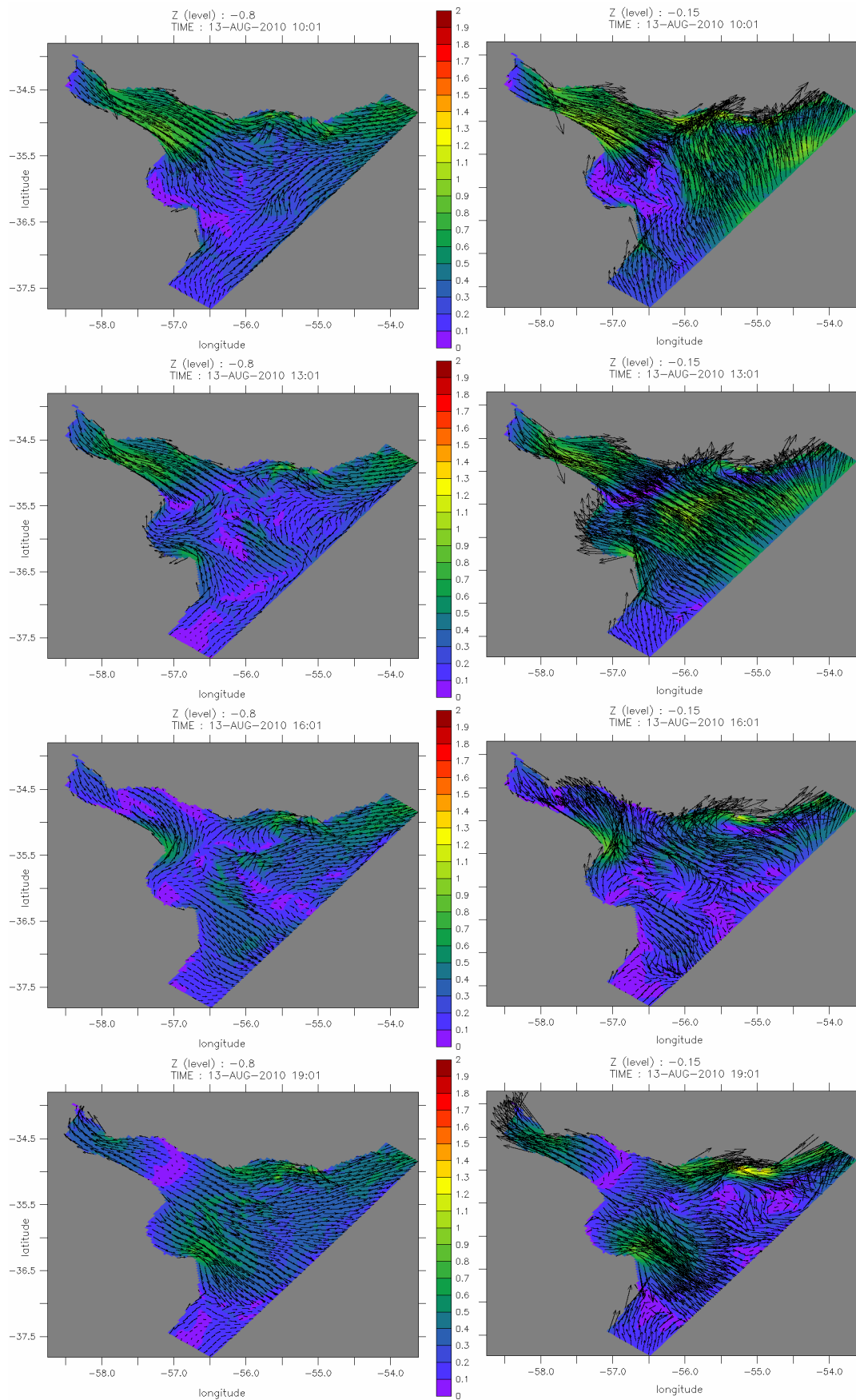


Figura 3.41: Campos de corrientes (m/s) instantáneos en la capa de fondo (paneles izquierdos) y en la capa superficial (paneles derechos) cada 3 horas durante condiciones de tormenta; 13/08/2010 10:00hs al 13/08/2010 19:00hs.

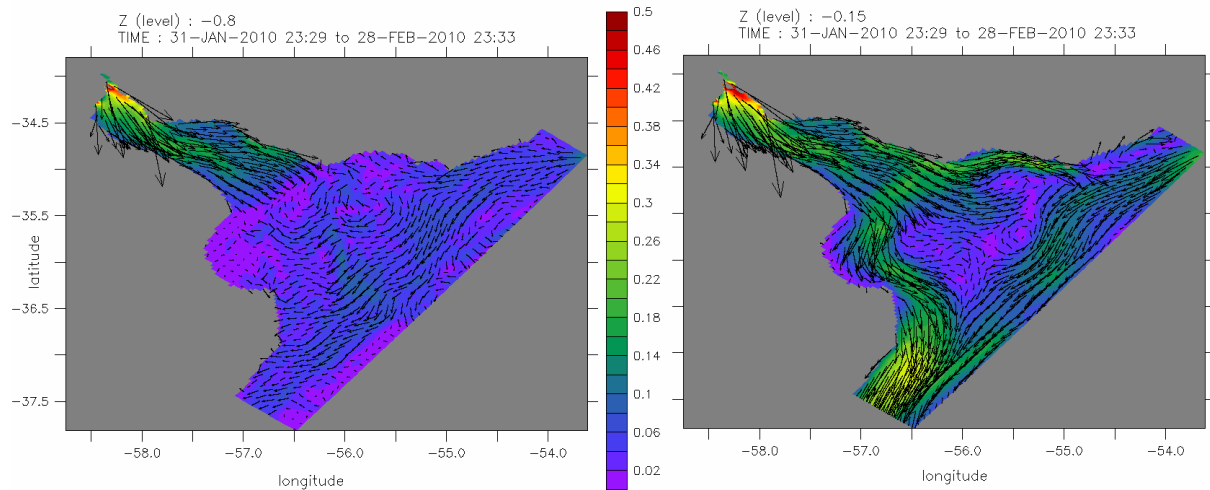


Figura 3.42: Campos residuales de corrientes (m/s) en la capa de fondo (panel izquierdo) y en la capa superficial (panel derecho) para el mes de febrero 2010.

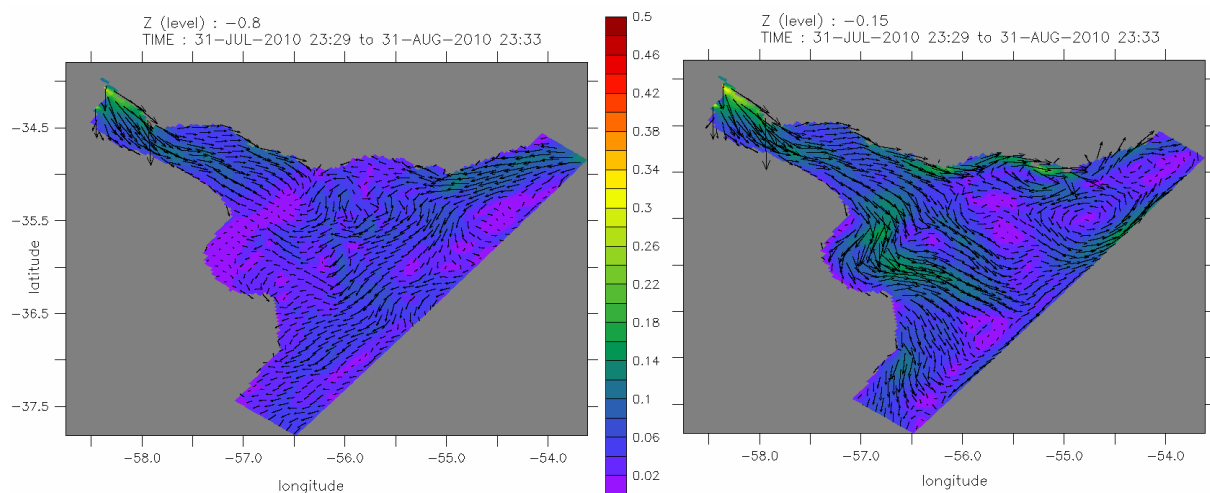


Figura 3.43: Campos residuales de corrientes (m/s) en la capa de fondo (panel izquierdo) y en la capa superficial (panel derecho) para el mes de agosto 2010.

Los campos residuales muestran que las intensidades del flujo neto son mucho menores que las intensidades instantáneas debido a la rotación del flujo por el efecto de la marea. Se observa además que en la zona interior las diferencias entre el flujo residual en superficie y en fondo son mucho menores a las diferencias que se observan en la zona exterior. En esta zona domina el efecto del caudal fluvial. Se observa en la zona exterior que principalmente hay un flujo neto sobre el fondo que ingresa al Río de la Plata por el canal Oriental ubicado al Norte, mientras que sobre la zona superior de la columna de agua se observa un flujo saliente al Río de la Plata por las zonas bajas costeras de ambas márgenes (Norte y Sur) y también por la zona Central sobre el Banco Inglés. Este comportamiento del flujo residual en la zona es similar al presentado en (Fossati and Piedra-Cueva, 2013) obtenido utilizando otro modelo tridimensional en la zona. La coherencia entre los resultados certifica los buenos resultados obtenidos en el ajuste del modelo MARS.

Sintetizando, el modelo hidrodinámico de marea muestra la dinámica del Río de la Plata se diferencia según la denominada zona interior e intermedia ubicada aguas arriba de la línea Punta Piedras-Montevideo (Barra del Indio) y la zona exterior, la cual está caracterizada por el ensanchamiento de sección, la existencia de varios canales y la

gran variabilidad del campo salino. En la zona interior la dinámica es básicamente bidimensional con flujo entrante o saliente según el ciclo de marea pero con un flujo residual saliente hacia el Océano Atlántico generado por el caudal fluvial que ingresa al Río de la Plata. En la zona exterior la dinámica es mucho más compleja de características tridimensionales y variaciones en las secciones según las zonas profundas (canales Oriental y Marítimo) y las zonas poco profundas (banco Inglés, de Arquímedes y Bahía Samborombón).

3.3. MODELO DE OLEAJE EN EL RÍO DE LA PLATA

Para simular las condiciones del oleaje en el Río de la Plata se utiliza el modelo SWAN de la Universidad de Delft (SWAN, 2006) implementado para la malla del dominio rank1 y forzado en la frontera abierta por los espectros de ola extraídos de simulaciones globales del modelo WAVEWATCH-III a escala planetaria implementado y ajustado en IFREMER (Ardhuin et al., 2010). El modelo implementado fue ajustado utilizando diversas mediciones de oleaje en el área con el objetivo de obtener una buena representación del mismo en la zona.

3.3.1. El modelo numérico SWAN

El SWAN es un modelo de oleaje de tercera generación que se aplica a mesoescala en zonas nearshore (no recomendado para escala oceánica) que se utiliza para obtener los parámetros principales del oleaje en áreas costeras, lagos y estuarios, a partir de la información dada de vientos, del fondo y de las condiciones de corriente. SWAN es un modelo que está en desarrollo y en evolución continua mejorando principalmente los procesos que se incluyen y los procesos de cómputo. Se extraen aquí los elementos básicos del modelo presentado en publicaciones vinculadas (SWAN, 2006; Booij et al., 1999; Dufois, 2008).

En el modelo SWAN se utiliza la ecuación de balance del espectro de densidad de acción denominado N , definido como $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$, siendo E la densidad espectral de energía, σ la frecuencia relativa de ola (respecto a un referencial desplazado según la corriente media) y θ la dirección de ola (dirección normal a la cresta). Se utiliza dicha variable en vez de la energía del espectro ya que en presencia de una corriente la energía no se conserva por el intercambio con la corriente. La ecuación de balance se expresa en coordenadas cartesianas espaciales x , y según:

$$\underbrace{\frac{\partial N}{\partial t}}_A + \underbrace{\frac{\partial(c_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y N)}{\partial y}}_B + \underbrace{\frac{\partial(c_\sigma N)}{\partial \sigma}}_C + \underbrace{\frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta}}_D = \underbrace{S}_E \quad (3.48)$$

(A) representa la variación local

(B) representa la propagación espacial de N con velocidades de propagación c_x y c_y en las direcciones x e y , respectivamente.

(C) representa la redistribución de energía a través del espectro debido a la transferencia en frecuencias por las variaciones temporales del nivel y las corrientes, con velocidad de propagación c_σ en el espacio σ .

(D) representa la redistribución de energía a través del espectro debido a los procesos de refracción por efecto de la batimetría o de las corrientes, con velocidad de propagación c_θ en el espacio θ .

(E) S representa el término fuente de energía espectral que incluye la generación por el efecto del viento (interacción ola-viento), las interacciones no lineales (o intercambios ola-ola) y la disipación por fricción de fondo y rotura.

Al aplicar la teoría lineal de oleaje, se utiliza la ecuación de dispersión que relaciona los principales parámetros del oleaje (ecuación 3.49), siendo h la altura de agua, g la aceleración de la gravedad, $\vec{U} = (U, V)$ el vector corriente, y \vec{k} el vector número de onda de intensidad k (número de onda) y dirección θ .

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kh)} = \omega - \vec{k} \cdot \vec{U} \quad (3.49)$$

Las velocidades de propagación están determinadas por las siguientes relaciones:

$$c_x = \frac{dx}{dt} = c_g \sin \theta + U \quad (3.50)$$

$$c_y = \frac{dy}{dt} = c_g \cos \theta + V \quad (3.51)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial h} \left[\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} h \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \quad (3.52)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right) \quad (3.53)$$

donde s es la coordenada según la dirección de propagación θ , m la coordenada normal a s , el operador $\vec{\nabla}$ el gradiente especial y el operador derivada total definido por $d/dt = \partial/\partial t + (\vec{U} + \vec{c}_g) \cdot \vec{\nabla}$. Por último C_g es la celeridad de grupo dada por la ecuación 3.54.

$$c_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = \left[\frac{1}{2} + \frac{kh}{\sinh^2 kh} \right] \frac{\sigma}{k} \quad (3.54)$$

Las diversas formulaciones implementadas en el modelo SWAN para el cálculo de los términos fuente S se presentan en el artículo de Booij et al. (1999). Se extraen de dicho trabajo y se presentan aquí solamente las formulaciones vinculadas con la disipación de energía por fricción de fondo. En términos generales la fricción de fondo se representa según la ecuación 3.55 siendo C_{bottom} el coeficiente de fricción de fondo.

$$S_{db,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kh)} E(\sigma, \theta) \quad (3.55)$$

En el SWAN C_{bottom} puede determinarse a partir de tres formulaciones distintas, la formulación del proyecto conocido como JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) que utiliza un valor constante obtenido empíricamente; la formulación denominada de COLLINS del tipo no lineal en función de un coeficiente de drag, y una formulación más compleja dependiente de la viscosidad turbulenta propuesta por MADSEN y otros autores. En función de las grandes variaciones en las condiciones de fondo en las distintas áreas costeras no hay evidencia de que una formulación sea preferible (Booij et al., 1999). En este trabajo se evalúan los resultados utilizando las dos primeras aproximaciones:

$$\text{JONSWAP: } C_{bottom} = 0,038 \text{ m}^2/\text{s}^3 \text{ oleaje swell}$$

$$C_{bottom} = 0,067 \text{ m}^2/\text{s}^3 \text{ oleaje sea} \quad (3.56)$$

$$\text{COLLINS: } C_{bottom} = C_f g U_{rms}; \quad (3.57)$$

siendo C_f un coeficiente y U_{rms} el valor promedio cuadrático de la velocidad orbital inducida por el oleaje sobre el fondo.

3.3.2. Implementación del modelo SWAN

3.3.2.1. Características generales

Se utiliza en este trabajo la versión 40.72 del SWAN para el sistema operativo linux instalada en IFREMER. La implementación se realiza en modo no estacionario bidimensional y del tipo tercera generación. El modelo determina la generación y propagación del oleaje en el dominio de cálculo utilizando como forzante el campo de vientos que actúa sobre la superficie libre. Se incluyen los procesos de rotura y de disipación de energía por fricción en la simulación, no incluyéndose la difracción ni la interacción oleaje-oleaje. Los espectros provenientes de un modelo global se incluyen en las condiciones de borde abiertas para incluir en la implementación realizada el efecto del oleaje lejano. Además, se incluyen en cada celda el valor del nivel y de corriente obtenidos previamente del modelo hidrodinámico de marea MARS (forzado con vientos NCEP), por lo que se toma en cuenta el efecto de la variación de los mismos en el cálculo del oleaje.

El modelo SWAN fue implementado y calibrado para la zona de estudio utilizando la grilla de cálculo y la batimetría en cada celda correspondiente, definidas para el rank1 del modelo MARS y que se presentó en la sección anterior (Figura 3.3). De esta forma los resultados obtenidos con el SWAN se utilizan directamente como inputs en el modelo MARS sin necesidad de interpolación espacial. Una vez realizada la transformación de la grilla del formato MARS (netcdf) al formato SWAN (ASCII) se realizaron simulaciones de prueba con condiciones de borde simples como viento uniforme para testear la estabilidad de la malla. Debido a la depuración de la batimetría realizada para el modelo MARS los resultados obtenidos fueron satisfactorios y no fue necesaria una mayor filtración de la misma.

La implementación del modelo conlleva varias etapas además de la preparación de la batimetría en cada celda de la grilla en el formato adecuado. En relación al forzante viento la preparación de los archivos de condiciones de borde se realiza en dos etapas. En primer lugar se realiza una interpolación espacial de los datos de la grilla de los vientos de Re-análisis utilizados a la grilla del rank1. En segundo lugar se realiza el cambio de formato de los vientos interpolados a la grilla rank1, de formato tipo NETCDF a formato ASCII, similar a lo realizado anteriormente para la grilla y la batimetría. El modelo SWAN posteriormente realiza una interpolación temporal. En la implementación realizada se calcula la propagación del oleaje teniendo en cuenta los campos de niveles y de corriente barotrópica en la zona. Estos campos son calculados previamente en cada celda de cálculo por el modelo MARS para los instantes de tiempo correspondientes y luego son ingresados al modelo SWAN. Nuevamente se realiza una modificación del formato de archivos entre modelos, desde el formato NETCDF de los archivos de salida del MARS a formato ASCII que se ingresa al SWAN. Por último, se ingresaron como condiciones de borde los espectros de oleaje calculados por el modelo global WW3 implementado en escala planetaria por IFREMER. Estos espectros se corresponden con el período de tiempo de cada simulación.

La estrategia utilizada para la implementación del modelo consistió en una etapa inicial donde se testaron los diversos componentes de las simulaciones agregándolos

gradualmente al modelo. De esta manera se analizó el efecto en la solución de incluir la información del modelo hidrodinámico MARS y la información del modelo global. Durante estos análisis se identificaron inestabilidades en la frontera Sur que requirieron un ajuste del esquema numérico implementado. La configuración válida es utilizar un esquema numérico centrado de segundo orden para la refracción limitando a 90° la máxima variación de la dirección de oleaje en una celda, de forma de evitar grandes transiciones que ocurren en las fronteras al incluir el campo de corrientes. Una vez definida una configuración de base estable y confiable se ajustó el modelo.

3.3.2.2. Condiciones de borde: modelo global WW3

En IFREMER se viene desarrollando desde hace mucho tiempo la aplicación del modelo WaveWatch III (WW3) a escala planetaria con una alta resolución de 0,5° x 0,5° para representar las características principales del oleaje y su propagación (Ardhuin et al., 2010). El modelo WW3 es un modelo de oleaje de tercera generación desarrollado por la NOAA-/NCEP/NWS. El modelo resuelve como el SWAN la ecuación de conservación de la densidad de acción del espectro considerando las fuentes de energía de oleaje mencionadas anteriormente pero considerando como variables independientes el número de onda y la dirección de ola:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_k N)}{\partial k} + \frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (3.58)$$

$$c_k = \frac{dk}{dt} = -\frac{\partial \sigma}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial s} - \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \quad (3.59)$$

El modelo WW3 ha sido ajustado y es utilizado frecuentemente como modelo global para forzar modelos regionales y locales (Tessier, 2006; Dufois, 2008). La versión del modelo que se utilizó en este caso es forzada por campos globales atmosféricos realizados por el centro europeo ECWMF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) A modo de ejemplo se presenta en la Figura 3.44 el campo de Hs (m) obtenido para un determinado instante de tiempo con el modelo WW3 en la implementación global de IFREMER.

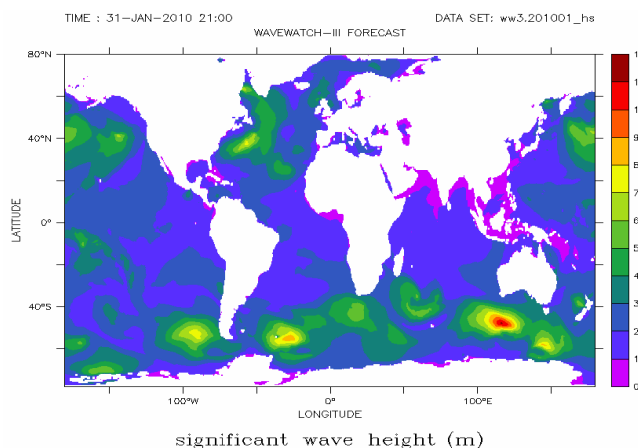


Figura 3.44: Ejemplo del campo de altura de ola significativa (Hs) del modelo global WW3 a partir del cual se obtienen las condiciones de borde del modelo local SWAN.

Para utilizar como condiciones de borde los espectros de oleaje del modelo global se seleccionaron ciertos puntos a lo largo de la frontera oceánica del dominio rank1 considerando las variaciones topográficas y la resolución del modelo global. Luego de

varias modificaciones se obtuvo la configuración final con 17 puntos en los cuales se extraen los espectros calculados por el modelo global WW3 y posteriormente dichos espectros son ingresados como condición de borde del modelo de oleaje SWAN en la simulaciones del dominio rank1. En la Figura 3.45 se muestra la ubicación final de dichos puntos. Es importante mencionar que el modelo SWAN acepta que los puntos no estén ubicados exactamente en la grilla de cálculo ya que realiza interpolación a partir de la definición de los mismos en los segmentos de las fronteras del dominio. Los archivos de condiciones de borde se generan a partir de las simulaciones del WW3 anuales y consisten en los espectros bidimensionales (frecuencia y dirección) determinados cada tres horas. Para cada punto definido se obtiene un archivo tipo ASCII que después es procesado para generar el formato (también ASCII) específico de lectura de SWAN para espectros bidimensionales. La discretización del espectro del modelo global WW3 (en frecuencia y dirección) no necesariamente tiene que ser la misma que la utilizada en el modelo SWAN. La discretización del modelo global es 15° (24 direcciones) y 32 frecuencias entre 0,0373 y 0,7160 1/seg (no homogéneos). Se utiliza además la solución del modelo global WW3 como solución de referencia para comparar con el modelo SWAN. A pesar de que esta solución tiene ciertas limitaciones en la zona del Río de la Plata (por la baja resolución, $0,5^\circ \times 0,5^\circ$), se considera válida para tomar como solución inicial a mejorar con la implementación del modelo local SWAN en la zona de estudio.



Figura 3.45: Ubicación de los puntos sobre la frontera oceánica del rank1 donde se ingresan los espectros de oleaje del modelo WW3 al modelo SWAN. Ubicación de las celdas de control donde se cuenta con medidas de oleaje para el ajuste del modelo, Montevideo (PB) e Hidrovia (Hid).

3.3.2.3. Condiciones de borde: forzante atmosférico

Durante el trabajo de modelación del oleaje en el Río de la Plata fue necesario utilizar 3 fuentes de información diferentes de campos globales atmosféricos generados de Re-análisis (combinación de modelos numéricos y observaciones).

Inicialmente se utilizó la información del primer Re-análisis realizado durante los años 90 por el NCEP de USA de baja resolución (aproximadamente $2,5^\circ \times 2,5^\circ$) que se denominan para este trabajo vientos NCEP (Kalnay et al., 1996). A pesar de que se obtuvieron buenos resultados el modelo SWAN calibrado no logró mejorar los resultados obtenidos con el modelo global WW3. Considerando que el modelo global trabaja en base a información de Re-análisis desarrollados recientemente se decidió cambiar el forzante atmosférico del modelo SWAN. En segundo lugar se utilizaron los resultados del Re-análisis reciente realizado en el NCEP (Saha et al., 2010) que mejora la base de datos anterior y que incrementa la resolución espacial (aproximadamente $1/3^\circ$ variable); denominado para este trabajo vientos NCEP-CFSR. En tercer lugar, se trabaja con la

información de Re-análisis desarrollada por el Centro Europeo de Pronósticos Climáticos (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECWMF) de alta resolución (0,25° ó 0,5° en función de la disponibilidad según el período de tiempo). Esta información se denomina como vientos CEP. A pesar de que los resultados obtenidos con la base de datos NCEP-CSFR son razonables la calidad de la modelación con el SWAN se incrementa al utilizar los vientos CEP. Analizando los campos de vientos de las tres fuentes de información se observan diferencias principalmente en intensidad. Claramente el incremento de la resolución es un factor muy importante en la mejora de la información del campo de vientos para el dominio simulado.

3.3.3. Calibración y validación del modelo

3.3.3.1. Metodología

Una vez realizados los test preliminares de funcionamiento del modelo con las condiciones iniciales y de borde establecidas se procedió a ajustar el modelo para representar correctamente el oleaje en la zona. De hecho puede afirmarse que se realizaron tres calibraciones del modelo en función de la fuente de información de vientos utilizada para forzarlo. Se definieron simulaciones mensuales con un paso temporal de 30 minutos. Uno de los principales parámetros de ajuste fue un factor de amplificación aplicado al viento introducido como condición de borde en el modelo SWAN. Se comenzó trabajando con los datos de baja resolución NCEP y se realizaron las simulaciones y análisis que se presentan en la Tabla 3.13. Posteriormente se trabajó con la versión mejorada de los mismos, los vientos NCEP-CSFR. La mayor parte de los análisis y controles se realizaron con éstos vientos; las características de las simulaciones se presentan en la Tabla 3.14. Por último se trabajó con los vientos de alta resolución CEP para los cuales se realizaron diversas simulaciones y se ajustaron los parámetros del modelo, según lo mencionado en la Tabla 3.15.

Forzante atmosférico	Factor de amplificación	Meses simulados	Control	Síntesis resultados obtenidos
Vientos NCEP	1	enero, febrero 2007	PB, WW3	- El modelo representa alturas de ola menores a las medidas con una variabilidad similar
		abril, mayo, junio 2003	Hid, WW3*	- Por la subestimación de la intensidad de viento de la base de datos NCEP se decide analizar el efecto de aumentar el factor de amplificación.
	2	enero 2007	PB, WW3	El modelo genera mayores alturas de ola se descarta la opción.
	1.3	enero, febrero, mayo, junio, agosto, setiembre, noviembre, diciembre 2007	PB, WW3	- Aumentando el factor de amplificación del viento NCEP a 1.3 se logra reproducir la variación temporal de oleaje medida en PB y en hidrovía.
abril, mayo, junio 2003		Hid, WW3*	- No obstante, el ajuste obtenido no supera en gran medida al obtenido con el modelo global WW3.	

* En estas simulaciones no se incluyen como condiciones de borde los espectros del modelo global

Tabla 3.13: Características de las simulaciones y del ajuste realizado del modelo SWAN utilizando los vientos NCEP.

Se utilizaron básicamente dos fuentes de información de oleaje medido en la zona como guía para ajustar el modelo. Por un lado mediciones realizadas en la costa de Montevideo por la IMM (Fossati et al., 2009) mediante un ADCP con medidor de oleaje (referidas como mediciones en PB). Por otro lado mediciones realizadas en la boca exterior del Río de la Plata sobre el eje central del mismo con un equipo instalado en la denominada Boya Hidrovía (mediciones referidas como Hidr). La ubicación

correspondiente en la malla del modelo de ambas mediciones se observa en la Figura 3.45 presentada anteriormente.

Forzante atmosférico	Factor de amplificación	Meses simulados	Control	Síntesis resultados obtenidos
Vientos NCEP-CSFR	1	enero, febrero 2007	PB, WW3	- El modelo representa alturas de ola menores a las medidas con una variabilidad similar
	1.2	enero, febrero, mayo, junio, agosto, setiembre, noviembre, diciembre 2007	PB, WW3	- Se evalúan los resultados con un factor de amplificación 1.2. Se obtiene un buen ajuste de los datos. Se extiende el período de simulación para analizar diversos casos
		enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio 2009	PB, WW3	- Se simula otro período de tiempo como validación. Se obtiene un buen ajuste en Montevideo. .
	1.3	enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio 2006	Hid, WW3	- Se chequean resultados en un punto exterior. El modelo reproduce la variabilidad de los datos. Ajuste razonable
		enero, febrero, mayo, junio, agosto, setiembre, noviembre, diciembre 2007	PB, WW3	- Se evalúan los resultados con un factor de amplificación 1.3. Se obtiene un buen ajuste de los datos medidos.
		enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio 2009	PB, WW3	- Se simula otro período de tiempo como validación. Se obtiene un buen ajuste en Montevideo y se supera la calidad del modelo global WW3. Se valida la parametrización y se acepta como configuración final
		enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio 2006	Hid, WW3	- Se chequean resultados en un punto exterior. En general se exceden las alturas de ola máxima observadas en los datos.

Tabla 3.14: Características de las simulaciones y del ajuste realizado del modelo SWAN utilizando los vientos NCEP- CSFR.

Forzante atmosférico	Factor de amplificación	Meses simulados	Control	Parametrización Fricción	Síntesis resultados obtenidos
Vientos CEP	1.3	enero, febrero 2009	PB, WW3	Jonswap	-Se obtienen valores mayores de altura de ola que las registradas en las medidas. No es necesario un factor de amplificación.
	1	enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio 2009	PB, WW3	Jonswap	- Sin factor de fricción se obtiene un buen ajuste de la variabilidad temporal y de los máximos de altura de ola en Montevideo
		enero 2009	PB, WW3	Collins fcd	- Análisis de sensibilidad a la fricción de fondo. No se mejora el ajuste anterior.
	enero 2009	PB, WW3	Collins fc1		
	1	enero, febrero 2009	PB, WW3	Collins fc2	- Sin factor de fricción se obtiene un buen ajuste de la variabilidad temporal y de los máximos de altura de ola en Hidrovía (zona exterior).
		enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio 2006	Hid, WW3	Jonswap	
		enero 2006	Hid, WW3	Collins fc1	- Análisis de sensibilidad a la fricción de fondo. No se mejora el ajuste anterior
		enero, febrero 2006	Hid, WW3	Collins fc2	

Tabla 3.15: Características de las simulaciones y del ajuste realizado del modelo SWAN utilizando los vientos CEP.

Además de las medidas mencionadas se utilizaron los resultados del modelo global WW3 en las celdas representativas de los puntos de medición PB e Hid para

evaluar la calidad del modelo. A pesar de que no sería posible utilizar el modelo global como modelo de oleaje en este estudio, pues la baja resolución del mismo no permite representar el Río de la Plata interior e intermedio, el esfuerzo de realizar un modelo local tiene como principal objetivo superar la calidad del modelo global de menor resolución.

En todas las simulaciones realizadas con los vientos NCEP y NCEP-CSFR se define una parametrización de la fricción según la formulación de JONSWAP con $C_{bottom} = 0,067 \text{ m}^2/\text{s}^3$. En las simulaciones con viento CEP se realizó un análisis de sensibilidad a dicha parametrización. Se realizaron pruebas con la formulación de COLLINS utilizando $C_f = 0,015$ (Collins fcd), un valor mayor $C_f = 0,03$ (Collins fc1) y un segundo valor todavía mayor de $C_f = 0,06$ (Collins fc2). Para evaluar los diversos ajustes del modelo se consideraron métodos cuantitativos y cualitativos. Por un lado se calcularon los errores (RMSE) y correlaciones obtenidas entre las series medidas y obtenidas con el modelo con un paso temporal mensual. Estos valores permiten realizar comparaciones cuantitativas entre las diversas simulaciones pero se consideran deben complementarse con un análisis de la variación temporal de las series de oleaje. En este sentido se tuvo especialmente en cuenta la representación del modelo de los eventos extremos de oleaje medidos debido a la importancia de estos eventos sobre la dinámica de sedimentos finos.

3.3.3.2. Resultados obtenidos

Para simplificar la presentación de resultados se presentan con detalle los resultados obtenidos con los vientos CEP, para los cuales se obtienen los resultados más satisfactorios. Los principales resultados obtenidos durante las simulaciones realizadas con vientos NCEP y NCEP- CSFR se presentaron sintéticamente en las Tablas 3.13 y 3.14, respectivamente.

Al utilizar los vientos CEP el modelo reproduce correctamente las mediciones tanto en PB como en Hidrovía sin que sea necesario utilizar un factor de amplificación. En la Figura 3.46 se presenta a modo de ejemplo del ajuste del modelo SWAN con vientos CEP, la comparación temporal del oleaje medido en PB y obtenido con el modelo durante enero de 2009. Se observa claramente como el modelo forzado con los vientos CEP (sin factor de amplificación) reproduce el comportamiento de las medidas en Montevideo. Además se observa un comportamiento similar al del modelo global WW3, debido probablemente a que dicho modelo es forzado por los vientos denominados CEP. En relación a los restantes parámetros se observa una buena representación en general del período pico y de la dirección del oleaje.

En la Figura 3.47 se presenta un ejemplo del ajuste obtenido de los datos de Hidrovía utilizando el viento CEP. Se observa el modelo representa el comportamiento del oleaje representando el evento de tormenta con una altura significativa máxima un poco menor a la medida. La cuantificación del error y de la correlación para la altura de ola significativa obtenida en las diversas simulaciones realizadas con vientos CEP se presenta en la Tabla 3.16. También se presentan en la misma los valores obtenidos con el modelo global WW3. Para los meses que es posible comparar, se observa que los errores obtenidos son menores en la configuración sin factor de amplificación que en la configuración con factor 1,3. Se observa además con el modelo SWAN ajustado con vientos CEP en todos los meses del 2009 el error es menor y la correlación mayor a los que se obtienen con el modelo global WW3, lo que indica el modelo local mejora la calidad del modelo global de base. En el Anexo B.2 se presentan las tablas correspondientes de errores y correlaciones obtenidas para el período y dirección del oleaje.

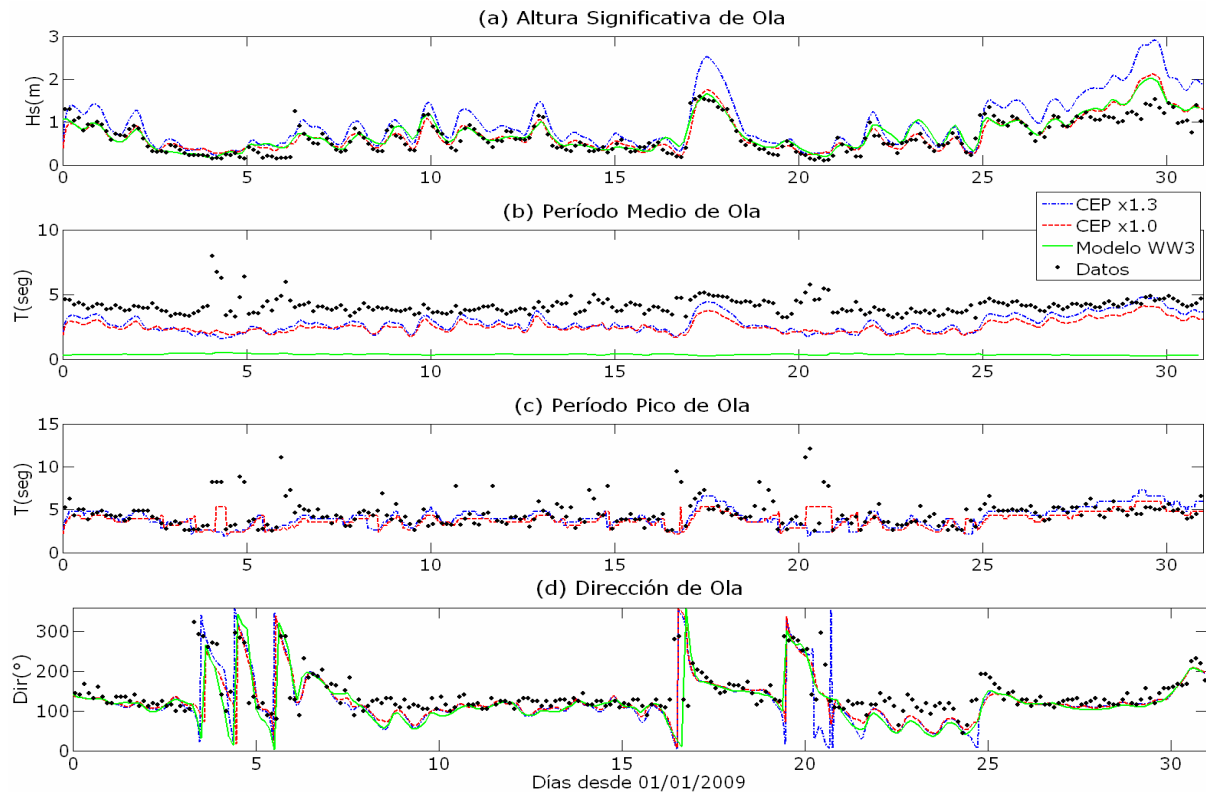


Figura 3.46: Comparación de la variación temporal de los parámetros de oleaje obtenido con el modelo SWAN con vientos CEP con factor de amplificación nulo y 1.3, con el modelo WW3 y valores medidos en PB en Montevideo durante enero de 2009.

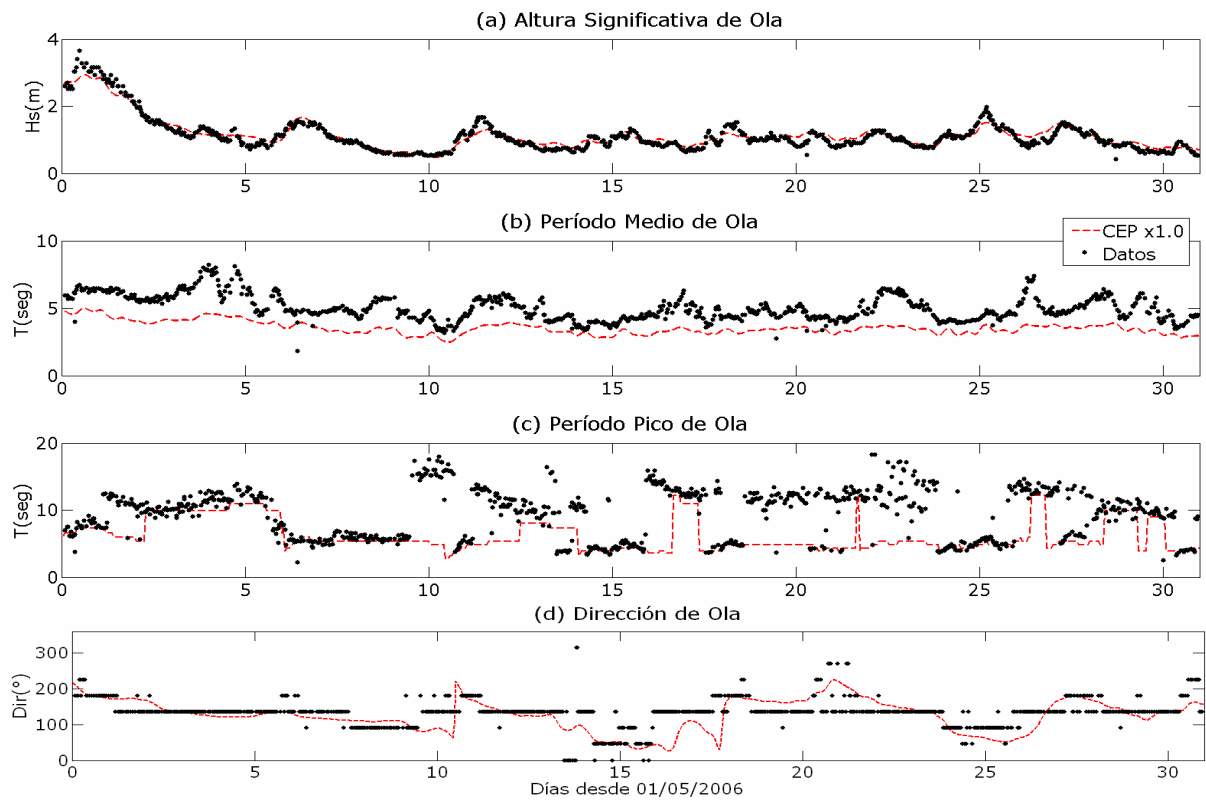


Figura 3.47: Comparación de la variación temporal de los parámetros de oleaje obtenido con el modelo SWAN con vientos CEP con factor de amplificación nulo y valores medidos en Hidrovía durante mayo de 2006.

		MESES DEL AÑO 2009					
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
SWAN Viento CEP x1.0	RMSE (m)	0.20	0.15	0.16	0.14	0.14	0.17
	Correlación	0.88	0.88	0.82	0.89	0.95	0.97
SWAN Viento CEP x1.3	RMSE (m)	0.44	0.32	---	---	---	---
	Correlación	0.90	0.90	---	---	---	---
Modelo WW3	RMSE (m)	0.20	0.17	0.18	0.19	0.21	0.22
	Correlación	0.88	0.86	0.80	0.82	0.86	0.91

		MESES DEL AÑO 2006					
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
SWAN Viento CEP x1.0	RMSE (m)	0.21	0.27	0.30	0.22	0.16	0.24
	Correlación	0.73	0.90	0.76	0.87	0.96	0.90

Tabla 3.16: Valores de error y correlación obtenidos para la altura significativa de ola obtenida con el modelo utilizando los vientos CEP y los datos medidos en PB e Hidrovía.

Como se mencionó se realizó un segundo nivel de ajuste del modelo utilizando vientos CEP analizando el efecto de la parametrización de la rugosidad de fondo sobre los resultados obtenidos. En las simulaciones anteriores se utilizó la rugosidad JONSWAP. En las pruebas realizadas se utilizó la formulación de COLLINS con diferentes parámetros. En la Tabla 3.17 se presentan los valores de RMSE y correlación de altura de ola entre el modelo y los datos para las diversas pruebas realizadas. Los resultados obtenidos para el período y dirección de ola se presentan en el Anexo B.2. Los valores muestran que no se mejora el ajuste obtenido con la fricción JONSWAP al utilizar la formulación de COLLINS. Cuantitativamente los resultados muestran que con COLLINS se obtienen mayores valores de la altura de ola en todo el Río de la Plata. A su vez, mayores parámetros generan mayor fricción y por tanto la configuración denominada fc2 es la que representa el comportamiento más cercano a las medidas. En la Figura 3.48 se presenta a modo de ejemplo la variación temporal del oleaje obtenido para el mes de enero 2009 en PB y en la Figura 3.49 la comparación en Hidrovía para enero 2006. Los resultados muestran diferencias en el oleaje obtenido con el modelo en la altura de ola en períodos de calma y en períodos de tormenta. En general las alturas de ola son mayores con COLLINS, lo que indica globalmente menos fricción.

Altura Significativa Oleaje		MESES DEL AÑO 2006		MESES DEL AÑO 2009	
		Ene	Feb	Ene	Feb
Fricción Jonswap	RMSE (m)	0.21	0.27	0.20	0.15
	Correlación	0.73	0.90	0.88	0.88
Fricción Collins fcd	RMSE (m)	---	---	0.39	---
	Correlación	---	---	0.84	---
Fricción Collins fc1	RMSE (m)	0.24	---	0.29	---
	Correlación	0.69	---	0.87	---
Fricción Collins fc2	RMSE (m)	0.20	0.29	0.21	0.19
	Correlación	0.73	0.91	0.89	0.89

Tabla 3.17: Valores de error y correlación obtenidos para la altura significativa de ola obtenida con el modelo con diversas parametrizaciones de la rugosidad de fondo utilizando los vientos CEP y los datos medidos en PB e Hidrovía.

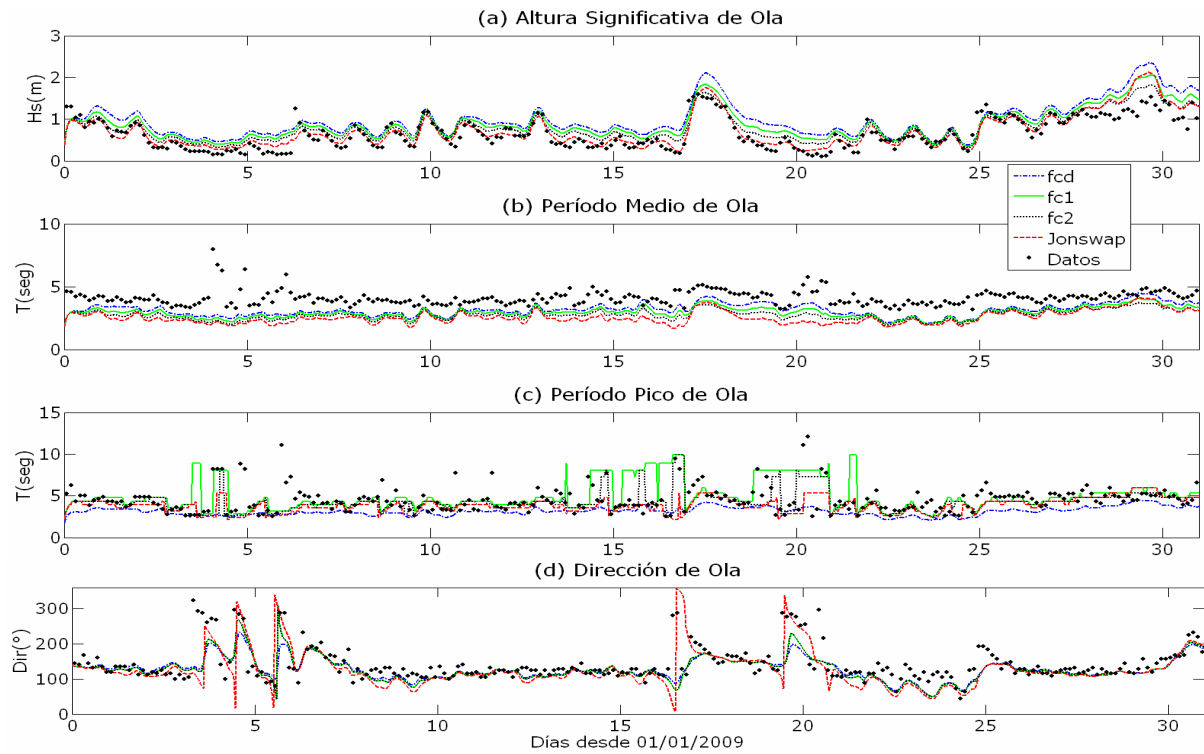


Figura 3.48: Comparación de la variación temporal de los parámetros de oleaje obtenido con el modelo SWAN con vientos CEP con diversas parametrizaciones de rugosidad de fondo y valores medidos en PB en Montevideo durante enero de 2009.

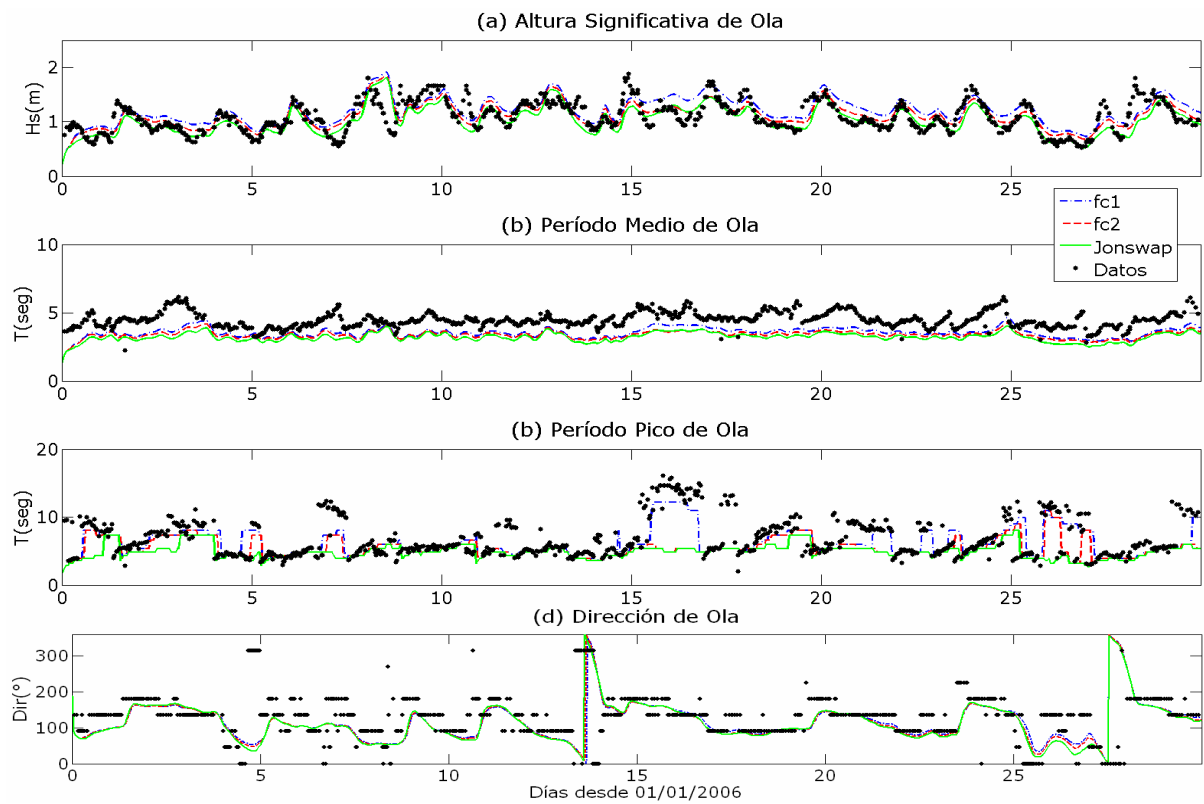


Figura 3.49: Comparación de la variación temporal de los parámetros de oleaje obtenido con el modelo SWAN con vientos CEP con diversas parametrizaciones de rugosidad de fondo y valores medidos en Hidrovía durante enero de 2006.

A pesar de las leves diferencias obtenidas en los errores, los resultados presentados muestran que ambas configuraciones, la fc2 con parametrización tipo Collins y la que utiliza la formulación de Jonswap, reproducen correctamente el oleaje en Montevideo e Hidrovía. Con el objetivo de analizar el efecto de la formulación de fricción de fondo sobre todo el dominio de cálculo se presenta en la Figura 3.50 el campo promedio temporal durante el mes de enero 2009 de la diferencia de altura de ola obtenida con la configuración fc2 y la configuración Jonswap. Se observa que a pesar de ser similares los resultados obtenidos en PB y en Hidrovía, hay diferencias (en promedio) de hasta 0,1 m en la zona Sur del Río de la Plata sobre la Bahía de Samborombón y el Canal Marítimo. Sobre la zona central se observa una distribución homogénea de las diferencias de altura de oleaje, con valores menores a 0,06 m. Casi no se observan diferencias en promedio en la altura de ola para las zonas de plataforma, sobre el Banco Inglés y en la zona interior del Río de la Plata. En función de esto, la comparación de los resultados de ambas configuraciones del modelo con información de campo sobre el oleaje en Samborombón podría determinar qué configuración es más adecuada. Con la información disponible hasta el momento se considera que ambos modelos reproducen buenos resultados.

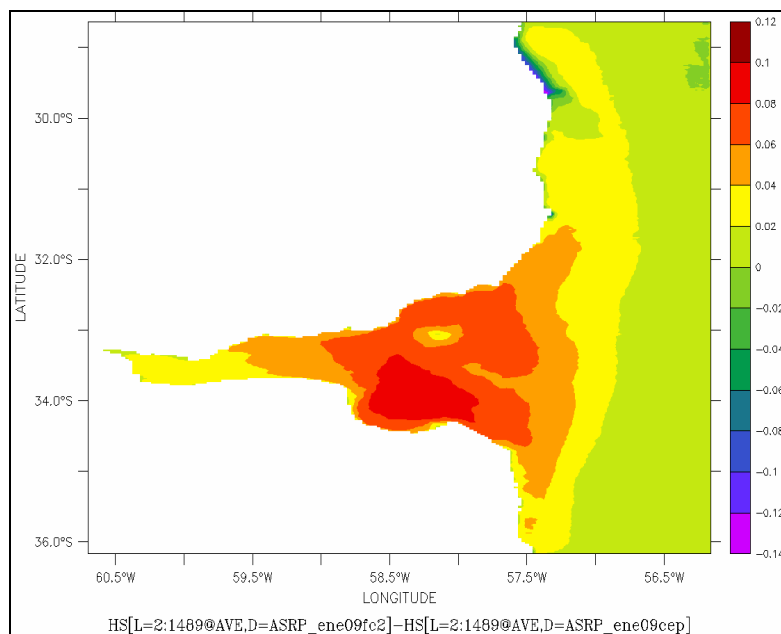


Figura 3.50: Distribución espacial del promedio temporal durante enero 2009 de la diferencia de altura significativa de ola entre la configuración fc2 y la configuración de JONSWAP (m).

3.3.3.3. Síntesis

El modelo SWAN con la implementación realizada utilizando información de vientos NCEP reproduce buenos resultados si se aplica un factor que incrementa la intensidad de viento en 1,3. De esta manera el modelo genera el oleaje registrado en la zona (control en Montevideo y en Hidrovía). No obstante la calidad obtenida en el modelo local es similar e incluso a veces inferior que la obtenida con el modelo global WW3. Estos resultados muestran que la base de vientos utilizada (NCEP) para la grilla definida no permite generar con el modelo local mejores resultados que el modelo global. Con el objetivo de ajustar el modelo local mejorando la calidad del modelo global en la zona se realizó la implementación del modelo SWAN con vientos de mejor calidad obtenidos de los Re-análisis recientes denominados NCEP-CSFR. Con estos vientos nuevamente es necesario aplicar un factor de amplificación para obtener buenos resultados en la zona de Montevideo. Se evaluaron los factores 1,2 y 1,3 en diversas

situaciones diferentes y el mejor ajuste se obtiene con el valor 1,2 pues con el factor mayor en la zona de Hidrovía los oleajes máximos obtenidos con el modelo superan ampliamente los valores medidos. Sin embargo, a pesar de que los controles con medidas son satisfactorias, las mismas son puntuales y quizás el factor de amplificación pueda generar excesivos valores de la altura de ola en zonas donde no hay datos disponibles para chequear. Por último utilizando los vientos CEP para forzar el modelo se obtiene una buena representación de las medidas de oleaje en Montevideo sin necesidad de un factor de amplificación. Esto muestra una gran diferencia entre esta base de datos y la información del NCEP. Al chequear los resultados obtenidos en Hidrovía se obtiene que tampoco es necesario amplificar los vientos.

A pesar de las diversas calibraciones realizadas se concluye que en la medida de lo posible es preferible utilizar la información de vientos CEP para forzar el modelo SWAN con las dimensiones espaciales definidas respecto a los vientos NCEP o NCEP-CSFR. En particular para este trabajo en todos los análisis y simulaciones posteriores vinculados con el modelo de oleaje se utilizará la configuración correspondiente a forzar el modelo SWAN con la base de datos de vientos CEP y parametrización de fricción de fondo JONSWAP. Los errores del modelo con dicha configuración obtenidos para la altura de ola varían entre 0,14 m y 0,2 m en función del mes comparado en la zona de Montevideo y entre 0,16 m y 0,3 m en la zona exterior de Hidrovía. En el Anexo B.2 se presentan las comparaciones del oleaje obtenido con el modelo SWAN ajustado con vientos CEP, con algunas de las medidas disponibles en PB para el año 2009 y en Hidrovía para el año 2006.

Es importante mencionar que una debilidad del ajuste realizado es que no se cuenta con información de oleaje medido en la zona interior o intermedia del Río de la Plata para validar los resultados del modelo en las mismas. Considerando las diferentes características de dicha zona respecto a la zona exterior, podría haber otros elementos de ajuste que no han sido identificados y que solamente podrían identificarse al comparar los resultados del modelo con alguna medición en dicha zona.

3.3.4. Análisis de la dinámica del oleaje

A partir de los resultados obtenidos con las simulaciones del modelo SWAN es posible conocer las características generales de la distribución espacial del oleaje en la zona que son relevantes para entender la dinámica de sedimentos finos. El modelo de oleaje desarrollado se utiliza para realizar una caracterización básica del proceso de oleaje en la zona del Río de la Plata a partir de la simulación de la dinámica durante casi dos años (2009 y 2010). En realidad debido a que no se pudo acceder al campo de Re-análisis tipo CEP durante el período setiembre 2010 a diciembre 2010 inclusive, durante dicho período de tiempo se trabajó con vientos NCEP para forzar el modelo de oleaje. Se cuenta entonces con 20 meses (enero 2009 a agosto 2010 inclusive) de información del oleaje en la zona de estudio.

En primer lugar se presenta en la Figura 3.51 la evolución temporal de la altura de ola determinada por el modelo en la Boya Oceanográfica durante los años 2009 y 2010. Se observa que mensualmente ocurren en la zona varias tormentas de intensidad y duración variable. Los máximos eventos son los que superan los 1,5 m de altura. Las tormentas que superan los 2 m se observa son excepcionales. En particular en esta ubicación la distribución de frecuencias de altura de ola calculada por el modelo durante 20 meses (Figura 3.52) indica que no se supera el valor de 1 m de Hs el 78% del tiempo. Valores extremos mayores a 1,8 m ocurren casi un 2 % del tiempo. El evento máximo durante este período corresponde a una altura de ola igual a 2,4 m calculados por el modelo en la estación #22 durante un evento de tormenta ocurrido en agosto 2010.

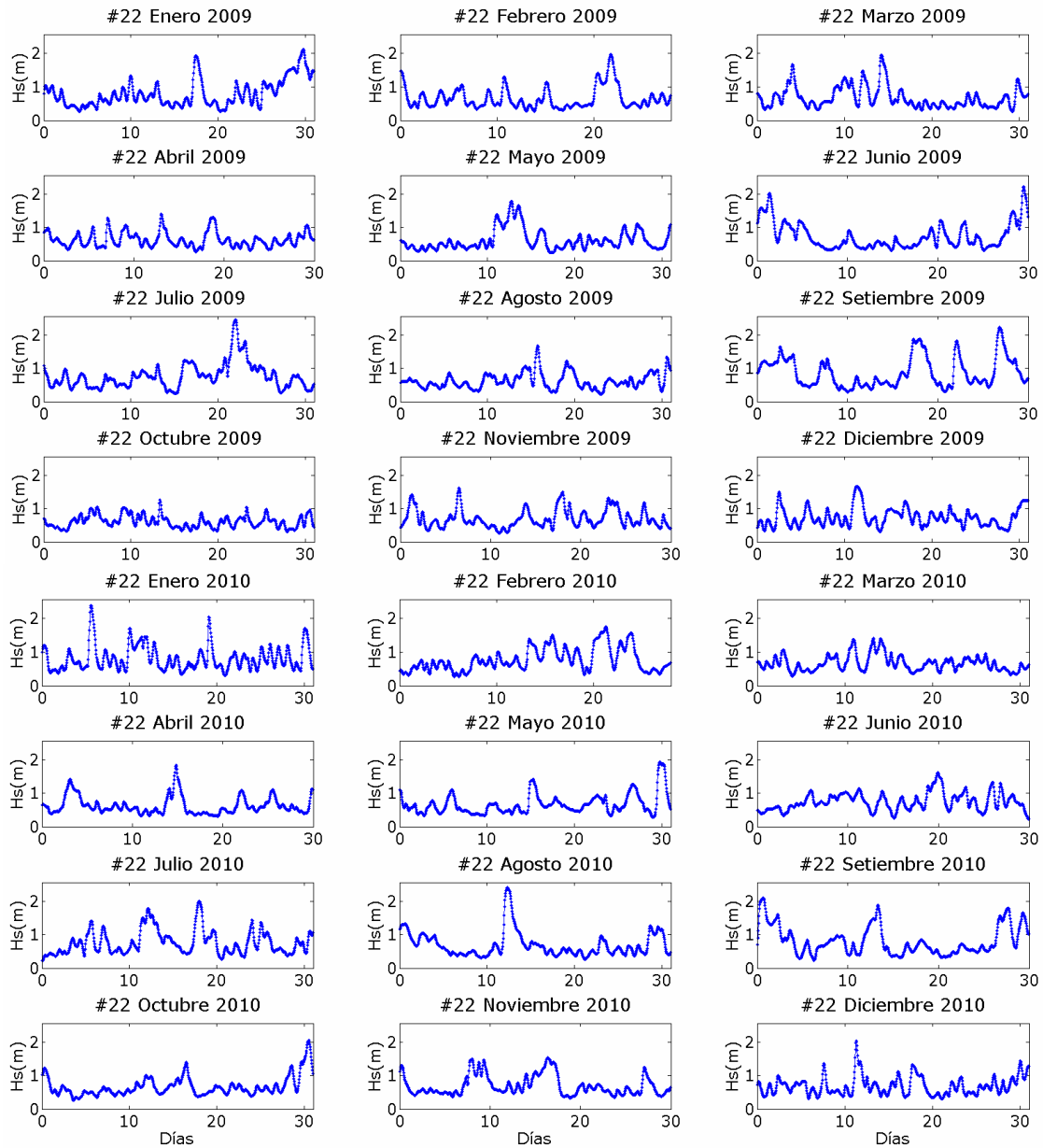


Figura 3.51: Evolución temporal de la altura de ola significativa obtenida con el modelo SWAN en la estación #22 (Boya) durante los años 2009 y 2010.

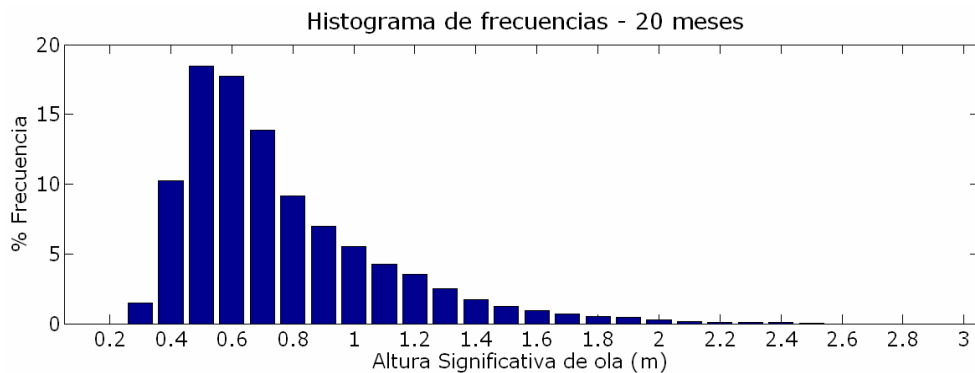


Figura 3.52: Histograma de frecuencias de altura significativa de ola del período enero 2009 a agosto 2010 en la estación #22.

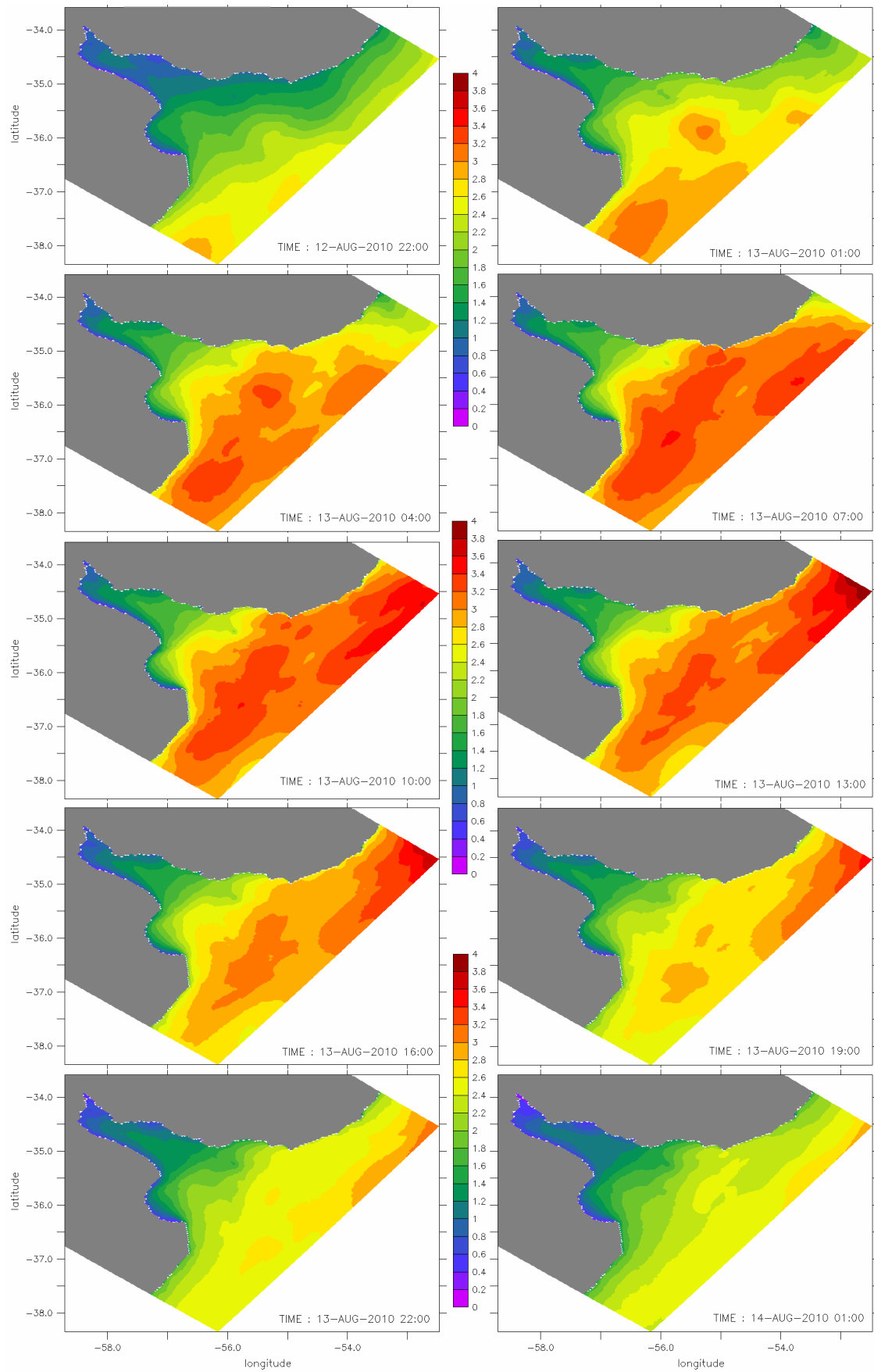


Figura 3.53: Distribución espacial de la altura significativa de ola (H_s) calculada por el modelo SWAN durante una tormenta severa; desde el 12/8/2010 22:00hs hasta el 14/8/2010 01:00 h con frecuencia trihoraria.

El evento de oleaje extremo de agosto 2010 fue seleccionado para analizar la evolución temporal de la distribución espacial del oleaje en el Río de la Plata. En la Figura 3.53 se presenta la evolución temporal de la distribución de la altura de ola cada tres horas calculada por el SWAN en el Río de la Plata durante la tormenta comprendida entre el 12/8/2010 a las 22:00 hs y el 14/8/2010 a las 13:00 hs. Se observa en las primeras imágenes el aumento del oleaje en la zona del Frente Marítimo sobre la frontera Sur y posteriormente oleajes máximos en la zona de plataforma durante la mayor intensidad de la tormenta. Durante dichos instantes en el límite exterior del Río de la Plata se superan los 3 m de altura significativa de ola. En consecuencia el oleaje se incrementa sobre el Río de la Plata generando los valores extremos identificados en las series temporales. Se observa también en situaciones extremas las líneas de isoaltura de ola son similares a las líneas batimétricas lo que muestra que la profundidad es limitante en el desarrollo del oleaje, comportamiento característico de una zona poco profunda.

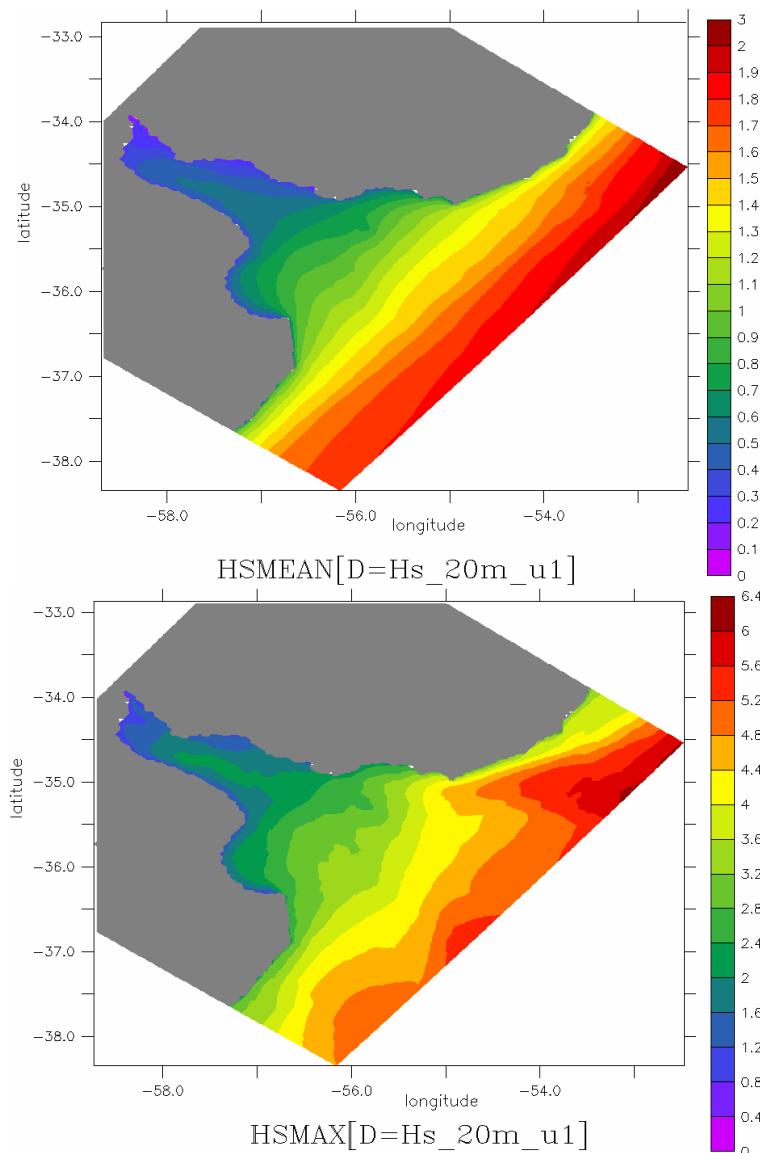


Figura 3.54: Distribución espacial de la altura significativa de ola (m) promedio (panel superior) y máxima (panel inferior), durante el período de tiempo enero 2009 a agosto 2010 (20 meses).

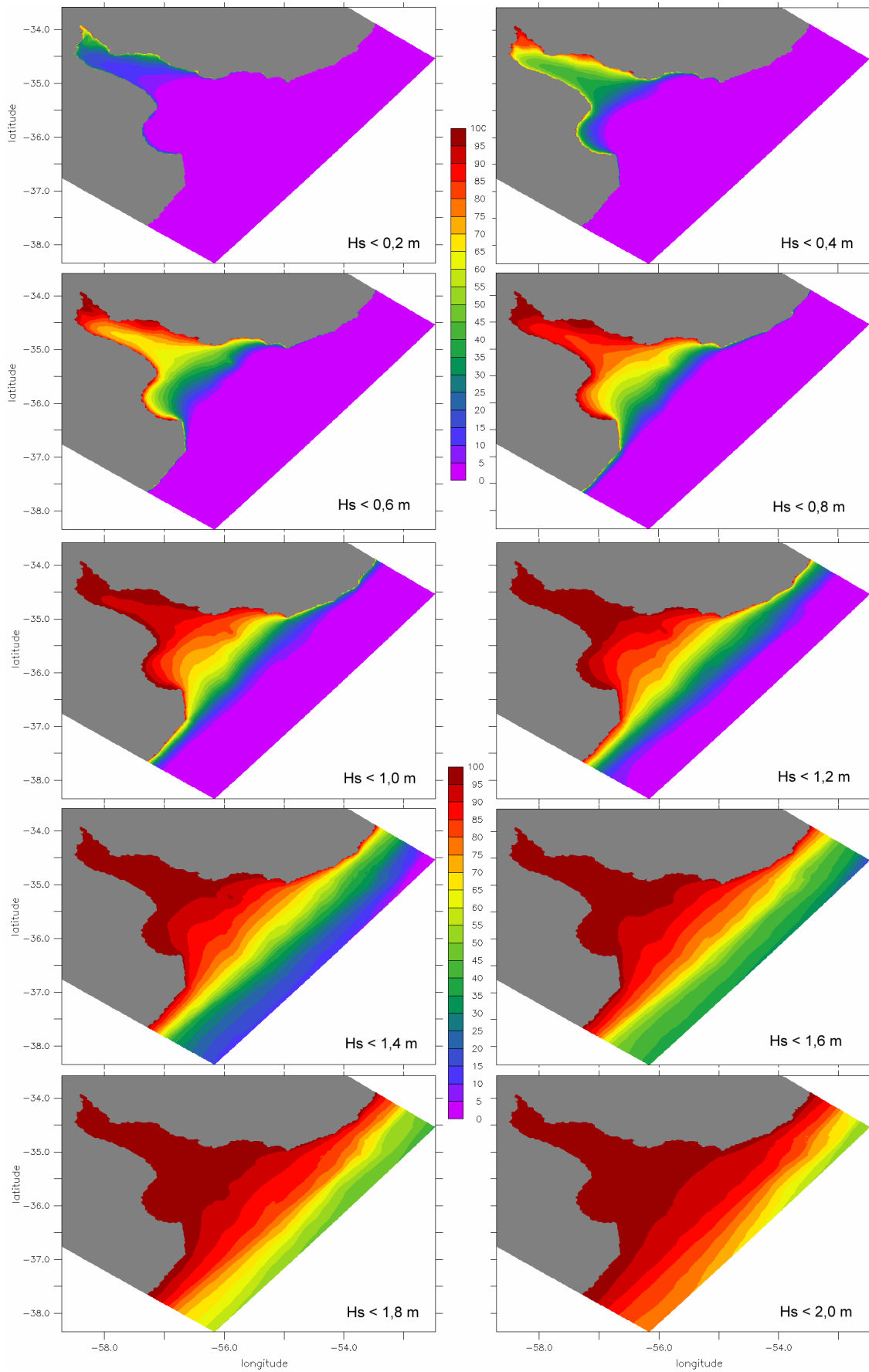


Figura 3.55: Distribución espacial del porcentaje de frecuencia de ocurrencia asociado a umbrales de altura significativa de ola en todo el Río de la Plata.

Se calcularon las distribuciones espaciales de los estadísticos básicos de altura de ola utilizando los 20 meses de tiempo simulados, con el objetivo de caracterizar el proceso. Por un lado se determinó la distribución espacial de la altura significativa promedio y máxima del oleaje en el Río de la Plata (Figura 3.54) El campo del oleaje medio muestra valores menores a 0,6 m en la zona interior e intermedia del Río de la Plata con mayores valores en la zona central sobre la costa argentina. En la zona exterior del Río de la Plata el oleaje medio está comprendido entre 0,6 m y 1,2 m en la zona exterior. El oleaje máximo muestra mayores valores sobre la costa uruguaya en la zona exterior respecto a los valores en la Bahía de Samborombón, respondiendo claramente a las diferencias en la batimetría. En la zona intermedia se observa la altura de ola máxima calculada por el modelo supera los 2 m.

Por otro lado se calcularon las curvas de distribución espacial de frecuencia de ocurrencia de altura de ola menor a ciertos umbrales de altura de ola significativa, establecidos entre 0,2 m y 2 m, las cuales se presentan en la Figura 3.55. Se observa que la distribución obtenida para el rango más bajo considerado, $H_s=0,2$ m, muestra que en la zona exterior del Río de la Plata y en el Frente Marítimo prácticamente siempre se excede dicho valor, mientras que en la zona intermedia las alturas de ola son menores a dicho valor aproximadamente un 20% del tiempo. El rango de 0,6 m establece porcentajes mayores a 60% en la zona intermedia e interior del Río de la Plata mientras que el rango siguiente 0,8 m establece valores de 80%, y además se observa el 90% del tiempo las alturas de ola en la zona interior e intermedia del Río de la Plata son menores a 1,0 m. Valores mayores de altura de ola ocurren durante ciertos eventos solamente en la zona exterior del Río de la Plata. Se observa en las zonas costeras y de menor profundidad que los porcentajes de frecuencia asociados a mayores umbrales de altura de ola significativa son menores en relación a las zonas más profundas de los canales. Finalmente, las curvas obtenidas para el umbral de $H_s=2$ m muestran que el porcentaje de ocurrencia de un oleaje mayor a dicho valor en la zona exterior del río de la Plata es muy bajo.

Estos resultados presentados muestran una gran variación espacial del oleaje en la zona de estudio. La importancia de simular estos procesos con modelos que incorporen ésta variabilidad es determinante a la hora de pretender un modelo de sedimentos finos de la zona que reproduzca las principales características de dicha dinámica.

3.4. TENSIONES DE CORTE DE FONDO DE CORRIENTE Y OLAJE EN EL RÍO DE LA PLATA

3.4.1. Formulaciones aplicadas

El flujo en el Río de la Plata genera una tensión de corte sobre el fondo que influye sobre los procesos vinculados a la dinámica de sedimentos finos, resuspensión, deposición y transporte. Debido a esto, la determinación de la tensión de corte de fondo es un paso sumamente relevante en la modelación de la dinámica de sedimentos finos. En este caso, ambas componentes, las corrientes de marea y las olas, contribuyen significativamente a la tensión de corte de fondo. Como resultado la tensión total de fondo incluye una componente cuasi-permanente y una componente oscilatoria (Soulsby and Clarke, 2005). Se debe resolver entonces por un lado la tensión de corte generada por las corrientes de marea, por otro lado las tensiones de corte del flujo oscilatorio (oleaje) y por último las tensiones de corte generadas por el flujo combinado.

El estudio del flujo en la capa límite de fondo, definida como el espesor de la columna de agua en la cual el flujo dentro de la misma es influenciada por el fondo (Nielsen, 1992), depende del tipo de flujo en la misma, laminar, transicional ó

turbulento. El espesor de la capa límite es directamente proporcional a la viscosidad turbulenta y al período del flujo; por tanto la diferencia en el período de marea (por ejemplo 12 horas para la componente dominante M_2) y el período del oleaje (del orden de varios segundos) genera que la capa límite de marea sea de un espesor en general igual a la profundidad y que la capa límite oscilatoria cubra una pequeña fracción de la profundidad (Nielsen, 1992). Es habitual que las olas (y las tensiones correspondientes) dominen en la zona cercana al fondo en situaciones de flujo combinado.

La tensión total de corte de fondo a la cual está sujeta el sedimento de fondo normalmente se separa en dos sumandos, la componente skin (de grano) y la componente dada por las formas de fondo (Nielsen, 1992; Dufois, 2008). La segunda altera el patrón del fondo y por tanto modifica la fricción de grano. En este caso se desprecia la componente de fricción dada por las formas de fondo pues se supone un fondo plano, lo cual es razonable al tratarse de un fondo barroso. Por tanto la tensión total que interesa determinar es igual en este caso a la denominada ‘skin friction’ en inglés.

En este trabajo se estiman las tensiones de corte en cada celda del modelo a partir de las corrientes calculadas por el modelo MARS y a partir de los parámetros del oleaje calculados por el modelo SWAN, ambos modelos configurados para la misma grilla de cálculo. Metodologías similares para la determinación de las tensiones de corte de fondo han sido aplicadas en otros estudios (Tessier, 2006; Dufois, 2008)

3.4.1.1. Tensión de corte de flujo cuasi-permanente (corrientes)

La corriente de marea genera fricción de fondo dentro de la denominada capa límite turbulenta (Whitehouse et al., 2000). Se asume que dentro de la capa límite la corriente aumenta con la altura desde un valor nulo en el fondo a un valor máximo cercano a la superficie de agua. Experimentalmente se ha verificado que el perfil vertical de flujo en la capa límite turbulenta varía con z según un perfil logarítmico (Nielsen, 1992). La tensión de corte de fondo generada por el flujo puede calcularse según:

$$\tau_c = \rho_0 (u_*)^2 \quad (3.60)$$

siendo u_* la velocidad de fricción determinada para el perfil vertical de velocidad ($u(z)$ velocidad de corriente a la altura z del fondo) y función de la altura de rugosidad z_{0sed} (cota a la cual la velocidad es nula):

$$u_* = \frac{\kappa u(z)}{\log(z/z_{0sed})} \quad (3.61)$$

En la bibliografía existen una gran variedad de estudios donde se utiliza la formulación presentada para determinar las tensiones de corte generadas por las corrientes en sistemas estuarinos o costeros (Lumborg, 2005; Tessier, 2006; Dufois, 2008). No obstante el parámetro z_{0sed} , que se vincula con la composición del sedimento de fondo, es una de los parámetros más difíciles de determinar y en cada caso deben tomarse consideraciones específicas. Habitualmente en el caso de fondo uniformemente rugoso se expresa como una función del coeficiente de Nikuradse k_s denominado rugosidad equivalente de la forma $z_{0sed} = k_s / 30$. El coeficiente k_s se aproxima según el diámetro medio de grano (D_{50}) mediante la relación $k_s = 2,5D_{50}$. En el caso de fondos de barros ésta formulación genera valores muy bajos de rugosidad de fondo que pueden no ser representativos de la rugosidad y por tanto se definen valores más representativos, en general entre 0,1 y 1 mm (Soulsby, 1997).

Como se mencionó en la primera parte de este capítulo la implementación del modelo MARS en el rank1 es tridimensional con una discretización vertical de 10 capas sigma. Para realizar el cálculo de la tensión de corte de fondo de las corrientes se considera la velocidad $u(z)$ calculada por el modelo hidrodinámico en la primera capa definida en la vertical. Por otro lado, para la determinación del parámetro z_{0sed} se realiza un análisis en función de la composición del sedimento de fondo del Río de la Plata y de recomendaciones de bibliografía según se presenta más adelante en esta sección.

3.4.1.2. Tensión de corte de flujo oscilatorio (oleaje)

Según Nielsen (1992) la capa límite de la ola se define como la capa cerca del fondo donde el movimiento de agua inducido por la ola es afectado por el fondo. Esta capa en general es muy fina, de pocos milímetros en fondo liso y de varios centímetros en fondo plano con arena suelta. También las formas de fondo pueden modificar la estructura de la capa límite generando una extensión de la misma en 5 veces la dimensión de la forma de fondo, alcanzando algunas decenas de centímetros. En la teoría se simplifica el movimiento oscilatorio a un armónico simple según $u_{\infty} = Aw \cos(\omega t)$, siendo $u_{\infty}(t)$ la velocidad inducida por el oleaje por encima de la capa límite de fondo, A la trayectoria orbital de una partícula de agua y ω la frecuencia del oleaje.

La tensión de corte de fondo máxima generada por flujo oscilatorio se calcula según la formulación de Jonsson:

$$\tau_w = \frac{1}{2} f_w \rho_0 (Aw)^2 \quad (3.62)$$

siendo f_w el factor de fricción de oleaje que depende del número de Reynolds oscilatorio $Re_w = A^2 \omega / \nu$ (ν viscosidad cinemática laminar), y de la rugosidad de fondo relativa k_s / A (o excursión relativa de partículas):

$$f_w = f_w \left(\frac{A^2 \omega}{\nu}, \frac{k_s}{A} \right) \quad (3.63)$$

Diagramas para f_w se presentan en diversas publicaciones desarrollados a partir de mediciones de laboratorio principalmente (Nielsen, 1992). En casos extremos se define el régimen turbulento rugoso plenamente desarrollado cuando $Re_w \rightarrow \infty$ y k_s / A es finito, y condiciones de fondo liso cuando $k_s / A \rightarrow 0$. En el primer caso $f_w = f_w \left(\frac{k_s}{A} \right)$ y en

el segundo $f_w = f_w \left(\frac{A^2 \omega}{\nu} \right)$.

Para el caso de fondo liso, para $Re_w < 1 \cdot 10^4$ el régimen es laminar y el factor de fricción se describe según la ecuación 3.64; no obstante, se considera válida la misma aproximación para el régimen de transición hasta valores de $Re_w < 3 \cdot 10^5$. Para el rango $3 \cdot 10^5 < Re_w < 6 \cdot 10^5$ se observa una transición donde f_w crece con Re_w ; y luego para valores mayores de Re_w , correspondientes a régimen turbulento liso plenamente desarrollado, el factor de fricción decrece pero a una tasa menor que la que se observa para el régimen laminar. Para este último caso, Justesen (en Nielsen, 1992) propone la formulación 3.65 ($10^6 < Re_w < 10^8$) y Soulsby et al. (1993) la formulación 3.66.

$$f_w = \frac{2}{\sqrt{A^2 w / \nu}} = \frac{2}{\sqrt{\text{Re}_w}} \quad (3.64)$$

$$f_w = 0,024(A^2 w / \nu)^{-0,123} \quad (3.65)$$

$$f_w = 0,0521(A^2 w / \nu)^{-0,187} \quad (3.66)$$

Para el caso de régimen turbulento rugoso plenamente desarrollado, varias formulaciones se han propuesto, como por ejemplo las siguientes:

$$\text{Soulsby:} \quad f_w = 1,39(A / z_{0sed})^{-0,52} \quad (3.67)$$

$$\text{Swart (en Nielsen, 1992):} \quad f_w = \exp[5,233(z_{0sed} / A)^{0,194} - 5,977] \quad (3.68)$$

Por otro lado durante condiciones de transición se han desarrollado formulaciones complejas del factor de fricción dependientes de las condiciones de flujo y de la rugosidad presentadas en Nielsen (1992); Tessier (2006); Dufois (2008).

La determinación del factor de fricción de ola es un tema de investigación actual para la cual se han desarrollado diversas formulaciones empíricas y por tanto no hay aún una fórmula consensuada. Según Nielsen (2009) para la mayoría de las aplicaciones de campo es posible suponer que el flujo es turbulento rugoso plenamente desarrollado (suponiendo presencia de rizos) y por tanto el factor de fricción se considera función solamente de la rugosidad relativa. Nielsen (1992) menciona a la formulación de Swart, presentada en 3.68, como la más utilizada. Por otro lado en el trabajo realizado por Tessier (2006) utilizando el modelo MARS se utiliza la formulación de Soulsby presentada en la ecuación 3.67. En cambio en el trabajo realizado por Dufois (2008), también utilizando el modelo MARS, se utiliza la formulación de Swart para el cálculo de la tensión por oleaje en el caso sin rizos de fondo. Esta formulación de Swart también se utiliza en el trabajo de modelación numérica de sedimento cohesivo en una región costera del mar del Norte que se realizó con el modelo MIKE 21 (Lumborg and Windelin, 2003).

3.4.1.3. Tensión de corte de flujo combinado

Diversos estudios se vienen realizando, principalmente en condiciones de laboratorio, con el objetivo de determinar las características de la interacción de las capas límites de marea (flujo permanente) y flujo oscilatorio. Nielsen (1992) menciona que se ha observado que la estructura del flujo oscilatorio no presenta grandes variaciones al agregar un flujo permanente en relación a la situación sin flujo. Debido a esto habitualmente se desprecian las corrientes durante los cálculos de las tensiones de corte generadas por el flujo oscilatorio que ocurre durante los eventos de tormenta. En cambio, se ha observado que las características del perfil de corrientes presentan variaciones en el caso de flujo combinado con relación a la situación sin superposición de flujo oscilatorio, principalmente en la zona cercana al fondo donde hay una gran influencia del oleaje. Se considera que las variaciones en el perfil de corrientes se deben a cambios inducidos por el oleaje en la intensidad de turbulencia (Nielsen, 1992).

En este contexto la determinación de la tensión de corte de flujo combinado no está resuelta teóricamente y no es sencillo entonces incorporar este concepto en modelos de la dinámica de procesos globales como el que se quiere desarrollar en este trabajo. Otros trabajos realizados con el modelo MARS (Tessier, 2006; Dufois, 2008) utilizan la aproximación desarrollada por Soulsby para régimen turbulento (Soulsby, 1997), la cual ha sido modificada recientemente (Soulsby and Clarke, 2005) y continúa en desarrollo.

En este trabajo se toman varias hipótesis que simplifican el cálculo. Esta decisión parte de considerar que es necesario realizar una profundización de las diferentes teorías y modelos existentes para la determinación de las tensiones de corte en caso de flujo combinado antes de decidir utilizar una formulación. Debido a esto se desprecian en este trabajo las posibles interacciones no lineales e influencias entre las capas límites de ambos flujos (corrientes y oleaje) y la tensión de corte total se calcula según la suma vectorial de las tensiones de corte calculadas separadamente según la ecuación 3.69.

$$\tau_{total} = \sqrt{(\tau_c^2 + \tau_w^2)} \tag{3.69}$$

3.4.2. Metodología

Se utiliza la información de corrientes de marea (astronómica y meteorológica) del modelo hidrodinámico MARS y la información del oleaje del SWAN, para determinar las tensiones de corte τ_c y τ_w . Se requiere la determinación de la rugosidad de fondo z_{0sed} y el tipo de régimen en el caso de flujo oscilatorio para poder aplicar las formulaciones presentadas.

Por tanto en primer lugar se realizó un análisis exploratorio donde se determinó a partir del oleaje del modelo SWAN para un mes seleccionado (agosto 2010) el valor de Re_w , y consecuentemente el tipo de régimen de flujo en varios puntos de control de diversas zonas del Río de la Plata. Los puntos de control fueron definidos según las estaciones de monitoreo de las campañas de medición del Proyecto FREPLATA-FFEM cuya ubicación en la grilla de cálculo se presentó en la Figura 3.11. A partir de estos resultados se observó la necesidad de realizar algunas simulaciones con el objetivo de determinar la sensibilidad de las tensiones de corte calculadas a las formulaciones de cálculo del factor de fricción de ola y a la rugosidad de fondo.

En la Tabla 3.18 se presentan las características de las simulaciones realizadas durante el análisis de sensibilidad de las tensiones de corte de fondo a los diversos parámetros y formulaciones utilizadas. En relación al parámetro de rugosidad hidráulica de fondo se trabaja con 3 configuraciones de valores uniformes en todo el dominio de cálculo. En la simulación inicial 1 se utiliza un valor alto de rugosidad como punto de partida correspondiente a un fondo de composición gruesa. En los restantes casos se utilizan valores de z_{0sed} iguales a 0,033 mm y 0,1 mm, que se corresponden con los umbrales recomendados para fondo barroso (Soulsby, 1997) y surgen de otros estudios similares realizados con el modelo MARS (Tessier, 2006; Dufois, 2008).

Simulación	Período de tiempo	PARAMETROS		OBSERVACIONES	
		z_{0sed}	Formulación fw	Período de ola en el cálculo de A	Vientos modelo Hidrodinámico MARS
1 LabWaves_referencia	2009 completo	3,5 mm	Turbulento Rugoso - Soulsby	Tp	NCEP
2 LabWaves_sensC1	Enero 2009	0,033 mm	Turbulento Rugoso - Soulsby	Tp	NCEP
3 LabWaves_sensC2	Enero 2009	0,1 mm	Turbulento Rugoso - Soulsby	Tp	NCEP
4 Wsnew7lam	Agosto 2010	0,1 mm	Laminar ($v = 1 \times 10^{-06} \text{ m}^2/\text{s}$)	Tp	NCEP
5 Wsnew7lm01	Agosto 2010	0,1 mm	Turbulento Rugoso - Soulsby	Tm01	NCEP
6 Wsnew7st	Agosto 2010	0,1 mm	Turbulento Rugoso - Stwart	Tp	NCEP
7 Wsfe04sGd	Agosto 2010	0,1 mm	Turbulento Rugoso - Soulsby	Tp	CEP

Tabla 3.18: Características de las simulaciones realizadas durante el análisis de las tensiones de corte de fondo.

Respecto a las formulaciones utilizadas para el factor de fricción de ola se evaluaron los resultados utilizando la correspondiente a flujo laminar dentro de la capa límite oscilatoria y dos correspondientes a flujo turbulento rugoso plenamente

desarrollado, la formulación de Soulsby y la formación de Swart, presentadas en las ecuaciones 3.67 y 3.68, respectivamente. En función de resultados obtenidos en el trabajo de Tessier (2006) donde se discuten las diferencias obtenidas en la fricción de fondo según se utilice el período pico o el período medio del oleaje en el cálculo de la trayectoria orbital del flujo oscilatorio, se evalúa el efecto de ambos períodos en los resultados al utilizar la formulación de Soulsby. Las diversas formulaciones fueron introducidas a nivel de código en el modelo MARS. La última columna de la Tabla 3.18 se refiere a los vientos utilizados en el modelo hidrodinámico de corriente de marea; la mayoría de los análisis se realizaron con los vientos de baja resolución NCEP pero en la configuración definitiva (simulación 7) se utilizan los vientos CEP de mayor resolución. Para el cálculo del oleaje en todas las simulaciones se utiliza el forzante de viento CEP.

3.4.3. Resultados obtenidos

3.4.3.1. Análisis exploratorio del tipo de régimen

Con el objetivo de determinar el tipo de régimen del flujo oscilatorio en la zona de estudio durante situaciones de calma y tormenta se calculó el número de Reynolds oscilatorio y la rugosidad relativa durante el mes de agosto de 2010 en las estaciones de monitoreo. Se seleccionó dicho mes por el gran evento de tormenta ocurrido, el cual fue analizado en la sección 3.3.4. En la Figura 3.56 (panel superior) se presentan los valores del número de Reynolds oscilatorio obtenidos a partir de los valores de período pico y velocidad orbital de fondo calculados con SWAN, y un valor de viscosidad cinemática igual a $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Por otra parte, en el panel inferior se presenta la rugosidad relativa (A/ks) utilizando el valor de referencia $z_{0\text{sed}}=0,1 \text{ mm}$.

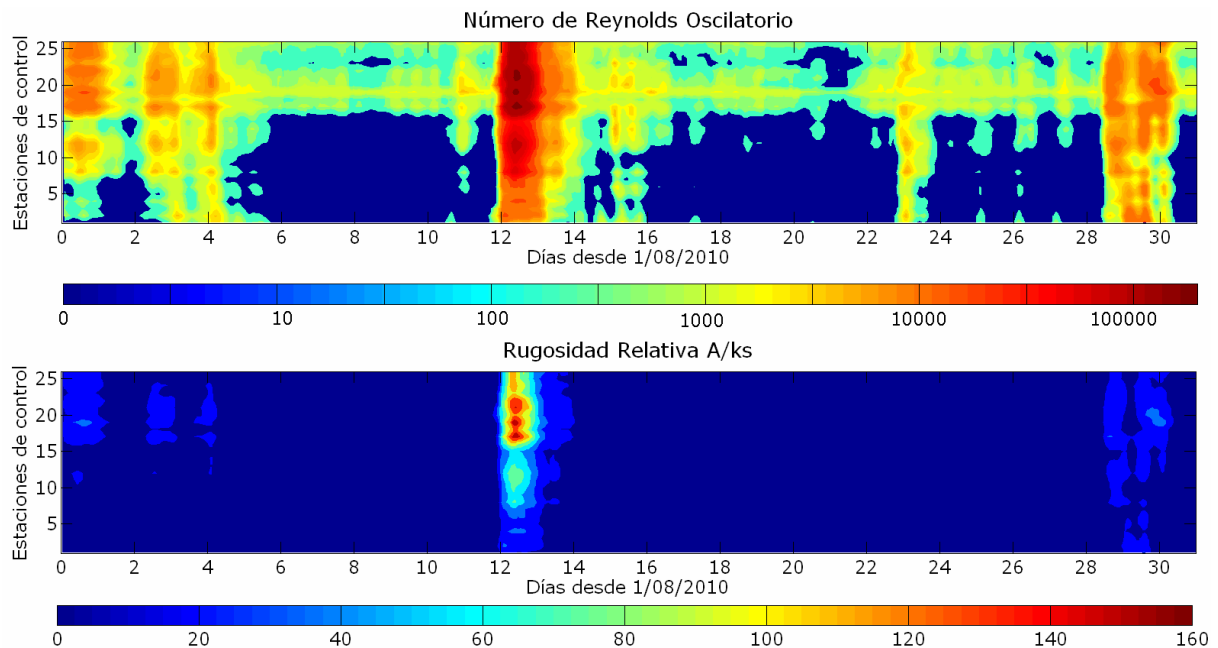


Figura 3.56: Valores de Re_w (panel superior) y rugosidad relativa A/ks (panel inferior) del flujo oscilatorio obtenidos en las estaciones de control #1 a #26 para el mes de agosto 2010.

Los resultados muestran que en períodos de calma o durante períodos de tormentas muy leves, los valores de Re_w son bajos menores a 1000 en la zona interior-intermedia (estaciones #1 a #15bis) y un poco mayores en la zona exterior, lo que coincide en general con un régimen laminar. Para tormentas mayores se observan Re_w que superan el umbral de 1×10^4 con valores de rugosidad relativa finitos, que corresponden a

un régimen de transición. Durante la gran tormenta ocurrida a partir del día 12 del mes se alcanzan n° Reynolds altos mayores a $1,5 \times 10^5$ y rugosidad relativa del entorno de 170 lo que indica un régimen turbulento rugoso plenamente desarrollado.

3.4.3.2. Tensiones de corte en función de la rugosidad de fondo

A modo de ejemplo en la Figura 3.57 se presenta la comparación de la variación temporal de las tensiones de corte calculadas en la estación #22 en las simulaciones 1, 2 y 3 en las cuales se utilizan diferentes valores de la rugosidad hidráulica de fondo z_{0sed} . Se observa en términos generales los resultados son muy sensibles a las variaciones del coeficiente. Las tensiones obtenidas utilizando una rugosidad grande (simulación 1) son extremadamente elevadas durante los eventos de fuerte oleaje o corrientes elevadas. La variación es considerable al disminuir la rugosidad en 35 veces (relación simulación 1 y 3). Las diferencias obtenidas entre las tensiones de las simulaciones 2 y 3 con valores de rugosidad similares (0,033 mm y 0,1 mm), son leves, principalmente en la tensión por corriente la cual en la zona presenta una magnitud menor a la tensión del oleaje.

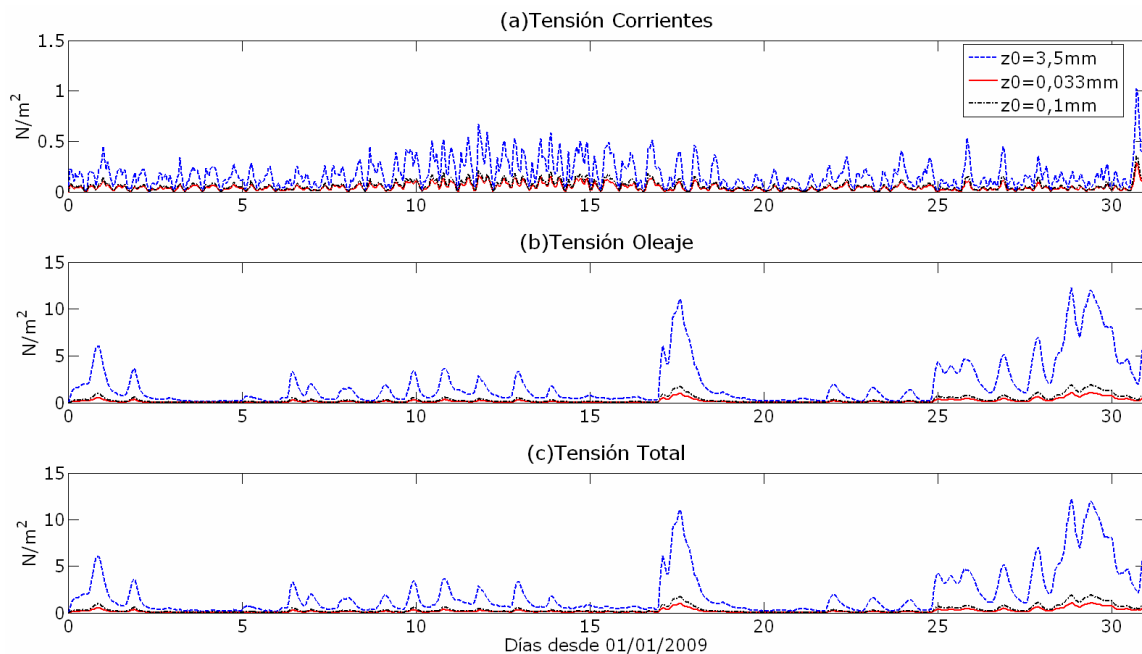


Figura 3.57: Análisis de sensibilidad de la tensión de corte de fondo (a) de las corrientes de marea, (b) del oleaje y (c) total, a la rugosidad hidráulica de fondo z_{0sed} . Estación #22 Boya Oceanográfica; enero 2009.

En la Figura 3.58 se presenta la comparación de las series temporales de tensión de corte de oleaje obtenidas en la estación #22 en las simulaciones 4, 5, 6, y 7 donde se utilizan diversas formulaciones en el cálculo de la misma. La comparación según fondo liso (formulación régimen laminar) ó rugoso, muestra que en períodos de calma los valores obtenidos son similares, mientras que en situaciones de tormenta son considerablemente diferentes siendo, como es de esperar, mayores las tensiones obtenidas suponiendo un régimen turbulento. La comparación entre la tensión de corte de oleaje obtenida utilizando la formulación de Soulsby o la formulación de Swart para la determinación del factor de fricción f_w muestra poca sensibilidad de la tensión a las mismas con valores idénticos en períodos de calma y tormentas leves, y con pequeñas diferencias en las tensiones de corte máximas durante los grandes eventos. Por último, se observa que al utilizar el período medio de ola ($Tm01$) se obtienen tensiones un poco

mayores a las obtenidas utilizando el período pico de ola (T_p) con mayores diferencias entre ambas series durante los eventos de tormenta.

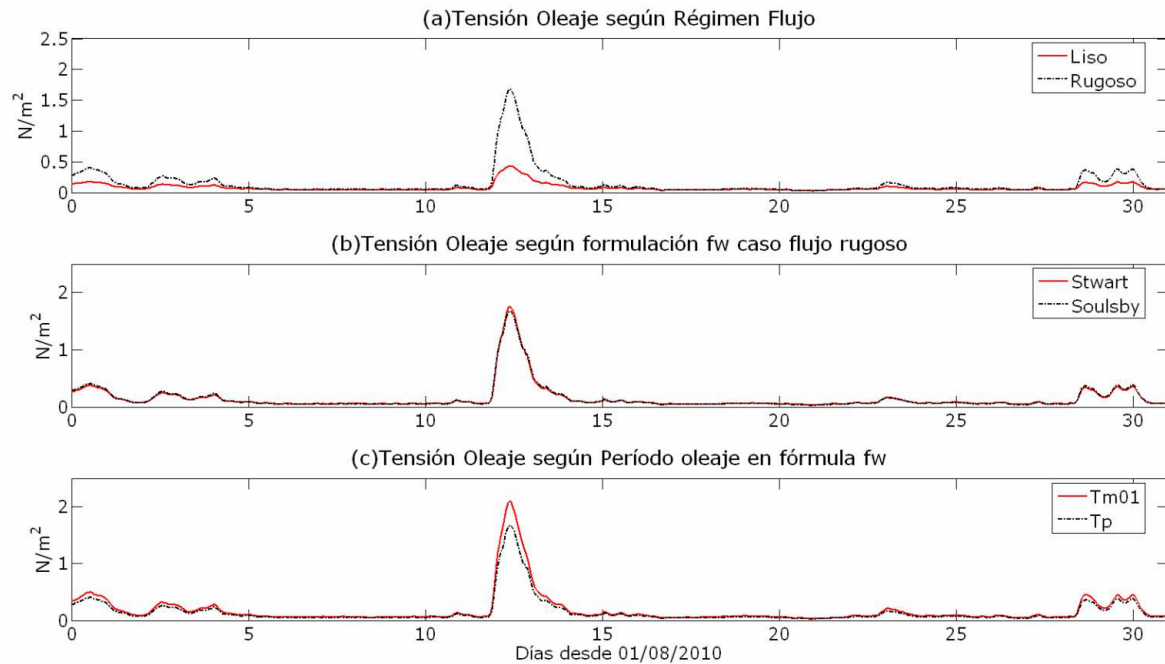


Figura 3.58: Análisis de sensibilidad de la tensión de corte de fondo del oleaje al (a) régimen de flujo, (b) formulación del factor de fricción, y (c) período de ola utilizado en la formulación del factor de fricción. Estación #22 Boya Oceanográfica; agosto 2010.

3.4.4. Síntesis y discusión

Analizando los diversos resultados obtenidos durante la determinación de las tensiones de corte de fondo se seleccionó la manera considerada más apropiada (y simple) para su cálculo a partir de los modelos implementados para este trabajo. Se selecciona la parametrización representada por la simulación 7 (Tabla 3.18) para utilizar de aquí en adelante para el cálculo de las tensiones de corte de fondo, donde se utiliza el parámetro $z_{0sed}=0,1$ mm. Este valor ha sido utilizado en estudios similares (Tessier, 2006; Dufois, 2008).

Utilizando dicho valor de rugosidad, se observó que en la zona analizada el flujo oscilatorio en situaciones de calma puede considerarse en régimen laminar y en eventos de tormenta turbulento rugoso, con una situación de transición en períodos de tormentas leves. No obstante en períodos de calma la aproximación de flujo turbulento rugoso utilizada representa las mismas tensiones que el caso laminar. Con el objetivo de simplificar el proceso de cálculo se aplica la formulación de flujo turbulento rugoso para la determinación de la tensión de corte de fondo de flujo oscilatorio en cualquier condición. Se considera preferible sobrestimar las tensiones de corte de fondo en algunos casos que aplicar formulaciones de flujo transicional complejas que dependen de parámetros aproximados. Por otra parte, se decide utilizar como válida la formulación de Soulsby para el factor de fricción de flujo oscilatorio utilizando el período medio del oleaje en el cálculo de la trayectoria orbital. En esta consideración se tuvo en cuenta la similitud con los resultados obtenidos con la formulación de Stwart por un lado y por otro los resultados obtenidos en el análisis realizado por Tessier (2006). En dicho estudio la autora utilizó medidas de oleaje de un ADCP para comparar con valores obtenidos con el modelo utilizando el período medio y el período pico del oleaje determinado por SWAN,

utilizando la formulación de Soulsby, y concluye que con el primero (período medio) obtiene mejores resultados.

3.5. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LAS TENSIONES DE CORTE DE FONDO EN EL RÍO DE LA PLATA

A partir de las simulaciones de los años 2009 y 2010 de las corrientes de marea con el modelo MARS (sección 3.2) y del oleaje con el modelo SWAN (sección 3.3) es posible determinar las tensiones de corte de fondo con las formulaciones apropiadas ingresadas al MARS (sección 3.4) y por tanto obtener las características principales de las mismas. Las tensiones de corte de fondo calculadas se analizan considerando la variabilidad temporal y espacial en el Río de la Plata. Además, se calculan los mapas espaciales de los principales estadísticos. Para los estadísticos calculados se utiliza la información obtenida con el modelo durante los 20 meses comprendidos entre enero 2009 y agosto 2010 para los cuales se utilizó la misma fuente de información atmosférica, los vientos CEP, para forzar los modelos MARS y SWAN.

El objetivo de esta sección es presentar por un lado las características principales de la variabilidad temporal observada en las tensiones de corte de corriente y de oleaje, y la de la tensión total producto de ambas dos. Por otro lado, se presentan también las principales características de la variabilidad espacial de las componentes de la tensión de corte de fondo en el Río de la Plata y cómo varía el predominio de una u otra componente (corriente u oleaje) y por tanto su influencia en la tensión de corte total.

3.5.1. Variación temporal

Las tensiones de corte de fondo generadas por las corrientes y por el oleaje calculadas por el modelo presentan una gran variabilidad temporal y espacial en respuesta a la variabilidad propia de cada uno de los forzantes. Además, las diferencias en las escalas temporales de las corrientes y del oleaje generan que las tensiones de corte correspondientes sean de características muy diferentes. En este sentido la diferencia principal radica en que las corrientes son de carácter permanente (y por tanto la tensión), mientras que el oleaje aparece en ocasiones (durante tormentas). No obstante, las magnitudes de las tensiones de corriente y de oleaje calculadas son del mismo orden y por tanto son relevantes para la tensión total, aunque dichas magnitudes presentan a su vez variaciones espaciales a lo largo del Río de la Plata. Las tensiones de corte totales resultan de la interacción de ambas tensiones y por tanto muestran características de ambas componentes.

Para presentar detalladamente las características de las tensiones de corte de fondo generadas por las corrientes y por el oleaje en el Río de la Plata se presentan, a modo de ejemplo, las series de tensiones obtenidas para el mes de febrero de 2010 en tres estaciones de monitoreo ubicadas en diferentes zonas del mismo: estación #3 en el interior (Figura 3.59), estación #11 en la zona intermedia sobre la costa uruguaya (Figura 3.60) y estación #17 sobre la zona exterior (Figura 3.61). Para cada caso se presenta también la variación temporal del nivel obtenida con el modelo MARS. La característica semidiurna de la marea en el Río de la Plata determina que teóricamente el flujo se invierte dos veces en el día. En las tensiones las inversiones de flujo se reflejan en cuatro oscilaciones diarias de tensión, desde valores nulos (cuando la corriente es nula durante el máximo y el mínimo de nivel) a valores máximos determinados por las máximas corrientes (vectoriales). Como se ha mencionado (sección 3.2) el Río de la Plata presenta un campo de corrientes muy complejo, principalmente en la zona intermedia y exterior, de gran variabilidad espacial y temporal producto de la interacción de las corrientes de marea astronómica con la marea meteorológica, las corrientes fluviales y

las corrientes por densidad (en la zona exterior), con la topografía y la geometría de la zona. Debido a esto las tensiones presentan variaciones a lo largo del Río de la Plata, en el comportamiento temporal y en magnitud. Básicamente las tensiones de corte por corriente son mayores en la zona interior que en la zona exterior, y además mayores sobre la costa argentina que sobre la costa uruguaya. Por otra parte, las corrientes presentan mayor asimetría de los dos picos diarios sobre la costa uruguaya y sobre la zona intermedia, que en el resto del Río de la Plata.

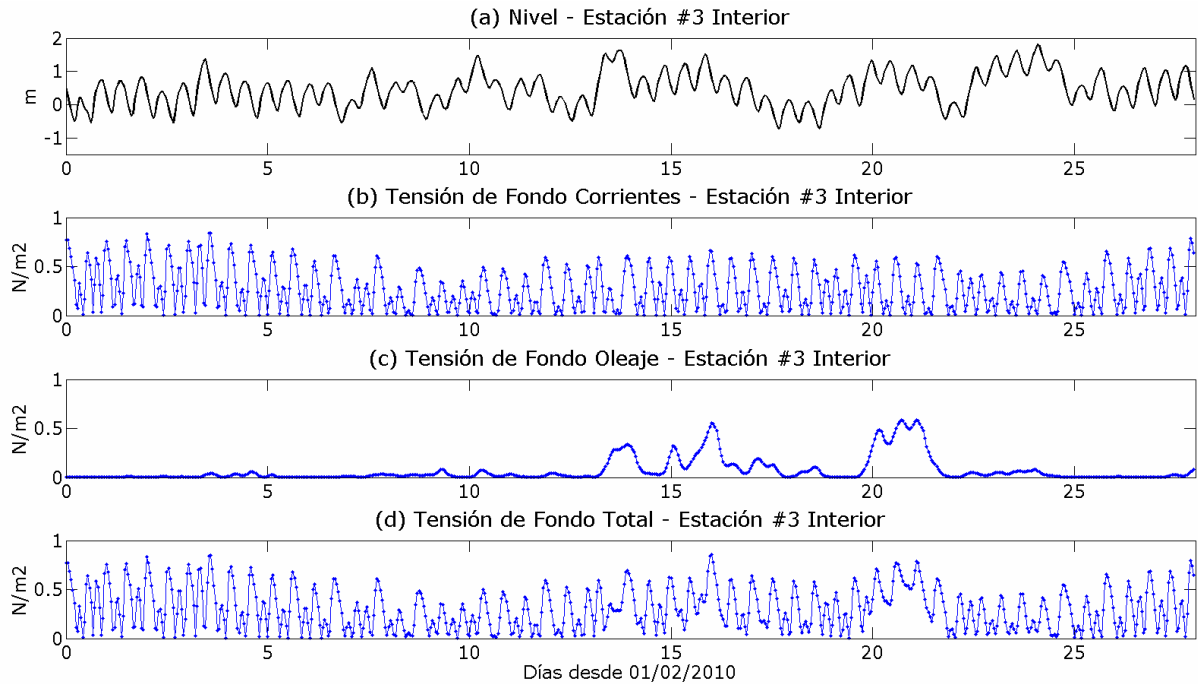


Figura 3.59: Variación temporal del (a) nivel, y de las tensiones de corte de fondo (b) generadas por corrientes, (c) generadas por oleaje y (d) total, calculadas por el modelo en la estación de monitoreo #3 de la zona interior del Río de la Plata (PN) durante febrero 2010.

En la serie obtenida para la estación interior #3 se observa que las tensiones por corriente tienen el ciclo de dos picos diarios marcado con uno mayor que el otro (correspondiente a las corrientes hacia el exterior), que superan en general el valor de $0,5 \text{ N/m}^2$. Se observa además una señal superpuesta de período de marea creciente y decreciente quincenal característica de la zona. En la estación intermedia #11 la serie de tensiones de corrientes muestra diferentes comportamientos. Durante los períodos para los cuales la dinámica presenta un período de características principalmente astronómicas en relación a la marea, se observa las tensiones de corte presentan un ciclo marcado con un pico de tensión diario que supera los $0,5 \text{ N/m}^2$. En los períodos con variación meteorológica de la marea se observan las tensiones presentan mayor asimetría con valores bajos y picos marcados por las mayores corrientes de descarga. En la estación exterior #17 se observa que las tensiones de corte de corrientes presentan valores bajos menores a $0,5 \text{ N/m}^2$ con una asimetría importante debido a la variabilidad de las corrientes en la zona.

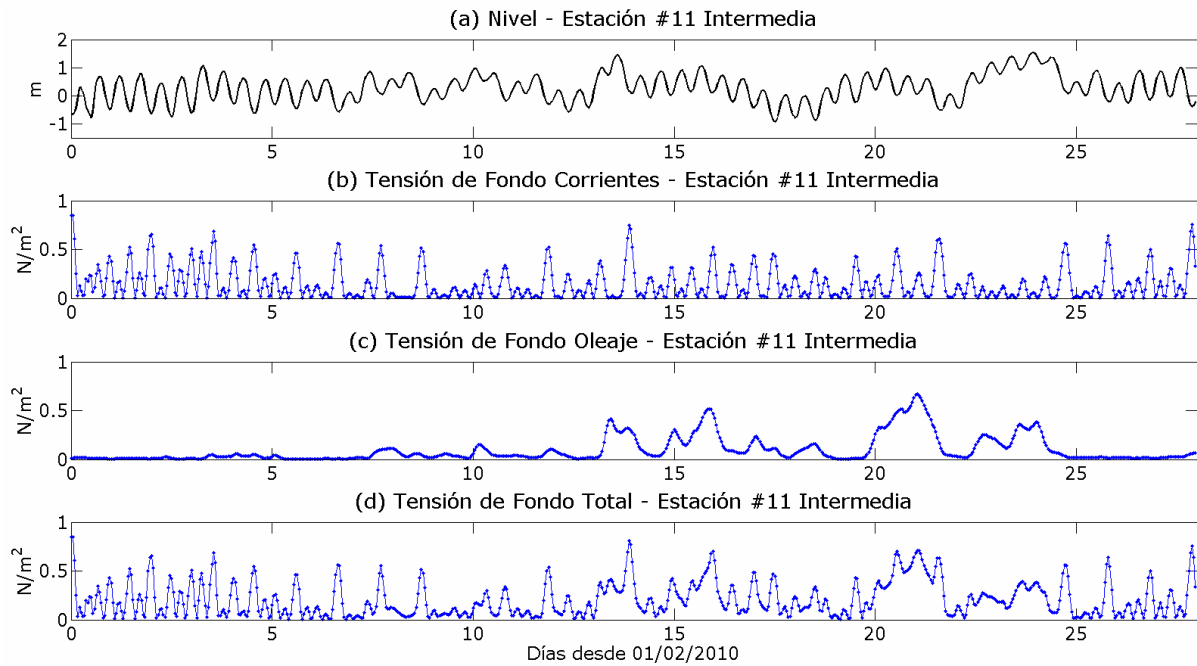


Figura 3.60: Variación temporal de las tensiones de corte de fondo (a) generadas por corrientes, (b) generadas por oleaje y (c) total, calculadas por el modelo en la estación de monitoreo #11 de la zona intermedia del Río de la Plata sobre la costa uruguaya durante febrero 2010.

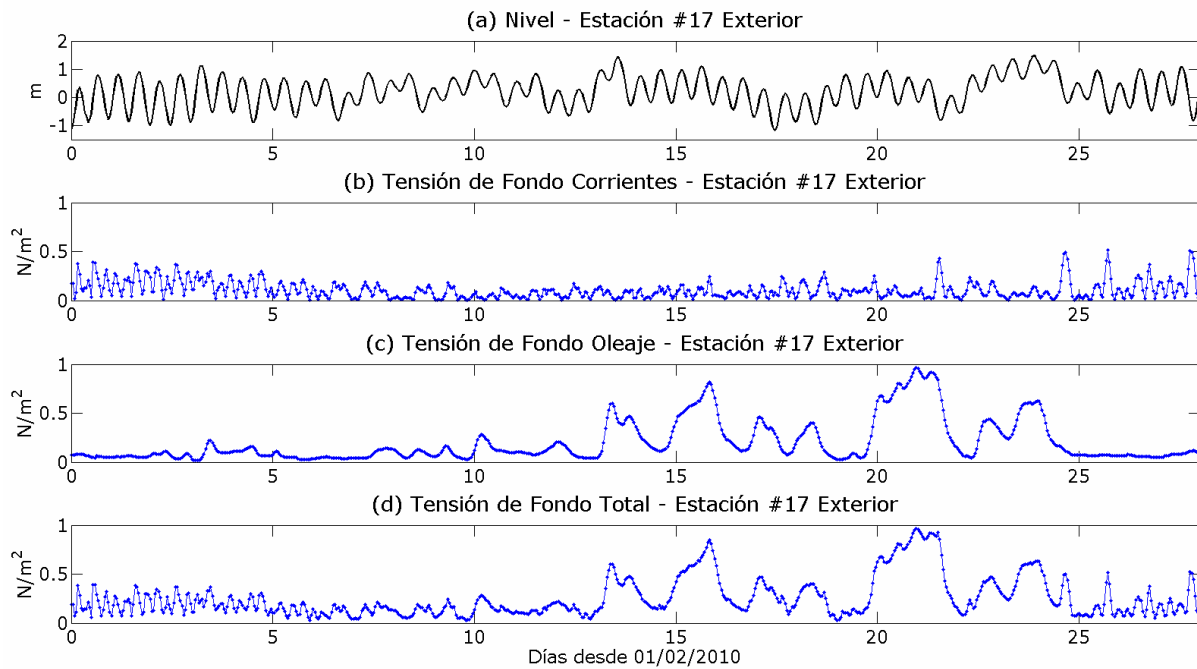


Figura 3.61: Variación temporal de las tensiones de corte de fondo (a) generadas por corrientes, (b) generadas por oleaje y (c) total, calculadas por el modelo en la estación de monitoreo #17 de la zona exterior del Río de la Plata durante febrero 2010.

Respecto a las tensiones de fondo generadas por el oleaje se observa que durante la mayor parte del mes los valores son nulos en los períodos de calma y durante las tormentas las tensiones aumentan durante varias horas o días en función de la duración de la misma. En general los eventos se identifican en todo el Río de la Plata con diferencia en la magnitud de los mismos, siendo mayores las tensiones en la zona exterior que en la zona interior e intermedia. Esto muestra un comportamiento espacial

opuesto al observado en las tensiones de corte de fondo por corriente, las cuales aumentan desde la zona exterior a la zona interior e intermedia.

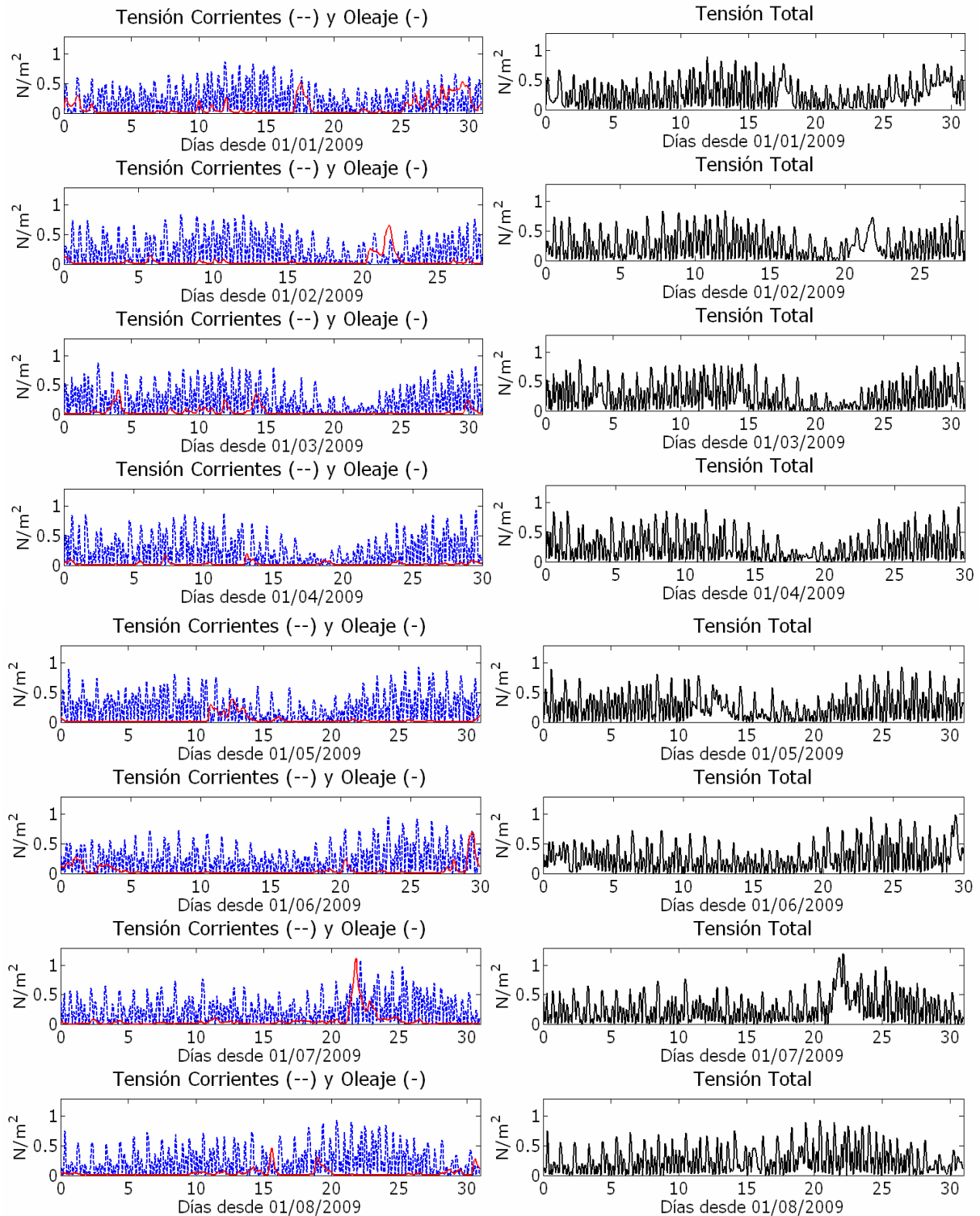


Figura 3.62: Variación temporal de las tensiones de corte de fondo generadas por corrientes y oleaje de marea (paneles izquierdo) y total (paneles derecho) calculadas por el modelo en la estación de monitoreo #5 durante 8 meses (enero a agosto de 2009).

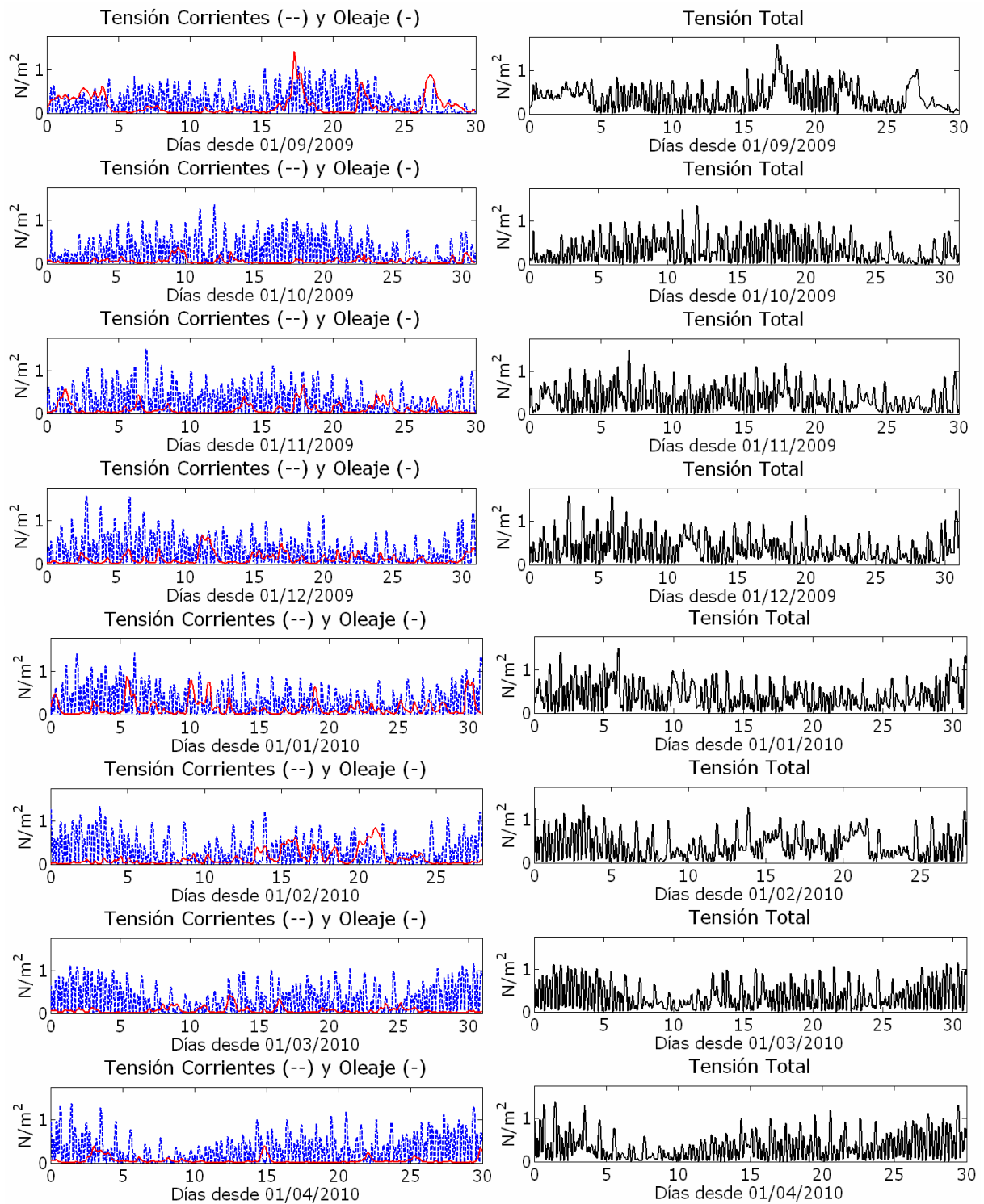


Figura 3.63: Variación temporal de las tensiones de corte de fondo generadas por corrientes y oleaje de marea (paneles izquierdos) y total (paneles derecho) calculadas por el modelo en la estación de monitoreo #15 durante 8 meses (setiembre 2009 a abril 2010).

Las tensiones totales presentan una combinación de la variabilidad temporal mencionada para las tensiones de corte de corrientes y de oleaje. En períodos de calma las tensiones presentan una alta variabilidad caracterizada por las oscilaciones de marea, y durante las tormentas ésta variabilidad se modifica aumentando la magnitud de la tensión y la permanencia de tensiones altas no nulas. En la zona interior-intermedia donde la marea predomina se obtienen tensiones altas a escala diurna

mientras que en la zona exterior las tensiones son bajas la mayor parte del tiempo pero presentan eventos de grandes tensiones (mayores a las de la zona interior e intermedia) durante las tormentas.

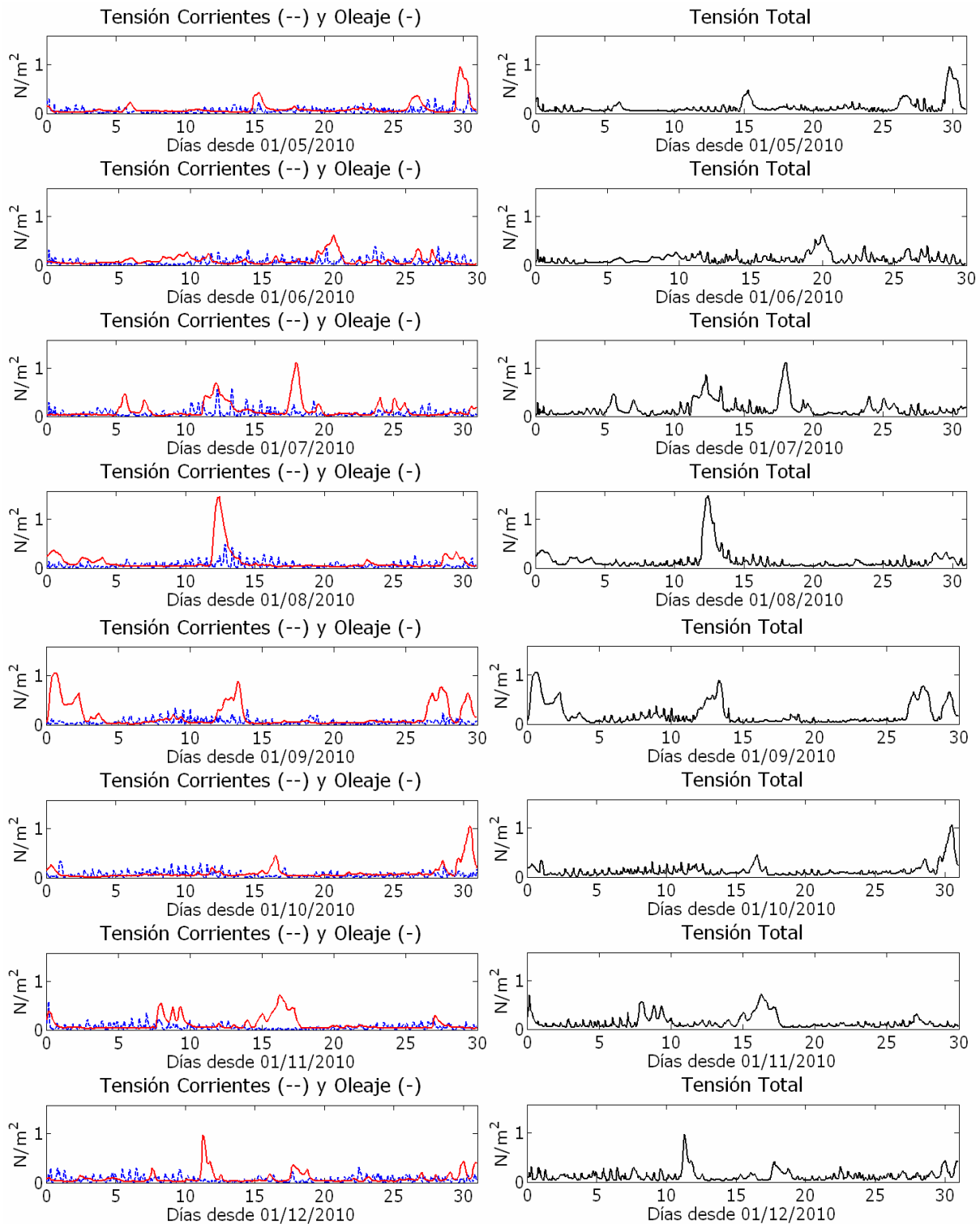


Figura 3.64: Variación temporal de las tensiones de corte de fondo generadas por corrientes y oleaje de marea (paneles izquierdos) y total (paneles derecho) calculadas por el modelo en la estación de monitoreo #24 durante 8 meses (mayo a diciembre 2012).

A partir de las simulaciones de la dinámica del Río de la Plata con todos los forzantes durante dos años completos es posible analizar la variabilidad mensual de las tensiones de corte de fondo.

La variabilidad de las corrientes y del oleaje mes a mes determina que las tensiones de corte resultantes presenten cierta variabilidad mensual. A modo de ejemplo se presentan en la Figura 3.62 los valores de tensión de corte de fondo (de las corrientes, de oleaje y total) calculados en la estación #5 para los meses de enero a agosto de 2009; en la Figura 3.63 las tensiones en la estación intermedia #15 para los meses entre setiembre 2009 y abril 2010; y en la Figura 3.64 las tensiones en la estación exterior #24 para los meses entre mayo y diciembre de 2010. En los ejemplos presentados se observa que para cada estación las tensiones de corte generadas por las corrientes presentan un comportamiento similar a lo largo de los meses mientras que el oleaje presenta mayor variación, tanto en magnitud como en frecuencia y duración de los eventos. Esto genera que la tensión total tenga cierta variación mes a mes, e incluso a lo largo del año puede variar cuál componente de la tensión (corriente u oleaje) es predominante en una determinada zona del Río de la Plata.

3.5.2. Variación espacial

Para los 24 meses del período de tiempo simulado (años 2009 y 2010) se determinaron los campos medios y máximos espaciales de la tensión de corte de fondo (total, por corriente y por oleaje). A pesar de la gran variabilidad de las tensiones de corte de fondo en escalas diarias los campos medios permiten identificar las zonas donde habitualmente se tienen mayores tensiones de corte. Por otra parte el campo máximo mensual muestra las tensiones asociadas al mayor evento de tormenta del mes. Los campos medios y máximos obtenidos muestran ciertas características comunes que se detallan a continuación. A modo de ejemplo se presentan en la Figura 3.65 los campos medios y máximos mensuales de la tensión de corte de fondo por corriente y por oleaje obtenidos para el mes de agosto de 2010.

En primer lugar se observa claramente como los campos medios de la tensión de corte de fondo de la corriente y del oleaje presentan distribuciones espaciales muy diferentes pero con magnitudes similares. Las tensiones de corte de corriente se observa aportan al valor medio principalmente en la zona interior e intermedia, con tensiones mayores sobre la costa argentina, siendo muy bajos los valores medios en la zona exterior del Río de la Plata y el Frente Marítimo salvo en algunas zonas de flujo de marea intenso como en Punta Rasa. Las tensiones de corte de oleaje tienen un comportamiento inverso, con valores promedio muy bajos casi nulos en la zona interior e intermedia, pero con valores medios mayores en la zona exterior del Río de la Plata (salvo gran parte de la Bahía Samborombón) y en el Frente Marítimo. Los campos de tensiones máximas mensuales indican tensiones de corriente de mayor magnitud a la distribución media pero con una distribución espacial similar, las tensiones mayores de la corriente ocurren en la zona intermedia sobre la costa argentina y las menores sobre la mayor parte de la zona exterior del Río de la Plata. Las tensiones máximas de oleaje muestran grandes tensiones (asociadas a las tormentas) con una distribución espacial que muestra las mayores tensiones en el inicio de la zona exterior y sobre las zonas bajas del Banco Inglés, Arquímedes y zonas costeras. En la zona intermedia del Río de la Plata sobre la costa uruguaya las tensiones máximas alcanzan las magnitudes de las máximas tensiones de corte generadas por las corrientes en la otra margen del Río de la Plata. En la zona exterior las tensiones máximas por oleaje superan a las tensiones máximas de la corriente en todo el Río de la Plata. El campo promedio mensual y el campo máximo mensual de la tensión total de corte de fondo también para el mes de agosto se presentan en la Figura 3.66.

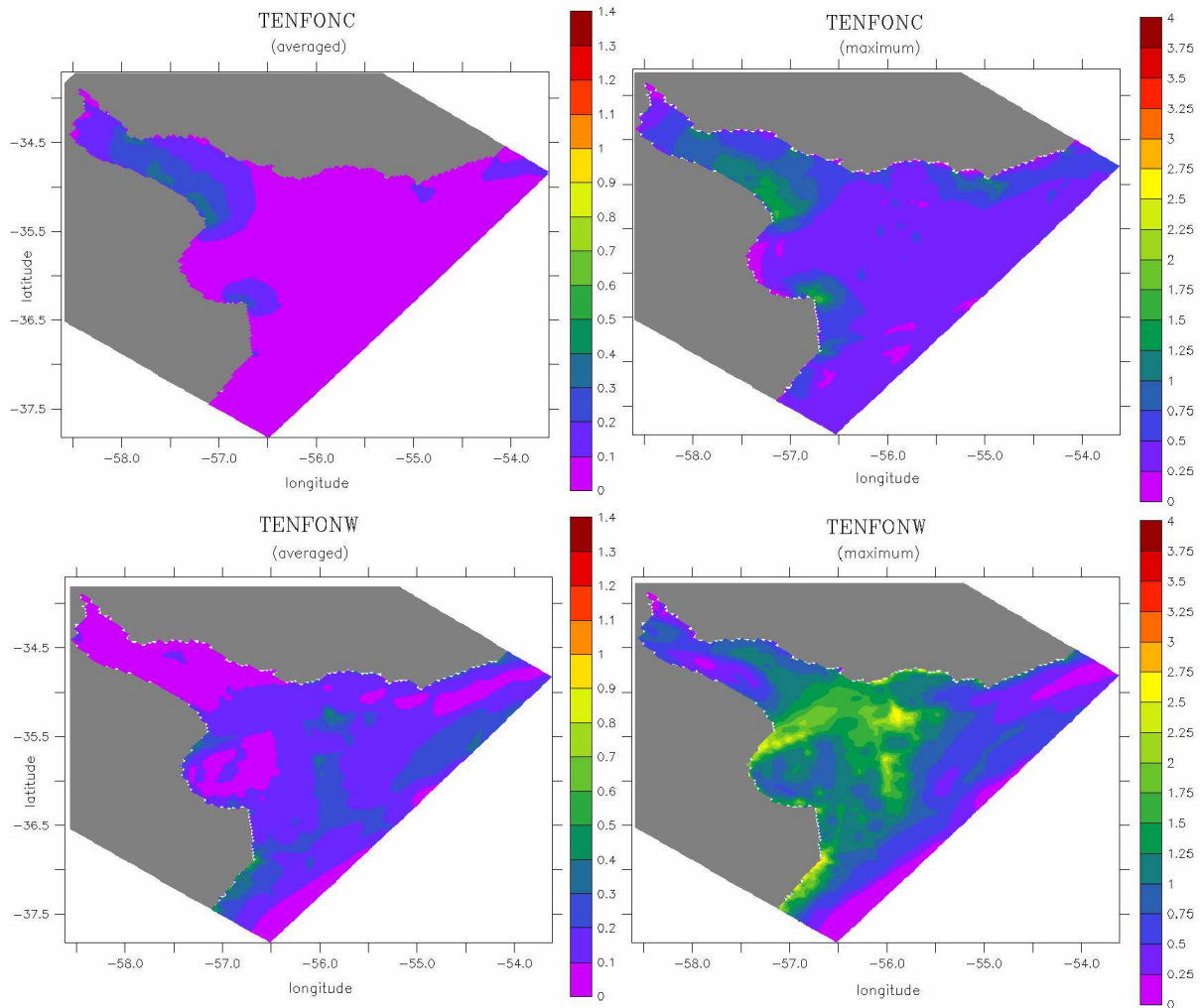


Figura 3.65: Distribuciones espaciales de la tensión de corte de fondo de corriente promedio mensual (panel superior izquierdo) y máxima mensual (panel superior derecho); y de la tensión de corte de fondo de oleaje promedio mensual (panel inferior izquierdo) y máxima mensual (panel inferior derecho); agosto 2010.

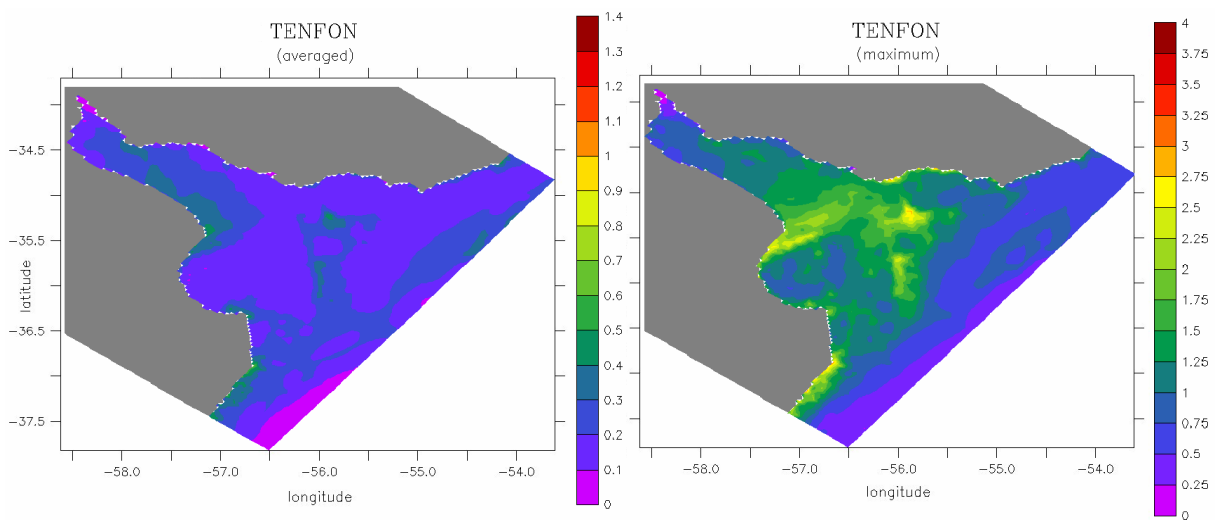


Figura 3.66: Distribuciones espaciales de la tensión de corte de fondo total promedio mensual (panel izquierdo) y máxima mensual (panel derecho); agosto 2010.

Las distribuciones espaciales de la tensión de corte total promedio y máxima incluyen los elementos descriptos anteriormente para las tensiones de corriente y de oleaje. De esta forma se observa las tensiones de corte de fondo promedio superan los 0,1 N/m² en todo el Río de la Plata con mayores tensiones en la zona intermedia (sobre la costa argentina) e interior del Río de la Plata, y sobre la zona del Banco Inglés y Arquímedes en la zona exterior. La tensión de corte máxima del mes analizado muestra que, en la zona inferior intermedia sobre el frente y en la zona exterior, ocurren los valores mayores con una disminución hacia la zona intermedia superior y la zona exterior del Frente Marítimo.

En la Figura 3.67 se presenta la distribución espacial del porcentaje asociado a la proporción entre ambas componentes de la tensión (corrientes y oleaje) en relación a la tensión de corte total. El objetivo es identificar zonas en las cuales prevalece (en promedio) una u otra componente de la tensión de corte de fondo. Por ejemplo los resultados para agosto 2010 muestran que las tensiones de corriente dominan en la zona interior donde ocurre la descarga de los tributarios y sobre la zona intermedia sobre la costa argentina del Río de la Plata con porcentajes mayores a un 80%. En la zona intermedia sobre la costa uruguaya predominan las tensiones de corte por corriente pero con porcentajes levemente menores, lo que muestra la mayor incidencia de las tensiones de oleaje en dicha zona. Por otro lado predomina ampliamente la tensión de corte de oleaje en la mayor parte de la zona exterior del Río de la Plata sobre las zonas bajas de la costa uruguaya y argentina y sobre el Banco Inglés y la zona sur. En la zona de Barra del Indio y la zona del Río de la Plata hacia la costa argentina (cercana a Samborombón), y el Canal Oriental, tanto las tensiones de corriente como las tensiones por oleaje tienen igual incidencia en la tensión de corte total promedio mensual, con porcentajes calculados entre 40 % y 60 %.

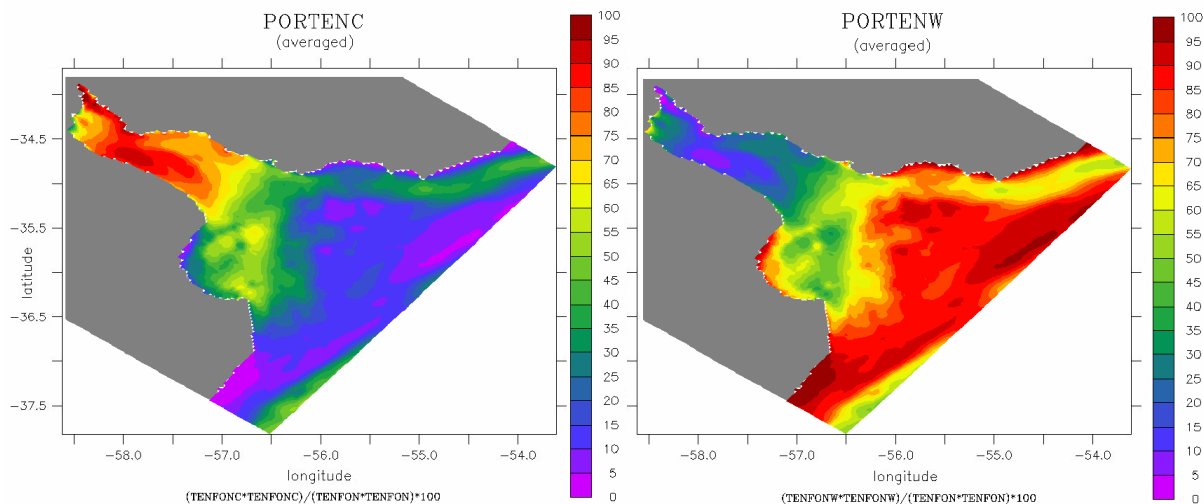


Figura 3.67: Distribuciones espaciales del promedio mensual de la proporción de la tensión de corte de corriente en la tensión total (panel izquierdo) y del promedio mensual de la proporción tensión de corte de oleaje en la tensión de corte total (panel derecho); agosto 2010.

En el Anexo B.3 se presentan los campos medios y máximos mensuales de las tensiones de corte de fondo total para todos los meses de los dos años simulados 2009 y 2010. La comparación entre los mismos permite identificar tanto los patrones comunes así como también las variabilidades mensuales, en lo que respecta principalmente a la tensión de corte máxima, asociada a los eventos de tormenta (oleaje), lo que genera una variación principalmente en la zona exterior del Río de la Plata de la tensión de corte de fondo total.

3.5.3. Campos estadísticos

Considerando los meses comprendidos entre enero 2009 y agosto 2010 (obtenidos con la misma información de vientos CEP en el modelo hidrodinámico y en el modelo de oleaje) se determinaron las tensiones medias y máximas de las corrientes, del oleaje y total, calculadas por el modelo MARS. Estos resultados ratifican los comportamientos mencionados anteriormente. Se presentan en la Figura 3.68 los campos medios y máximos, obtenidos durante los 20 meses mencionados, de la tensión de corte de fondo de las corrientes y del oleaje.

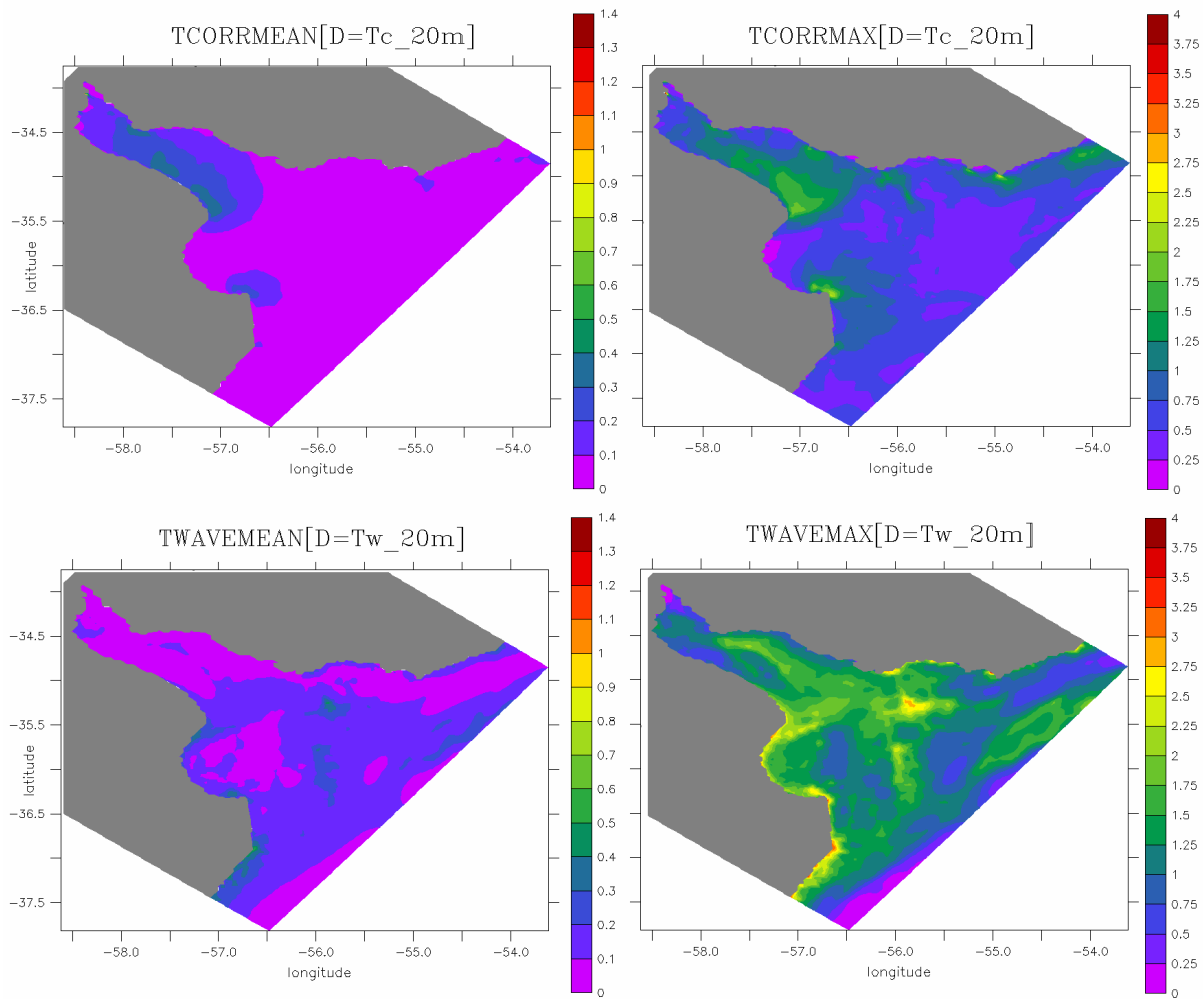


Figura 3.68: Distribuciones espaciales de la tensión de corte de fondo de corriente promedio (panel superior izquierdo) y máxima (panel superior derecho); y de la tensión de corte de fondo de oleaje promedio (panel inferior izquierdo) y máxima (panel inferior derecho) durante 20 meses (enero 2009 a agosto 2010).

Se observa que las tensiones medias de las corrientes son mayores en la zona interior e intermedia sobre la costa argentina, mientras que las tensiones medias más elevadas del oleaje se observan en la zona exterior. Los valores máximos muestran tensiones mayores generadas por el oleaje que las tensiones generadas por las corrientes. Cuando ocurren las tormentas generan tensiones de fondo en una gran extensión, que incluye el Río de la Plata exterior y la zona intermedia sobre la costa uruguaya y zona central principalmente. Las distribuciones espaciales del promedio y del valor máximo de las tensiones totales se presentan en la Figura 3.69. Se observa una tensión total media menor a $0,2 \text{ N/m}^2$ en la mayor parte del Río de la Plata con valores mayores en la zona

intermedia sobre la costa argentina, en la zona interior y en las zonas bajas del Banco Inglés y del Banco Arquímedes. Las tensiones máximas muestran fuertes tensiones del orden de 1 N/m² en todo el Río de la Plata con valores mayores de hasta 2 N/m² en la zona intermedia, y cercanos a 3 N/m² en las zonas bajas costeras del Río de la Plata exterior y en los bancos mencionados anteriormente.

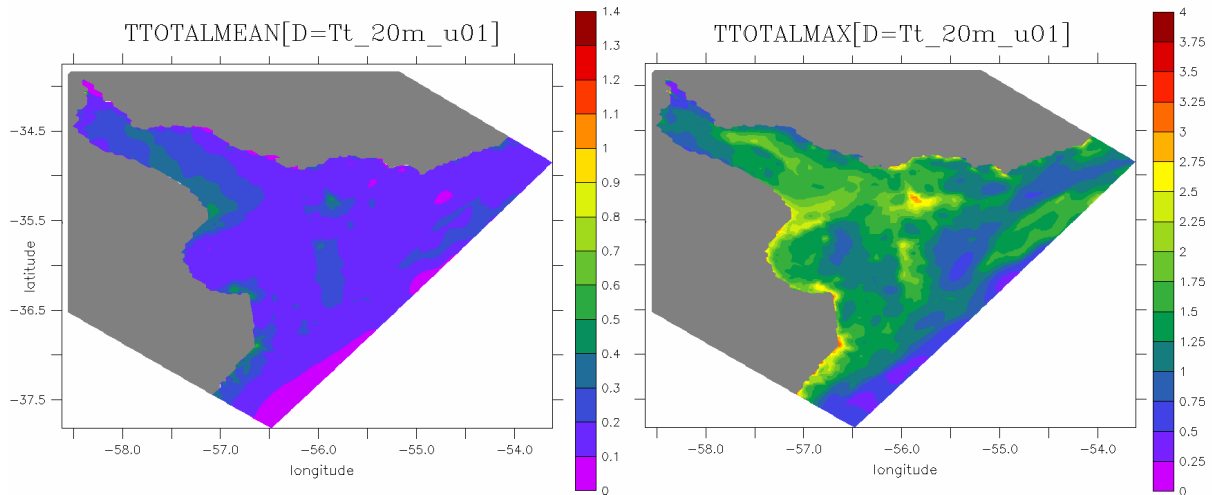


Figura 3.69: Distribuciones espaciales de la tensión de corte de fondo total promedio (panel izquierdo) y máxima (panel derecho) durante 20 meses (enero 2009 a agosto 2010).

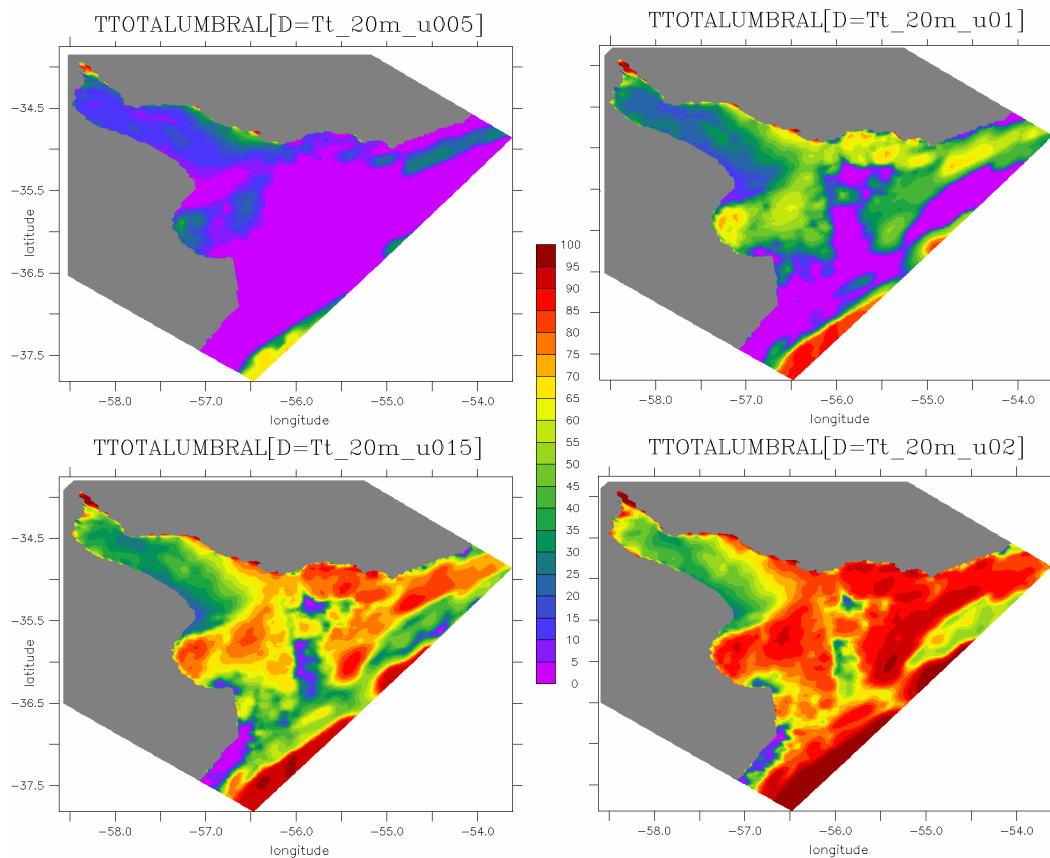


Figura 3.70: Distribución espacial del porcentaje de frecuencia de ocurrencia de la tensión de corte de fondo total menor a 0,05 N/m² (panel superior izquierdo); 0,10 N/m² (panel superior derecho); 0,15 N/m² (panel inferior izquierdo); y 0,20 N/m² (panel inferior derecho); para 20 meses (enero 2009 a agosto 2010).

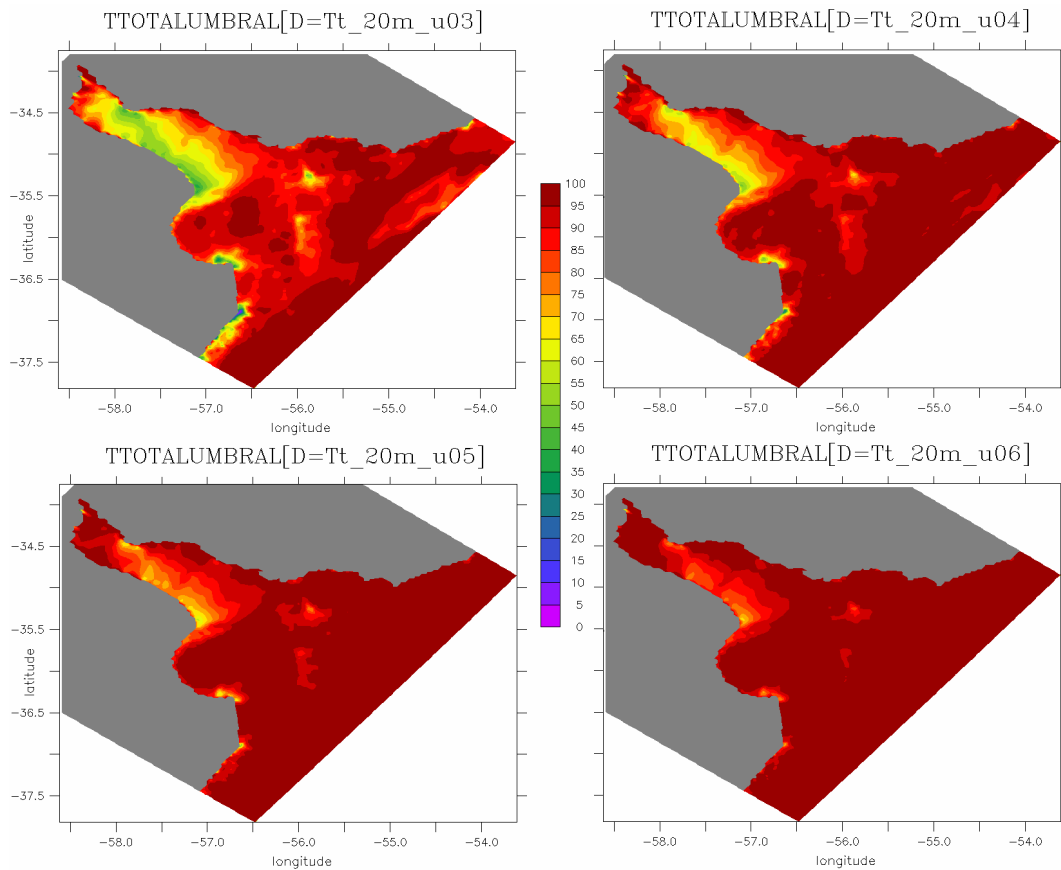


Figura 3.71: Distribución espacial del porcentaje de frecuencia de ocurrencia de la tensión de corte de fondo total menor a $0,30 \text{ N/m}^2$ (panel superior izquierdo); $0,40 \text{ N/m}^2$ (panel superior derecho); $0,50 \text{ N/m}^2$ (panel inferior izquierdo); y $0,60 \text{ N/m}^2$ (panel inferior derecho); para 20 meses (enero 2009 a agosto 2010).

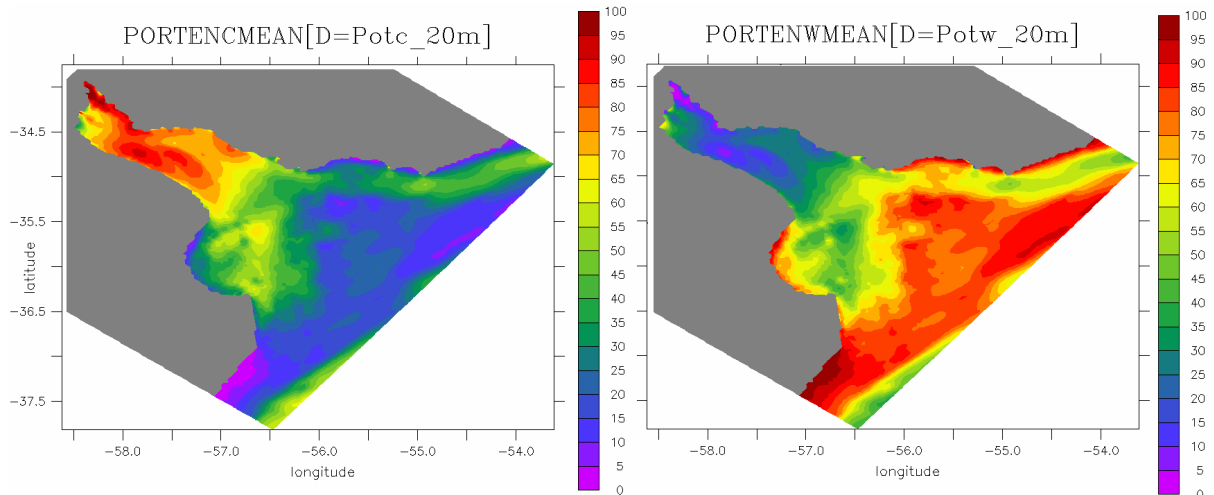


Figura 3.72: Distribuciones espaciales del promedio de la proporción de la tensión de corte de corriente en la tensión total (panel izquierdo) y del promedio de la proporción de la tensión de corte de oleaje en la tensión de corte total (panel derecho) durante 20 meses (enero 2009 a agosto 2010).

En las Figuras 3.70 y 3.71 se presentan las distribuciones espaciales de los porcentajes de frecuencia de ocurrencia asociados a una tensión de corte de fondo total menor a ciertos umbrales definidos. Nuevamente se visualiza la diferencia entre la zona

intermedia del Río de la Plata y la zona exterior. Valores bajos se observan frecuentemente en todo el Río de la Plata pero los umbrales mayores se superan con mayor frecuencia en la zona intermedia.

Por último, se calculó el promedio de la proporción de la tensión de corriente y la de la tensión del oleaje en la tensión total durante los 20 meses simulados. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 3.72. Se observa claramente la zonificación marcada que existe en el Río de la Plata vinculada a las tensiones de corte de fondo. En la zona interior sobre las zonas de descarga de los tributarios domina claramente la tensión de corte de las corrientes siendo muy leve la incidencia de las tensiones del oleaje. Hacia la zona de Barra del Indio se observa una disminución del predominio de las tensiones de corriente y un incremento de la influencia de las tensiones del oleaje, principalmente sobre la costa uruguaya. En la zona exterior se observa que las tensiones de corte generadas por el oleaje predominan en gran parte de la misma, exceptuando la zona cercana a Bahía de Samborombón en primer lugar y en la zona del Canal Oriental en segundo lugar, donde ambas componentes son importantes. Se destaca que en la zona del frente tanto la tensión de corte de las corrientes como la tensión de corte del oleaje son de igual importancia.

3.6. SÍNTESIS DEL CAPÍTULO

Este capítulo se ha centrado principalmente en la presentación de los modelos numéricos implementados y calibrados utilizados para obtener las características principales de la hidrodinámica en el área de estudio: las corrientes de marea y el oleaje.

Para resolver el campo hidrodinámico de marea se utiliza el modelo numérico MARS desarrollado en IFREMER implementado en dos dominios encajados. El primero, implementado en versión bidimensional integrada en vertical denominado rank0, incluye la zona del Atlántico Sur, y el segundo nivel, que se trata de un modelo bidimensional denominado rank1, incluye la zona del Río de la Plata y la zona de plataforma (Frente Marítimo). Para representar el oleaje en la zona se utilizó el modelo SWAN implementado en el mismo dominio (y misma grilla) que el segundo nivel del modelo MARS. De esta forma se evitan interpolaciones adicionales entre la grilla del SWAN y la grilla del MARS al realizar las simulaciones de la dinámica de sedimento fino. El modelo de marea es forzado por el modelo global astronómico FES2004 y por los forzantes atmosféricos obtenidos de campos de diversos Re-análisis. El modelo SWAN es forzado también con éste último y por la información de oleaje global obtenida del modelo WW3 implementado por IFREMER a escala planetaria.

Ambos modelos fueron testeados y ajustados con gran cantidad de información de campo de las variables vinculadas (niveles, corrientes, salinidad y parámetros de oleaje) en la mayor parte del Río de la Plata. Los resultados obtenidos muestran que ambos modelos representan las principales características de la hidrodinámica en la zona de estudio con buena calidad. Se estudiaron los principales patrones de flujo de marea en la zona así como también las principales características del oleaje. Para el nivel de resolución implementado se considera el estado de desarrollo de ambos modelos es suficiente y es posible entonces avanzar en la modelación de la dinámica de sedimentos.

No obstante previamente se determinaron las tensiones de corte de fondo generadas por ambos forzantes que determinan la resuspensión del material de fondo en el modelo sedimentológico y que influyen considerablemente en la dinámica. A través de la tensión de corte de fondo del oleaje se representa el único efecto del mismo sobre los sedimentos finos incluido en este estudio. En cambio en cuanto a la hidrodinámica de marea el flujo generado por la misma influye también en el transporte de sedimentos

finos y en la velocidad de caída, además de la representación de los procesos de intercambio con el fondo.

Se analizaron diversas formulaciones existentes para calcular las tensiones de corte de fondo previa a la selección de los parámetros definitivos. Una vez determinada la tensión de corte de fondo total se realizó un análisis de la variabilidad temporal y espacial de la misma. Las diferencias en escala temporal de las mareas vs el oleaje genera una gran variabilidad de la tensión de corte de fondo. Por otro lado se observa una zonificación marcada en el Río de la Plata en lo que respecta a las tensiones de corte generadas en el fondo por el flujo. En la zona interior e intermedia dominan las mareas y por tanto las tensiones de fondo permanentes, principalmente sobre la costa argentina. En la zona exterior (limitada por Barra del Indio) la dinámica es muy diferente, con valores muy bajos de tensiones generadas por corrientes casi permanentemente pero que durante los eventos de tormenta (entre 2 a 5 por mes aproximadamente) se incrementan fuertemente. La permanencia de los eventos de tormenta en relación a las corrientes de marea que se invierten cada 6 horas genera que las grandes tensiones puedan durar hasta varios días.

Las variaciones temporales observadas en las tensiones de corrientes y de oleaje, y por tanto en las tensiones totales resultantes, y la gran variabilidad espacial de las mismas en la zona de estudio, generan una gran complejidad en la dinámica de sedimentos finos en la zona, según se estudia y discute en los siguientes capítulos.

Capítulo 4

4. MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA DINÁMICA DE SEDIMENTOS FINOS

4.1. INTRODUCCIÓN

Para la modelación numérica de la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata se utiliza el módulo correspondiente del modelo MARS desarrollado en IFREMER. El mismo ha sido aplicado exitosamente en diversas zonas de características estuarinas y costeras para estudiar diversas componentes de la dinámica de sedimentos cohesivos y no cohesivos (Tessier, 2006; Dufois, 2008). Este módulo trabaja acoplado con el módulo hidrodinámico de marea del MARS y recibe la información del modelo de oleaje SWAN; ambos modelos implementados en el área de estudio y calibrados anteriormente (Capítulo 3). En el modelo de sedimentos finos MARS implementado en el dominio rank1 se representan las principales características de su dinámica: transporte, sedimentación, deposición en el fondo, y resuspensión. No se considera la consolidación del sedimento de fondo en este trabajo, por lo que las características del mismo se mantienen invariantes en el tiempo. El fondo se representa mediante una discretización en capas verticales. En función de los análisis de composición de los finos en la zona obtenidos en los datos se incluyen en el modelo dos variables de finos, limo y arcilla. Las variables se diferencian en su velocidad de caída. Además, para cada una de estas variables se separa el material que proviene del fondo y el material que proviene de los aportes fluviales. El fondo del Río de la Plata está compuesto mayoritariamente por limo y arenas finas en la zona interior e intermedia y arcilla limosa en la zona exterior. Se utiliza en el modelo como condición inicial la composición histórica determinada por Laborde (Wells and Daborn, 1998), definiendo en cada celda del modelo la proporción de materiales correspondiente. Por la disponibilidad de datos se implementó el modelo para simular los años 2009 y 2010 completos. Se simuló como período previo el año 2008 para inicializar el campo salino y el campo de sedimentos.

La metodología utilizada para el desarrollo del modelo consiste en la realización de diversos tipos de análisis de sensibilidad con un grado creciente de complejidad a medida que la comprensión de la dinámica general de sedimentos finos aumenta. Es posible separar así la metodología realizada en tres grandes etapas: análisis preliminares, análisis de sensibilidad por procesos y análisis de sensibilidad integrados. A partir de cada uno de los análisis se fueron obteniendo resultados parciales que permitieron el avance paralelo en el ajuste del modelo sedimentológico del Río de la

Plata. Algunos análisis incluyeron simulaciones de períodos de tiempo cortos, de un mes ó dos de duración y en otros se utilizaron simulaciones anuales. Los resultados fueron analizados considerando la evolución temporal de los campos espaciales de las variables de sedimento fino consideradas, así como también las series calculadas en las celdas de control definidas según las estaciones de monitoreo utilizadas en el Proyecto FREPLATA-FFEM que cubren las diversas zonas del Río de la Plata. Además, las series continuas de turbidez medidas en la Boya, en Torre Oyarvide y en Pilote Norden son referencia para ajustar el modelo. Como resultado del proceso de estudio del modelo y de su sensibilidad a diversas modificaciones en los parámetros y procesos considerados, se cuenta con el modelo ajustado que representa la generalidad de la dinámica de sedimentos finos en la zona de estudio observada en los datos. Se representan correctamente los eventos de incremento que se observan en los datos durante las tormentas además de los valores de concentración en suspensión en períodos de calma.

En este capítulo se incluye en primer lugar una descripción de las principales características del modelo de sedimentos finos implementado en el Río de la Plata. Posteriormente se desarrollan los diversos análisis de sensibilidad realizados, incluyendo la descripción de cada uno y sus resultados. Por último, se presenta la comparación entre los resultados del modelo ajustado y los datos disponibles, así como también una discusión final vinculada a la calidad del modelo.

4.2. MODELO DE SEDIMENTOS FINOS - MARS

4.2.1. Ecuaciones gobernantes

4.2.1.1. Ecuación de transporte

Las partículas de sedimento fino en suspensión se trasladan con el flujo horizontal. El transporte de sedimento fino está gobernado por la ecuación de continuidad (ecuación 4.1) donde se incluyen las características propias de la dinámica de material particulado en suspensión como la velocidad de caída, y los términos de intercambio entre la columna de agua y el fondo.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial D(uC - K_x \frac{\partial C}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial D(vC - K_y \frac{\partial C}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial D \left[\left(w^* - \frac{w_s}{D} \right) C - \frac{K_z}{D^2} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right]}{\partial \sigma} = 0 \quad (4.1)$$

Siendo C la concentración del sedimento considerado y w_s su velocidad de caída. Las condiciones de borde en la superficie ($\sigma = 1$) y en el fondo ($\sigma = 0$) están dadas por las ecuaciones 4.2 y 4.3, respectivamente. En el fondo se incluye el intercambio con el sedimento de fondo, representado a través de los flujos de erosión (E) y deposición (D_e).

$$\left(-\frac{K_z}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} - w_s C \right)_{\text{sup}} = 0 \quad (4.2)$$

$$\left(-\frac{K_z}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} - w_s C \right)_{\text{fondo}} = E - D_e \quad (4.3)$$

4.2.1.2. Erosión

Para representar el proceso de erosión del material de fondo se utiliza la ley simple de Partheniades, la cual expresa el flujo de erosión ($\text{kg/m}^2\text{s}$) en función del exceso adimensionado de la tensión de corte (ecuación 4.4).

$$E = E_0 \left(\frac{\tau}{\tau_{ce}} - 1 \right) \quad \text{si } \tau \geq \tau_{ce} \quad (4.4)$$

Siendo τ la tensión de corte de fondo, τ_{ce} la tensión crítica de erosión y E_0 la tasa de erosión. En caso contrario ($\tau < \tau_{ce}$), el flujo de erosión es nulo ($E = 0$).

4.2.1.3. Deposición

El flujo de deposición se establece en función del sedimento disponible a depositar condicionado también por la tensión de corte de fondo (ecuación de Krone, 4.5); siendo τ_{cd} la tensión crítica de deposición.

$$D_e = w_s C \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{cd}} \right) \quad \text{si } \tau \leq \tau_{cd} \quad (4.5)$$

En el caso contrario ($\tau > \tau_{cd}$), el flujo de deposición es nulo ($D_e = 0$).

El flujo neto de sedimento fino que se intercambia entre el fondo y la columna de agua está dado por la diferencia ($E - D_e$). En la mayor parte de las simulaciones realizadas en este estudio se estableció una tensión crítica de deposición igual a la tensión crítica de erosión ($\tau_{cd} = \tau_{ce} = \tau_c$). Según las restricciones mencionadas anteriormente en este caso los procesos de erosión y deposición no ocurren simultáneamente, y el flujo neto de intercambio se transforma en:

$$\begin{aligned} \text{Si } \tau \leq \tau_c: \quad (E - D_e) &= w_s C \left(1 - \frac{\tau}{\tau_c} \right) \\ \text{Si } \tau > \tau_c: \quad (E - D_e) &= E_0 \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right) \end{aligned} \quad (4.6)$$

En otros casos se utiliza una tensión crítica de deposición mayor a la tensión crítica de erosión y mucho mayor a las tensiones de corte de fondo habituales en la zona de estudio. En ese caso el término $(1 - \tau/\tau_{cd})$ tiende a uno y el flujo neto de intercambio con el fondo se aproxima por:

$$\begin{aligned} \text{Si } \tau \leq \tau_{ce}: \quad (E - D_e) &= w_s C \\ \text{Si } \tau > \tau_{ce}: \quad (E - D_e) &= E_0 \left(\frac{\tau}{\tau_{ce}} - 1 \right) - w_s C \end{aligned} \quad (4.7)$$

Esto significa que, para tensiones bajas menores a la tensión crítica de erosión, el material que sedimenta y alcanza la capa inferior de la columna de agua se deposita en la capa de fondo. Cuando las tensiones superan la tensión crítica de erosión, la formulación anterior indica que para que ocurra un ingreso del sedimento de fondo a la columna de agua, debe superarse el flujo de deposición (es decir, $E_0(\tau/\tau_{ce} - 1) > w_s C$). De

esta manera no se diferencian los dos procesos sino que se establece que la resuspensión del material de fondo ocurre cuando las tensiones de corte de fondo superan la tensión crítica y además cuando el flujo de erosión supera al flujo de deposición que está ocurriendo. El modelo conceptual detrás de esta simplificación es que para las escalas temporales que resuelve el modelo es más importante el comportamiento neto, que lo que ocurre en cada componente del proceso de intercambio de material con el fondo.

4.2.1.4. Velocidad de caída

En términos generales en este trabajo se utilizaron tres tipos de formulaciones para las velocidades de caída de las fracciones finas de sedimento (limo y arcilla). La primera se utiliza para la fracción más gruesa de sedimento fino (limos) y refiere a un valor constante de velocidad de caída.

La segunda formulación utilizada tiene en cuenta lo que sucede con los sedimentos finos en soluciones acuosas, los cuales están sujetos a fenómenos de floculación y forman agregados, y por tanto las velocidades de caída son mucho mayores a las elementales. Específicamente se utiliza la ley de variación de velocidad de caída con la concentración según Le Hir et al. (2001) dada por la ecuación 4.8. Esta ley se divide en dos partes; para concentraciones menores a una determinada concentración hay un incremento de la velocidad de caída con la concentración, mientras que para valores mayores a dicha concentración máxima la ley es decreciente. Los parámetros α_1 y α_2 son funciones del valor mínimo de velocidad de caída ($W_{s\min}$), del valor máximo de velocidad de caída ($W_{s\max}$) y de la concentración a la cual ocurre el valor máximo (C_{\max}). Para concentraciones mayores a ésta última ocurre lo que se denomina sedimentación obstruida donde el gran tamaño de los flocs genera que la velocidad de caída disminuya.

$$\begin{aligned} \text{Si } C \leq C_{\max} : \quad w_s &= w_{s\min} (1 + \alpha_1 C + \alpha_2 C^2) \\ \text{Si } C_{\max} < C < C_{cr} : \quad w_s &= (1 - \beta_1 C^{\beta_2})^{4.65} R \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\text{Siendo: } R = \frac{w_{s\min} (1 + \alpha_1 C_{\max} + \alpha_2 C_{\max}^2)}{(1 + \beta_1 C_{\max}^{\beta_2})^{4.65}} \quad C_{cr} = 60 \text{ g/l; } \beta_1 = 0,085 \text{ y } \beta_2 = 0,5$$

Durante los análisis de sensibilidad realizados se definieron diversas combinaciones de la terna ($W_{s\min}$; $W_{s\max}$; C_{\max}) que determinan diferentes leyes de velocidad de caída en función de la concentración. Es importante aclarar que para los valores de concentración en suspensión habituales del Río de la Plata rara vez se alcanza la zona de velocidad de caída obstruida.

En tercer lugar se considera la formulación de Van Leussen (Winterwerp and Kesteren, 2004) que incluye el efecto de la turbulencia además del efecto de la concentración en la velocidad de caída (ecuación 4.9). La turbulencia se determina mediante el parámetro G ('shear rate parameter') que se aproxima según la ecuación 4.10 utilizando la velocidad de corte y la altura relativa al fondo $\zeta = z/D$. Es importante aclarar en la implementación del modelo MARS utilizada se utiliza la velocidad de corte dada por la componente hidrodinámica de flujo de marea (no se incluye la componente oscilatoria).

$$w_s = w_{s,r} \frac{(1 + aG)}{(a + bG^2)} \quad (4.9)$$

Siendo $w_{s,r}$ la velocidad de caída calculada con la ecuación 4.8; $a = 0,3$; $b = 0,09$ y

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}} = \sqrt{\frac{1}{\nu} \frac{u_*^3}{\kappa D} \left(\frac{1-\zeta}{\zeta} \right)} \quad (4.10)$$

Para el caso de partículas aisladas se han definido diversas formas de determinar la velocidad de caída en función del diámetro medio de las partículas. Simplificando la ley de caída de una partícula de Stokes, Migniot (1989) determina la siguiente relación entre el diámetro de partícula (μ) y viscosidad de caída (μ/seg), asumiendo que se trata de una partícula de densidad entre 2,5 y 2,6 en un medio de viscosidad $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$:

$$w_s \approx d^2 \quad (4.11)$$

4.2.2. Implementación del modelo en el Río de la Plata

Para determinar las principales características de la implementación del modelo de sedimentos finos en el Río de la Plata se tuvo en cuenta la información disponible vinculada con el sedimento de fondo y con los aportes fluviales de la zona. En base a la misma se incluyen como variables del sistema las fracciones finas arcilla y limo además de la fracción tipo arena fina. No obstante la fracción arena se deposita prácticamente en la zona del delta del Paraná (Menéndez et al., 2009) al inicio del Río de la Plata y por tanto se considera no relevante en la dinámica general del mismo. En consecuencia en el modelo la arena fina se incluye con una velocidad de caída elevada en relación a los materiales finos y no se incluye en general en los análisis de resultados.

4.2.2.1. Aportes fluviales de sedimento en suspensión

El Río de la Plata recibe de sus tributarios un flujo considerable de sedimento en suspensión, siendo el principal el del Río Paraná, en el cual predomina el aporte del Río Bermejo (FREPLATA, 2011). Se utilizan en este trabajo los resultados del estudio realizado por el INA en el marco del Proyecto FREPLATA-FFEM (Ré et al., 2009; FREPLATA, 2011) vinculado con la caracterización de los aportes de sedimento que recibe el Río de la Plata de los ríos Paraná y Uruguay, en el cual determinaron las cargas sólidas diarias de los ríos Paraná Las Palmas, Paraná Guazú y Uruguay para los años 2002, 2003 y 2004. Los resultados muestran que el sedimento que ingresa al Río de la Plata está constituido por arena fina, y por fracciones finas de arcilla y de limo. El mayor aporte proviene del Paraná Guazú, con valores extremos de hasta 400 mg/l de finos, seguido del Paraná Las Palmas y en tercer lugar el Uruguay.

Al no contar con información de carga de material de suspensión durante los años 2009-2010, se utilizan los valores medios de las series de concentración de finos y arenas de los años 2002, 2003 y 2004. Según los estudios realizados por el INA (FREPLATA, 2011) aproximadamente el 33% del aporte de finos del Paraná Guazú corresponde a la fracción más fina tipo arcilla y el restante 67% a la fracción tipo limo. Se utilizaron estas proporciones para determinar el aporte de arcilla y limo de los tres tributarios del Río de la Plata. Las concentraciones finales obtenidas y consideradas en este trabajo para cada tributario y según el tipo de sedimento se presentan en la Tabla 4.1. Se observa el mayor aporte corresponde a la fracción fina limo seguida de la arcilla y en tercer lugar por la arena. Además, de la concentración media total de 237 mg/l la mayor parte (162 mg/l) corresponde al aporte del Paraná Guazú. Considerando solamente la fracción de finos (limos y arcillas) se observa en promedio ingresan 150 mg/l de limo y 50 mg/l de arcilla.

Para representar el ingreso de sedimento en suspensión por las secciones definidas en la grilla para los tres tributarios (Río Paraná Guazú, Río Paraná Las Palmas y Río Uruguay) se especifica un valor medio de concentración de cada tipo de

sedimento: arena, limo y arcilla. Se utiliza la nomenclatura MESsable, MESsilt y MESclay para representar respectivamente la arena, el limo y la arcilla, que provienen del aporte fluvial. Utilizando la información de caudal fluvial el modelo determina la cantidad de sedimento en suspensión para cada instante de tiempo considerado. Las series temporales obtenidas para las fracciones finas limo y arcilla para el período 2009-2010 se presentan en la Figura 4.1.

	Parana Guazu	Parana Las Palmas	Uruguay	Total
Limo	103	35	12	150
Arcilla	35	12	4	50
Arena	24	8	5	37
TOTAL	162	54	21	237

Tabla 4.1: Concentración media (mg/l) de sedimento en suspensión (limo, arcilla, arena y total) que ingresa al Río de la Plata a través de los ríos Paraná Guazú, Paraná Las Palmas y Uruguay.

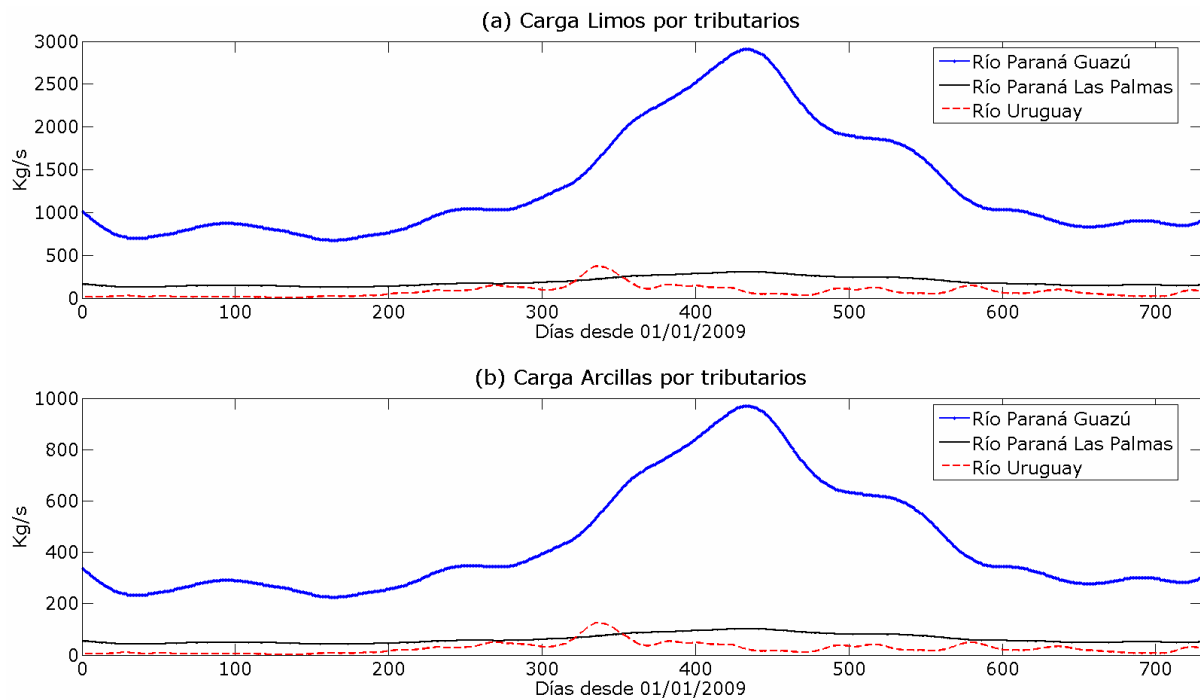


Figura 4.1: Variación temporal de la carga de (a) limos y (b) arcillas, de los ríos Paraná Guazú, Las Palmas y Uruguay, ingresadas al modelo para el período de simulación 2009-2010.

4.2.2.2. Condición inicial del sedimento de fondo

Para representar en el modelo la interacción de la dinámica en la columna de agua con el sedimento de fondo que ocurre en la realidad es necesario incluir en el mismo las características del sedimento de fondo en toda el área de estudio como condición inicial. El fondo ingresado sufrirá modificaciones a medida que se desarrolle la interacción con el sedimento en suspensión mediante los procesos de erosión y deposición. Se establece en el modelo una discretización vertical del sedimento de fondo que permita representar las variaciones del mismo y su interacción con la dinámica en la columna de agua. En concreto la información relevante consiste en la composición del material de fondo (en porcentajes de las fracciones consideradas arena fina, limo y arcilla), altura del depósito (lo que determina la disponibilidad de sedimento en zonas de erosión) y la concentración del sedimento.

Para los test preliminares exploratorios del funcionamiento del modelo se definieron estructuras de fondo simples (no reales) de composición uniforme en todo el Río de la Plata, específicos de cada análisis. No obstante para las simulaciones completas realizadas en este trabajo se toma como condición inicial de la composición de fondo la información histórica presentada en la denominada carta de Laborde (Wells and Daborn, 1998) que cubre gran parte del Río de la Plata. Dicha carta diferencia 9 zonas diferentes en el Río de la Plata que corresponden a una determinada composición de material de fondo (ver Figura 4.2). En el marco del Proyecto FREPLATA-FFEM (FREPLATA, 2011) se definieron los porcentajes de los distintos tipos de sedimento considerados (arena, limo y arcilla) asociados a cada clasificación. Para representar la carta en el modelo se especifica un código en cada celda que corresponde a una determinada composición. En la Figura 4.3 se presenta la composición del fondo inicial ingresada al modelo como composición de Laborde y en la Tabla 4.2 las proporciones de cada código. Se utiliza la misma variable para la arena fluvial que de fondo, denominada MESsable, pero se diferencian los finos que provienen inicialmente del fondo, denominados SILTfond y CLAYfond, para el limo y arcilla de fondo, respectivamente. La composición inicial de las variables MESsilt y MESclay en el fondo, correspondientes al limo y arcilla que ingresa en suspensión por los tributarios, es nula.

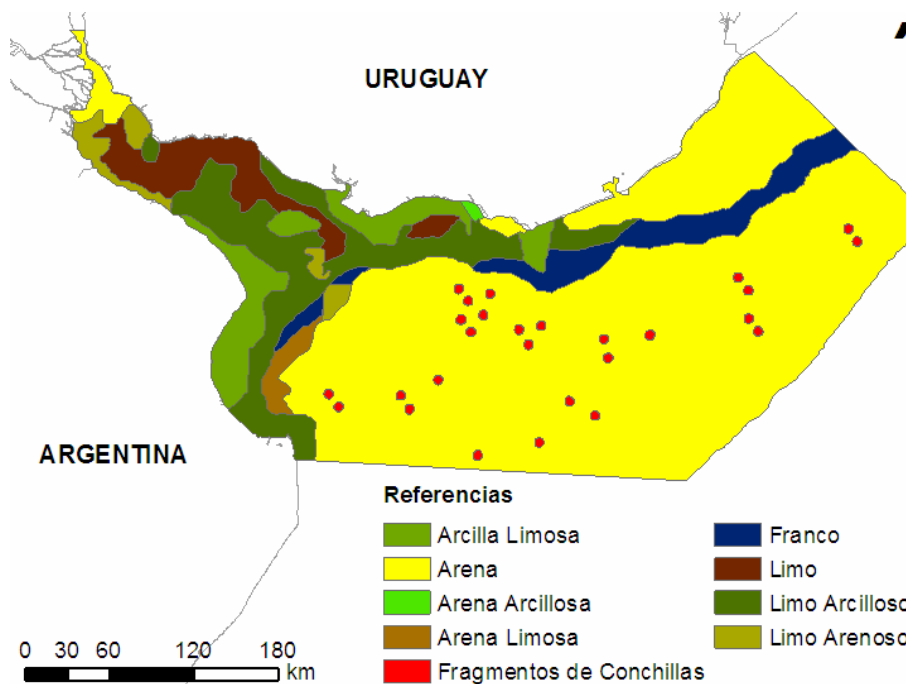


Figura 4.2: Composición del material de fondo del Río de la Plata según Laborde (Wells and Daborn, 1998); extraído de INA (2009).

En las zonas donde hay material fino de fondo inicialmente según la carta de Laborde utilizada (todos los códigos salvo 1 que corresponde sólo a arena) se define una altura de depósito inicial de 1 m. En las restantes zonas se define un depósito de sedimento inicial de espesor nulo. Esto significa que solamente es relevante la composición inicial del sedimento de fondo establecida en las zonas de códigos 2 a 6, 9 y 10. Con esta configuración inicial, en la cual se establece un gran espesor de sedimento de fondo, se busca no limitar la erosión en caso de que el modelo así lo establezca y garantizar que siempre haya sedimento disponible para evitar inestabilidades. Se establece como concentración de todo el sedimento de fondo (inicial y depositado), un valor igual a 400 kg/m^3 constante durante todas las simulaciones.

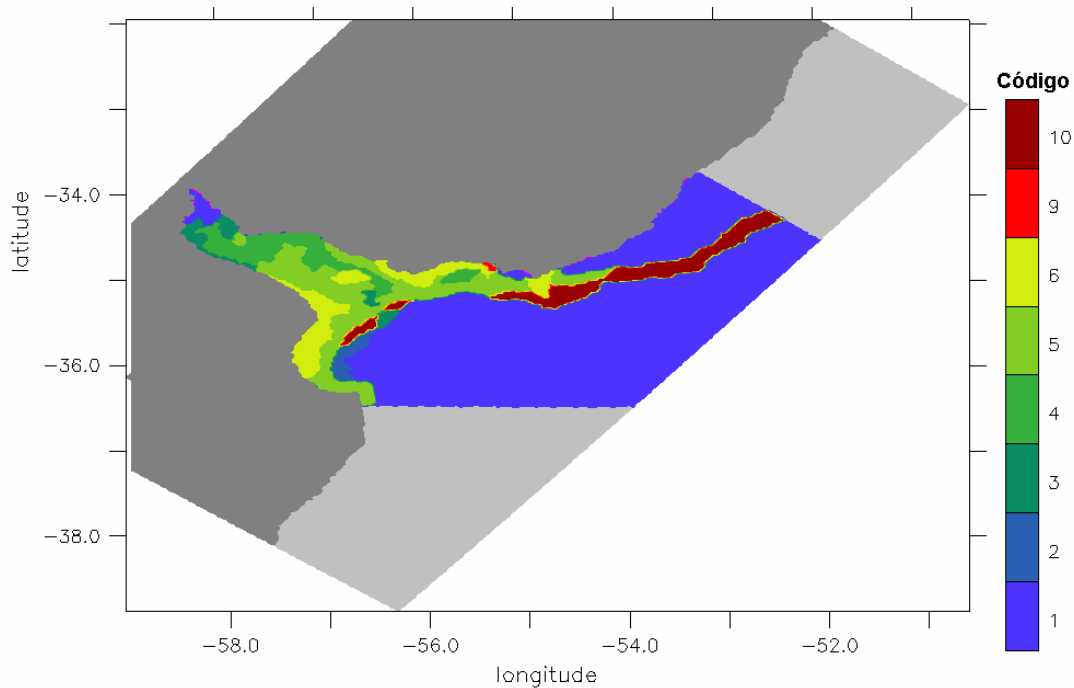


Figura 4.3: Representación del mapa de Laborde de composición de sedimento de fondo en la condición inicial del modelo de sedimentos finos.

Composición	Altura del depósito inicial (m)	Código	Fracción de cada material (%) respecto al 100%		
			MESsable	SiltFOND	ClayFOND
Arena	0	1	100	0	0
Arena Limosa	1	2	60	40	0
Limo Arenoso	1	3	30	60	10
Limo	1	4	5	85	10
Limo Arcilloso	1	5	10	65	25
Arcilla limosa	1	6	0	40	60
Arena Arcillosa	1	9	60	10	30
Suelo Franco	1	10	33	33	34

Tabla 4.2: Proporciones de cada tipo de sedimento según los códigos utilizados en el mapa de Laborde de composición de sedimento de fondo en el modelo.

Respecto a la discretización vertical se definen dos capas para el sedimento de fondo. La capa 1 corresponde al sedimento inicial y la capa 2 se corresponde con el sedimento depositado durante el desarrollo de las simulaciones, lo que se corresponde entonces con depósitos “nuevos”. Estos depósitos pueden formarse por deposición de cualquiera de las cuatro variables de sedimentos finos definidos en el modelo, MESsilt, MESclay, SILTfond o CLAYfond, y la concentración relativa de cada uno en cada celda es proporcional a la altura de depósito calculada en función de la concentración de material en suspensión depositado y el tamaño de celda, manteniendo la concentración total igual a 400 kg/m^3 . Esta configuración inicial del sedimento de fondo se denomina de aquí en adelante fondo Laborde.

Se realizó una comparación entre la información histórica de la denominada carta de Laborde y la nueva información de la composición de fondo recolectada en el marco del Proyecto FREPLATA-FFEM, presentada en el Capítulo 2. A pesar de que en términos generales ambas bases de datos son consistentes, en algunas zonas se observan algunas diferencias. En el Anexo C.1 se presenta un análisis y discusión al respecto.

4.2.2.3. Período previo

Se implementó el modelo sedimentológico en el dominio rank1 para representar la dinámica del período 2009-2010 (enero 2009 a diciembre 2010), para el cual se cuenta con la mayor información disponible vinculada a los sedimentos finos (ver Capítulo 2). Para esto es necesario realizar la simulación de un período previo en el rank1 para establecer condiciones estables a partir de las cuales se simula el período de interés específicamente. Por un lado se debe inicializar el modelo hidrodinámico y por otro lado se debe inicializar el modelo de sedimentos finos. Para el modelo hidrodinámico se utilizan los parámetros obtenidos de la calibración y el modelo de sedimento se inicializa utilizando parámetros de referencia. Es necesario un período largo de varios meses para inicializar el campo de salinidad en el modelo hidrodinámico a partir de una condición inicial de agua dulce en todo el dominio. Por otro lado el campo de sedimentos se inicializa simulando varios meses considerando únicamente el aporte de sedimentos de los ríos que desembocan en el Río de la Plata sin considerar interacción con el fondo.

Se utiliza la simulación del período de tiempo comprendido entre el 1/1/2008 y el 31/8/2008 (8 meses completos) considerando solamente el modelo hidrodinámico a partir de una condición inicial de reposo y de salinidad alta igual a 33 ppm en todo el dominio. Se consideran todos los forzantes correspondientes al período, es decir, el caudal fluvial de los ríos Paraná Guazú, Paraná Las Palmas y Uruguay (valores medios diarios), los niveles reales provenientes de la simulación del rank0 del tipo MT, y el forzante atmosférico en el rank1 (vientos NCEP). A partir de los resultados obtenidos se simula el período previo sedimentológico durante los cuatro meses comprendidos entre el 1/9/2008 y el 1/1/2009. En el mismo se simula la dinámica de sedimentos finos solamente en la columna de agua, es decir, sin considerar la interacción con el fondo, partiendo de una condición inicial de concentración de sedimento en suspensión nula en todo el dominio. Los forzantes considerados son los mismos que el período previo anterior, agregando el ingreso de sedimento fino por los ríos. No se considera el efecto del oleaje en este período de tiempo.

De esta forma se cuenta a principios del año 2009 con un campo de salinidad y de concentración de sedimentos desarrollado en la columna de agua, que puede ser utilizado como condición de partida para todas las simulaciones. Las ventajas son por un lado la no inclusión de las transiciones iniciales en los análisis posteriores y por otro utilizar siempre el mismo punto de partida para todos los análisis, de forma de que la condición inicial no influya en los resultados. Aunque el modelo de sedimento muestra cierta deposición durante el período previo considerado y por tanto cierta evolución del sedimento de fondo, el mismo no es tomado en cuenta en las simulaciones siguientes sino que se parte del fondo inicial definido en la sección anterior.

4.2.3. Síntesis - Esquema general de las simulaciones

Como se desarrolla en la sección siguiente la estrategia utilizada para el desarrollo del modelo de sedimento fino consistió en la realización de diversos análisis de sensibilidad en base a diversos tipos de simulaciones. No obstante ello hay ciertas características generales que se mantienen en las simulaciones realizadas, las cuales constituyen lo que se denomina el esquema general de las simulaciones de la dinámica de sedimentos finos realizadas en este estudio, las cuales se presentaron en esta sección.

Se incluyen en el modelo sedimentológico los procesos básicos de la dinámica de sedimento fino, transporte, erosión y deposición. No se incluye el proceso de consolidación del sedimento de fondo. Se definen 3 tipos de sedimento diferentes, arenas, limos y arcillas. Para la arena se considera un valor de velocidad de caída elevado en relación a los materiales finos y como resultado las mismas depositan en la zona

inmediata a la desembocadura de los afluentes y no influyen en la dinámica general. Los dos materiales finos definidos se diferencian en la velocidad de caída. Se considera que el proceso de erosión no depende de la composición del material de fondo, lo que significa que los parámetros que lo representan, la tensión crítica de erosión y la tasa de erosión, son uniformes espacialmente y temporalmente en las simulaciones. El sedimento fino en el dominio de cálculo se diferencia según su origen inicial, el sedimento de fondo original y el sedimento que ingresa por los ríos, pero las características que definen a cada tipo son idénticas.

El modelo de sedimento fino se implementó en el dominio rank1 presentado en el Capítulo 3 y todas las simulaciones son forzadas por las ondas astronómicas y meteorológicas obtenidas previamente en el rank0. Se mantiene el esquema tridimensional definido utilizando 10 capas sigma en la dirección vertical. Se establece una condición de borde de concentración de sedimento nula en toda la columna de agua para flujos entrantes en la frontera oceánica (frontera con el rank0) y el ingreso de caudal y sedimento fino por las fronteras fluviales definidas (correspondientes a los ríos Paraná Guazú, Paraná Las Palmas, y Uruguay).

Se trabaja con los forzantes correspondientes al período de tiempo comprendido entre el 1/1/2009 y el 31/12/2010, es decir, dos años. Para las variables de la columna de agua (salinidad, campo de corrientes y concentración de sedimento en suspensión) se parte de la condición inicial descrita obtenida como resultado de la simulación del período previo que incluye todo el año 2008. Para las variables del sedimento de fondo (espesor, concentración y composición) se utiliza la condición inicial denominada fondo Laborde, salvo algunas excepciones que se indicarán oportunamente. Se utilizan valores constantes de concentración de sedimento de los aportes fluviales durante todas las simulaciones, los cuales se presentaron en la Tabla 4.1. Se utilizan valores diarios de caudal líquido de cada tributario definidos por el INA para el período de tiempo simulado. Esto determina que la carga de sedimento en suspensión que ingresa por los ríos al dominio de cálculo sea variable en el tiempo.

Desde el punto de vista computacional es importante mencionar las simulaciones fueron realizadas en los supercomputadores del IFREMER utilizando la versión V8.19 del modelo MARS. Para incrementar el tiempo de cálculo se utilizó la versión del modelo que incorpora paralelismo con MPI, utilizando 16 procesadores simultáneamente. Para esto se definió la división del dominio de cálculo (rank1) en 16 subdominios utilizando la herramienta específica desarrollada para esto en IFREMER (decouple.F90) y se realizaron los correspondientes testeos del correcto funcionamiento del modelo implementado bajo la modalidad de paralelismo MPI con la versión V8.19 del MARS.

4.3. ANÁLISIS PRELIMINARES

4.3.1. Simulación sin interacción con el fondo

Con el objetivo de utilizar el modelo como herramienta para comprender los principales procesos sedimentológicos en el Río de la Plata se definió una primera simulación simplificada en la cual solamente se calcula la deposición del material en suspensión ingresado por los aportes fluviales. Esto significa que no se considera la erosión del material de fondo, lo cual se impone en el modelo a través de un valor elevado de tensión crítica de erosión. El objetivo es identificar las principales zonas de deposición del material que ingresa a través de los ríos. Se realiza esta simulación sin considerar el efecto del oleaje y sin considerar un fondo inicial, ya que se realiza una exploración preliminar del fondo generado por el aporte fluvial. Se simula el año 2009 completo y se parte del período inicial definido anteriormente. Se utilizan parámetros de base de

velocidad de caída de limo y de arcilla. Para el limo se utiliza una velocidad de caída constante igual a 0,1 mm/s y para la arcilla la ley de velocidad de caída en función de la concentración dada por $(W_{s\min}; W_{s\max}; C_{\max}) = (0,05 \text{ mm/s}; 1,5 \text{ mm/s}; 2000 \text{ mg/l})$.

En la Figura 4.4 se presenta el espesor del fondo formado por la deposición del material que ingresa durante un año por los ríos Paraná Guazú, Paraná Las Palmas y Uruguay. Se observa el fondo generado cubre la zona interior del Río de la Plata, alcanzando solamente la parte superior de la zona intermedia. Se observa un gradiente en el espesor con mayores valores en la zona de descarga fluvial y una disminución hacia el Río de la Plata. La extensión de la pluma de sedimento en suspensión durante el período analizado es acotada a la zona interior con variaciones según la marea representada en el modelo. En la zona intermedia y exterior los valores de concentración de sedimento en suspensión son prácticamente nulos.

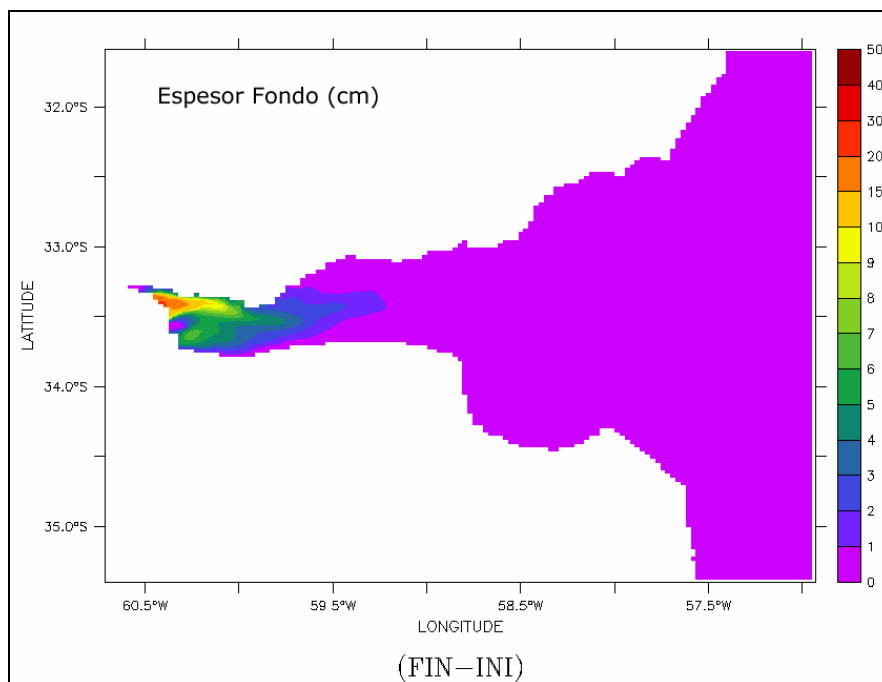


Figura 4.4: Espesor del fondo (cm) generado durante 1 año de la simulación simplificada considerando solamente el ingreso de sedimento fluvial y deposición.

Esta simulación simplificada del modelo en la cual no se incluye el proceso de erosión del sedimento de fondo no es capaz de representar la extensión observada de la pluma de sedimentos finos en el Río de la Plata, la cual alcanza habitualmente la zona de Barra del Indio en el límite entre la zona intermedia y exterior del mismo. Este resultado preliminar indicaría que los procesos de resuspensión son dominantes en la dinámica de sedimentos finos del Río de la Plata.

4.3.2. Influencia de la condición inicial de la composición del sedimento de fondo

Con el objetivo de analizar la influencia de la composición del sedimento de fondo se realizaron dos simulaciones simplificadas considerando diferentes opciones de sedimento de fondo. En primer lugar se considera un fondo formado por limo (70%) y arcilla (30%), de distribución homogénea en todo el Río de la Plata. En segundo lugar se considera la composición no homogénea de fondo según la carta de Laborde, descrita anteriormente, que representa las características principales del mismo en el Río de la Plata. En ambos casos las variables de fondo se denominan SILTfond y CLAYfond, siendo las componentes del sedimento que ingresa por aporte fluvial MESsilt y MESclay.

Ambas simulaciones se realizaron considerando solamente como forzante las corrientes de marea, es decir, no se incluye el efecto de las tensiones de corte del oleaje. Dichas tensiones se calculan utilizando el parámetro de rugosidad hidráulica de fondo definido inicialmente (ver Capítulo 3), $z_{0sed}=3,5$ mm. En ambos casos se simula un período de un año correspondiente al año 2009 y se considera un espesor de fondo igual a 1m. Se seleccionan parámetros de erosión $\tau_{ce}=1$ N/m² y $E_0=0,00001$ kg/m²s. Los resultados obtenidos se evalúan comparativamente analizando la variación en la composición final del sedimento de fondo luego de un año de simulación.

Al incluir en las simulaciones el efecto de la erosión del material de fondo por las corrientes de marea se observa que durante el año simulado que ciertas zonas son predominantemente erosionadas y en otras zonas tiende a acumularse el sedimento. Las mismas están asociadas directamente con la distribución espacial de las tensiones de corte de fondo de las corrientes. Las zonas de erosión se observan sobre la parte interior en la descarga fluvial y en la zona intermedia sobre la costa argentina. Las zonas de deposición predominante se encuentran en la zona intermedia del Río de la Plata sobre la costa uruguaya, en la zona de Barra del Indio y en la zona exterior cercana, incluyendo Samborombón y la costa uruguaya. En la Figura 4.5 se presenta el espesor del sedimento de fondo obtenido luego de un año de simulación para las dos simulaciones con distinta composición de sedimento de fondo inicial. Comparando los resultados con el espesor inicial de 100 cm se identifican las zonas erosionadas y las zonas donde hay acumulación de sedimento, mencionadas previamente. Se observa que en ambas simulaciones la distribución espacial de dichas zonas es la misma ya que el forzante considerado es igual en ambas simulaciones. Las diferencias se observan en la magnitud del espesor de fondo obtenido, siendo mayor la acumulación en la simulación con fondo inicial de distribución homogénea de limo y arcilla. Esto se debe a que en la carta de Laborde parte del sedimento de fondo esta formado por arenas, principalmente en la zona interior, y por tanto hay menos sedimento fino disponible a ser erosionado en este caso que respecto a la otra composición de fondo inicial.

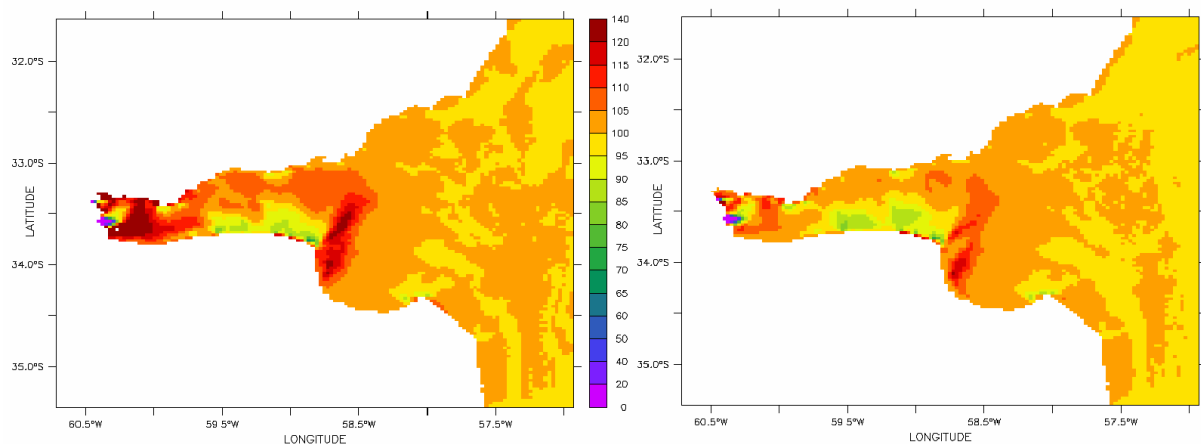


Figura 4.5: Espesor del fondo (cm) obtenido luego de un año para la simulación con distribución de fondo inicial homogénea 70% SiltFOND y 30% ClayFOND (panel izquierdo) y con distribución de fondo inicial según la carta de Laborde (panel derecho).

En las Figuras 4.6 y 4.7 se presenta el porcentaje asociado a la composición de fondo de cada material incluido inicialmente en el fondo (SiltFOND y ClayFOND) para las simulaciones simplificadas con fondo inicial mixto homogéneo y según la distribución de Laborde, respectivamente. Para el caso del limo originado en el fondo (SiltFOND), se observa una acumulación en gran parte del Río de la Plata con mayores porcentajes en la

zona de la Bahía de Samborombón para ambos casos. Las mayores diferencias en este caso se observan en el porcentaje de dicho material obtenido en la zona interior, siendo casi nulo en el caso del fondo Laborde. Esto se debe a la poca disponibilidad de dicho material en dicha zona en el caso del fondo Laborde, donde predominan las arenas. Lo mismo se observa para el caso de la arcilla con origen en el fondo (ClayFOND), que no se encuentra en la zona interior en el caso del fondo Laborde y sí se encuentra en el fondo ficticio de distribución homogénea.

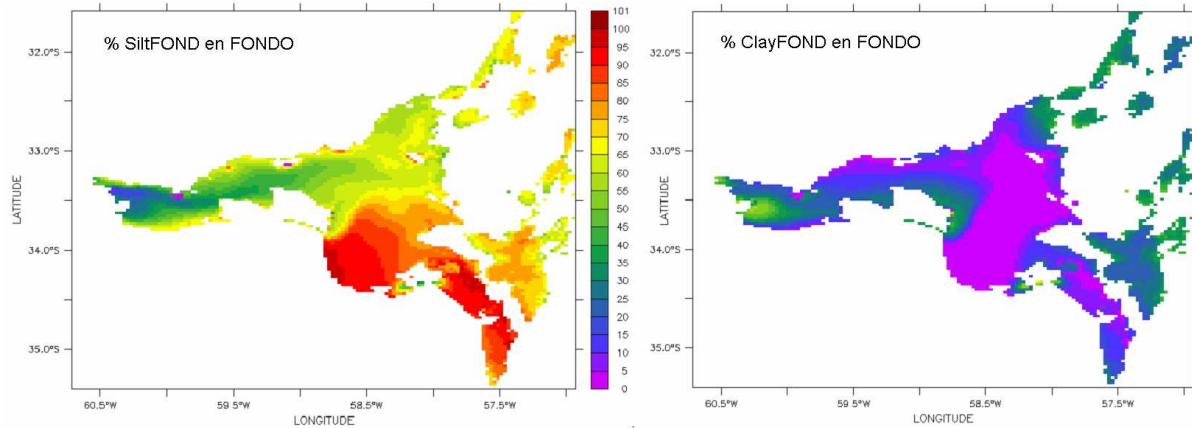


Figura 4.6: Composición del material de fondo (%), de las 2 variables de sedimento fino de fondo consideradas, obtenida luego de un año para la simulación con distribución de fondo inicial homogénea 70% SILTfond y 30% CLAYfond.

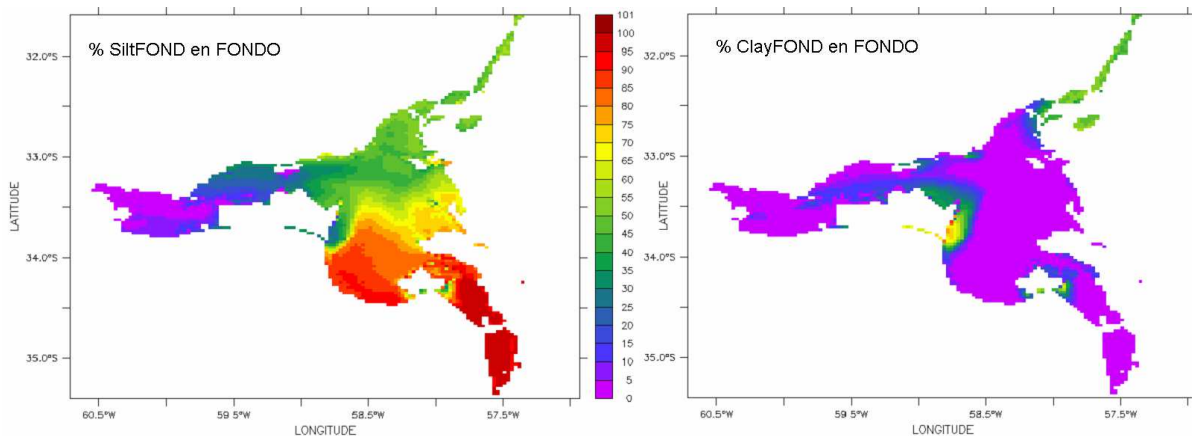


Figura 4.7: Composición del material de fondo (%), de las 2 variables de sedimento fino de fondo consideradas, obtenida luego de un año para la simulación con distribución de fondo inicial según la carta de Laborde.

Estos resultados preliminares muestran la influencia de la distribución inicial del material de fondo incluido en el modelo en los resultados posteriores. El proceso de resuspensión de material de fondo tiene una gran influencia en la dinámica en el Río de la Plata y por tanto la composición de fondo en cada celda del dominio es relevante pues determina el tipo de material resuspendido. Se desprende entonces la importancia de incluir en el modelo información lo más realista posible, como por ejemplo la información histórica incluida en la información de la carta de Laborde.

4.3.3. Síntesis

Se definieron simulaciones iniciales con el objetivo de comprender aspectos generales de la dinámica de sedimento fino, por un lado determinar la influencia espacial

de las plumas de sedimento fino descargada por los aportes fluviales y por otro analizar la influencia del material de fondo sobre la dinámica general. Por otra parte estas primeras simulaciones sirvieron para ajustar aspectos vinculados al pre y post procesamiento de la información del modelo, además del ajuste y corrección de aspectos del uso del modelo MARS.

La simulación de un año de período considerando sólo la deposición permite determinar preliminarmente qué sucede con el sedimento en suspensión aportado por los tributarios al Río de la Plata. Se observó que prácticamente el material deposita en la zona interior e intermedia superior, en función de la ubicación de la pluma de los ríos, la cual varía con de la hidrodinámica del sistema. Se obtienen valores de concentración bajos en dicha zona y prácticamente nulos en la zona exterior. Esto muestra que el aporte principal en la dinámica (a nivel de concentración en suspensión y a nivel de deposición) en el Río de la Plata es el aporte del fondo. Esto es muy importante para tener en cuenta durante el ajuste y calibración del modelo. Los resultados muestran que la zona interior e intermedia superior sería una zona de deposición del sedimento en suspensión que ingresa desde los ríos. Probablemente esta zona sea erosionada en ciertos eventos, poniendo a disposición dicho material nuevamente en la columna de agua, y que por tanto estarán sujetos a la dinámica de transporte de sedimentos finos nuevamente. Las simulaciones posteriores muestran la gran influencia de la resuspensión del material de fondo en los resultados obtenidos en todo el Río de la Plata, lo que resalta la importancia de ingresar en el modelo información real del mismo.

4.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS DIFERENTES PROCESOS DE LA DINÁMICA DE SEDIMENTO

4.4.1. Casos analizados

Como punto de partida del proceso de ajuste del modelo de sedimentos finos se parte de una configuración denominada de base (ParGlobal) obtenida luego de un ajuste inicial preliminar de los parámetros. Se realizó la simulación de todo el período 2009-2010, partiendo de una configuración de fondo completa dada por la carta de Laborde y el período inicial definido anteriormente, para tener resultados de referencia. En el Anexo C.2.1 se presenta la comparación de los resultados del modelo con los datos para el período de julio y agosto 2010. Básicamente se representa el orden de concentración de sedimento en suspensión que muestran los datos pero la variabilidad temporal durante los eventos de marea y de tormenta no se representa correctamente.

Para iniciar el ajuste del modelo se definieron inicialmente dos familias de procesos que se estudiaron en detalle en base a simulaciones y comparación de resultados: erosión (F1) y caída o sedimentación (F2). La primera familia comprende parámetros como tensión crítica de erosión, deposición y tasa de resuspensión. La segunda familia comprende formulaciones y parámetros vinculados a la velocidad de caída de las dos variables de finos consideradas, limo y arcilla. Se analizaron también efectos conjuntos vinculados a erosión y velocidad de caída, mencionados como configuraciones tipo F1F2. En la Tabla 4.3 se presentan los parámetros definidos para las distintas simulaciones realizadas en esta etapa así como también los parámetros de la configuración de referencia ParGlobal.

Se definieron dos simulaciones modificando parámetros de erosión. En la simulación F1tc1e1 se impuso una tensión crítica de erosión alta igual a $0,5 \text{ N/m}^2$ y un valor de flujo de resuspensión $E_0=1 \times 10^{-05} \text{ Kg/m}^2\text{s}$; se simulan julio y agosto 2010. En la simulación F1tc1e2 se impuso una tensión crítica de erosión alta igual a $0,5 \text{ N/m}^2$ y un

valor de flujo de resuspensión $E_0=1 \times 10^{-4}$ Kg/m²s (un poco mayor al de la simulación F1tc1e1); se simula agosto 2010.

Simulación	Ws (mm/s y mg/l)			Erosión		Deposición
	Ws limo	Ws arcilla	Efecto G	τ_{oe} (N/m ²)	E_0 (kg/m ² s)	τ_{cd} (N/m ²)
ParGlobal	0,1 constante	ley orig [0,05; 1,5; 2000]	si	0,1	1×10^{-06}	0,1
F1tc1e1	0,1 constante	ley orig [0,05; 1,5; 2000]	si	0,5	1×10^{-05}	0,5
F1tc1e2	0,1 constante	ley orig [0,05; 1,5; 2000]	si	0,5	1×10^{-04}	0,5
F2PGsG	0,1 constante	ley orig [0,05; 1,5; 2000]	no	0,1	1×10^{-06}	0,1
F2sGWsvar	ley orig [0,05; 1,5; 2000]	ley orig [0,05; 1,5; 2000]	no	0,1	1×10^{-06}	0,1
F2sGWs1	0,2 constante	ley orig [0,05; 1,5; 2000]	no	0,1	1×10^{-06}	0,1
F1F2sGtc2e3Ws2	1,0 constante	ley orig [0,05; 1,5; 2000]	no	0,05	5×10^{-05}	0,05
F1F2sGtc2e0Ws1	0,2 constante	ley orig [0,05; 1,5; 2000]	no	0,05	1×10^{-06}	0,05
F1F2sGtc3e4Ws1	0,2 constante	ley orig [0,05; 1,5; 2000]	no	0,21	6×10^{-06}	0,21
F1F2sGtc3e5Ws1	0,2 constante	ley orig [0,05; 1,5; 2000]	no	0,21	$1,3 \times 10^{-05}$	0,21

Tabla 4.3: Parámetros principales de la configuración de base inicial y de las simulaciones de las familias F1 y F2 realizadas durante el ajuste por procesos.

En la familia F2 vinculada con la velocidad de caída se analizaron 3 variaciones diferentes respecto a la configuración de base. La idea de este punto es analizar la variación de resultados al utilizar diferentes leyes de velocidad de caída. El estudiar Ws comprende dos componentes: Ws limo y Ws arcilla. En la simulación F2PGsG se elimina el efecto de la turbulencia G sobre la velocidad de caída para todas las variables; se simulan julio y agosto 2010. En la simulación F2sGWsvar se impone velocidad de caída variable con la concentración para el limo además de para la arcilla utilizando la misma ley; se simulan julio y agosto 2010. En la simulación F2sGWs1 se utiliza Ws constante para el limo igual a 0,2 mm/s (valor un poco mayor al utilizado en la configuración de referencia ParGlobal); se simula julio 2010.

Considerando los primeros resultados obtenidos de los análisis de sensibilidad a los parámetros de erosión (F1) y a la velocidad de caída (F2) surgieron 4 simulaciones combinadas. En la simulación F1F2sGtc2e3Ws2 no se considera el efecto de turbulencia en la velocidad de caída, y se impone una tensión de corte crítica a la erosión muy baja, 0,05 N/m², y tasa intermedia, $E_0=5 \times 10^{-5}$ Kg/m²s. En contraposición se impone una alta velocidad de caída para limo, igual a 1 mm/s. Es un modelo del tipo erosión fuerte y caída fuerte; se simulan julio y agosto 2010. En la simulación F1F2sGtc2e0Ws1 no se considera el efecto de turbulencia en la velocidad de caída; se impone una tensión de corte crítica a la erosión muy baja, 0,05 N/m², y tasa intermedia, $E_0=1 \times 10^{-6}$ Kg/m²s, y una velocidad de caída para el limo constante igual a 0,2 mm/s. Es un modelo del tipo erosión fuerte y caída media a leve; se simula julio 2010. En la simulación F1F2sGtc3e4Ws1 se ajustan las características de la erosión respecto a la configuración anterior. No se considera el efecto de turbulencia en la velocidad de caída; se impone una tensión de corte crítica a la erosión intermedia, 0,21 N/m², con una tasa de resuspensión intermedia, $E_0=6 \times 10^{-6}$ Kg/m²s, y una velocidad de caída para el limo constante igual a 0,2 mm/s; se simula julio de 2010. Por último en F1F2sGtc3e5Ws1 se continúa con el ajuste de las características de la erosión de la configuración anterior; no se considera el efecto de turbulencia en la velocidad de caída; se impone una tensión de corte crítica a la erosión intermedia, 0,21 N/m², con una tasa de resuspensión intermedia, $E_0=1,3 \times 10^{-5}$ Kg/m²s, y una velocidad de caída para el limo constante igual a 0,2 mm/s; se simulan julio y agosto 2010.

El análisis de los resultados se realiza principalmente a través del análisis de las variables simuladas en los puntos de control de las estaciones fijas Boya, Torre Oyarvide

y Pilote Norden, las cuales representan las dinámicas de las diversas zonas del Río de la Plata, y para las cuales se cuenta con mediciones continuas de turbidez durante el período simulado. Es importante recordar no fue posible realizar una calibración indirecta de las medidas de turbidez en Pilote Norden y Boya Oceanografica, por lo que solamente se cuenta con información en unidades de concentración en Torre Oyarvide (ver Capítulo 2). Esto significa que la comparación entre los resultados del modelo y las series medidas se realiza en términos de variabilidad temporal en las dos primeras estaciones mencionadas, siendo solamente posible la comparación cuantitativa en Torre.

4.4.2. Resultados obtenidos

4.4.2.1. F1 - erosión

La comparación de los resultados de la simulación F1tc1e1 con la configuración de base (parámetros globales), permite identificar como repercuten concretamente los cambios en los procesos simulados (incremento de las tensiones de corte y disminución de la tasa de erosión) en las curvas de sedimento en suspensión obtenidas con el modelo en las estaciones monitoreadas. En términos generales el principal efecto es una disminución considerable de la concentración en suspensión de las variables de sedimento fino en todo el dominio de cálculo, debido a la limitación en la erosión impuesta en la simulación F1tc1e1. En la Figura 4.8 se presenta la comparación de las series de concentración de los distintos tipos de sedimentos finos considerados obtenidas con ambas simulaciones.

En Pilote Norden (PN) se observa que el incremento de la tensión crítica de erosión genera no haya sedimento en suspensión SILTfond y CLAYfond permanentemente como se obtuvo con la configuración ParGlobal. La variable MESSilt en cambio presenta valores bajos de concentración permanente lo que indicaría se deben al transporte principalmente. Durante el evento fuerte de tormenta del mes se reproduce en general la misma variación temporal de concentración con valores menores en F1tc1e1, en todas las variables. En Torre Oyarvide (TO) a pesar de la alta tensión crítica de erosión el modelo muestra valores no nulos de concentración (SILTfond que predomina en la zona) ya que las tensiones de corte de marea son elevadas. No obstante la variabilidad de las curvas de concentración entre ambas simulaciones es muy diferente. Solamente durante el pico de concentración generado por la fuerte erosión durante la tormenta el comportamiento es similar. Por último en la Boya se observan diferencias importantes entre ambas simulaciones. Por un lado el gran incremento de concentración observado en la configuración ParGlobal (no relacionado directamente con eventos de incremento de la tensión de corte de fondo) no se observa en la simulación F1tc1e1. Esto significa probablemente dicho incremento de concentración en la Boya fuera generado por el transporte de sedimento (predominantemente limo) resuspendido en otra zona. Por otro lado, en el segundo evento de mayor concentración del mes, coincidente con fuertes tensiones de corte de fondo, se observa una mayor rapidez en la disminución de concentración en la simulación F1e1tc1 en relación a ParGlobal.

Al comparar los resultados obtenidos con la simulación F1tc1e2 respecto a la simulación F1tc1e1 se observa el efecto del incremento de la tasa de erosión E_0 . El efecto sobre los resultados del cambio en el parámetro realizado es muy grande. Básicamente para el caso F1tc1e2 el modelo muestran una gran resuspensión de sedimento de fondo durante los eventos de tormenta del mes simulado y una posterior permanencia de grandes concentraciones post evento. Durante los períodos de marea (sin tormenta) los resultados de ambas simulaciones son muy similares en concentración de sedimento en suspensión en los 3 puntos de control, mientras que durante el evento las concentraciones se incrementan en un factor 10. Se observa un comportamiento diferente en las series temporales de concentración del sedimento tipo limo (silt) en el período post

evento debido a la influencia de la concentración en la velocidad de caída, y por tanto ocurre más rápido el descenso de concentración para la simulación F1tc1e2 en relación a F1tc1e1.

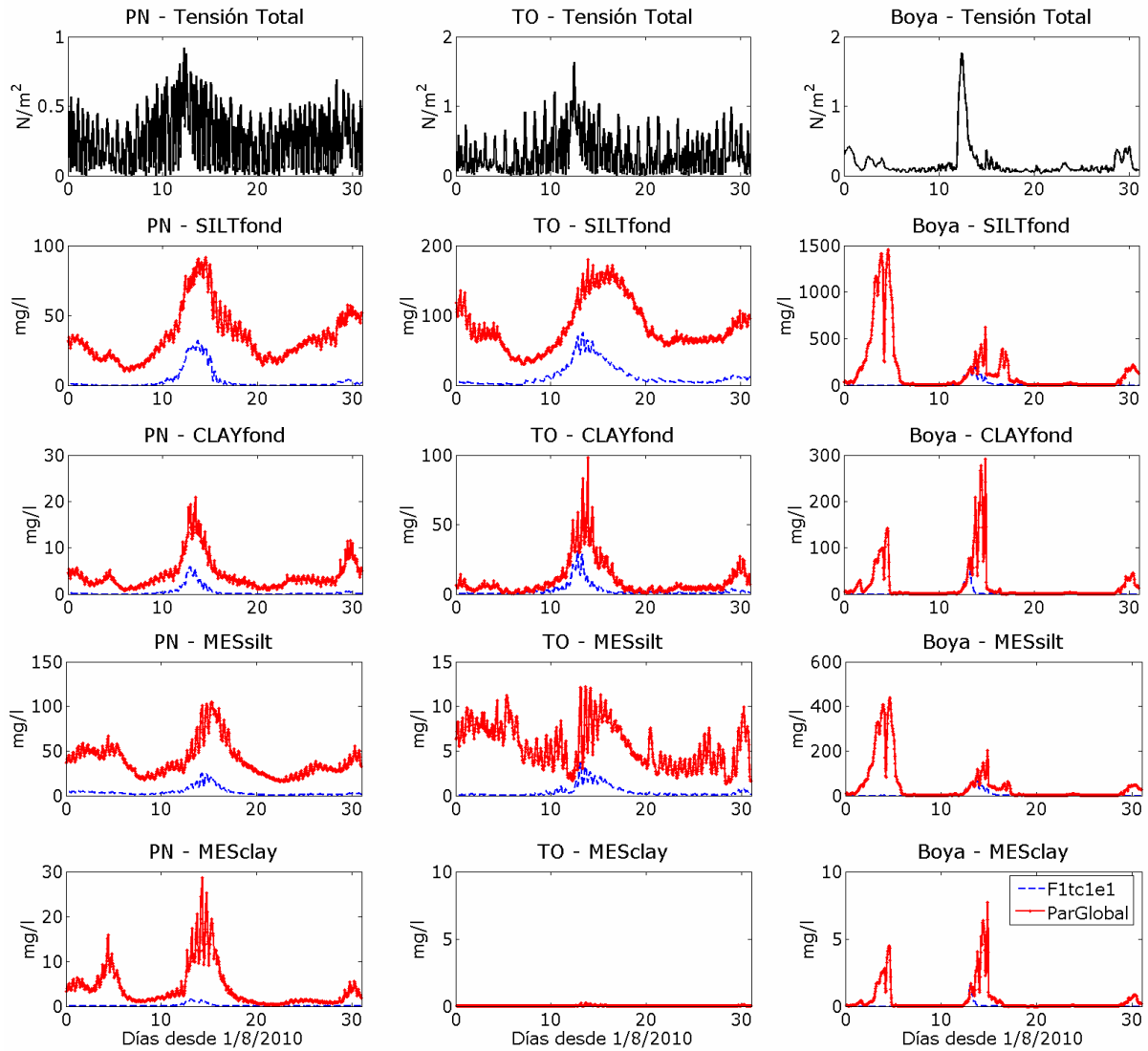


Figura 4.8: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión (SILTfond, CLAYfond, MESsilt y MESclay) obtenida en la capa de fondo en Pilote Norden (paneles izquierdos), Torre Oyarvide (paneles centrales) y en la Boya oceanográfica (paneles derechos) para las simulaciones ParGlobal y F1tc1e1. Se agrega la tensión de corte de fondo como referencia. Agosto 2010.

Ciertos cambios generados por la simulación F1tc1e1 mejoran la representación de los datos de turbidez medidos y otros no (ver Anexo C.2.2). Por un lado las bajas concentraciones en Pilote Norden y en Torre Oyarvide durante períodos de marea (sin tormentas) no son coincidentes con los datos. En cambio la eliminación de ciertos eventos de mayor concentración en la boya, que fueran generados por el transporte de sedimento erosionado en otras zonas, es coincidente con lo que muestran los datos que en general responden directamente a las tensiones de corte de fondo como se obtiene en la simulación F1tc1e1. Por otro lado, la simulación F1tc1e2 durante los eventos genera una gran resuspension que no reproduce la variabilidad observada en las series medidas (ver Anexo C.2.2).

En la Figura 4.9 se muestra a modo de ejemplo la comparación de los campos de concentración de sedimento fino promedio temporal (agosto 2010) obtenidos en superficie y en fondo para las simulaciones de la familia F1 y de la configuración de referencia. Se observan claramente los efectos mencionados anteriormente. El incremento de la tensión crítica de fondo definida para F1tc1e1 genera que no haya sedimento en suspensión permanente en la zona interior e intermedia del Río de la Plata. El incremento en la tasa de erosión definido en F1tc1e2 genera fuertes valores de resuspension durante los eventos solamente y una distribución espacial de concentración homogénea entre superficie y fondo, diferente a la que se obtiene en el caso ParGlobal.

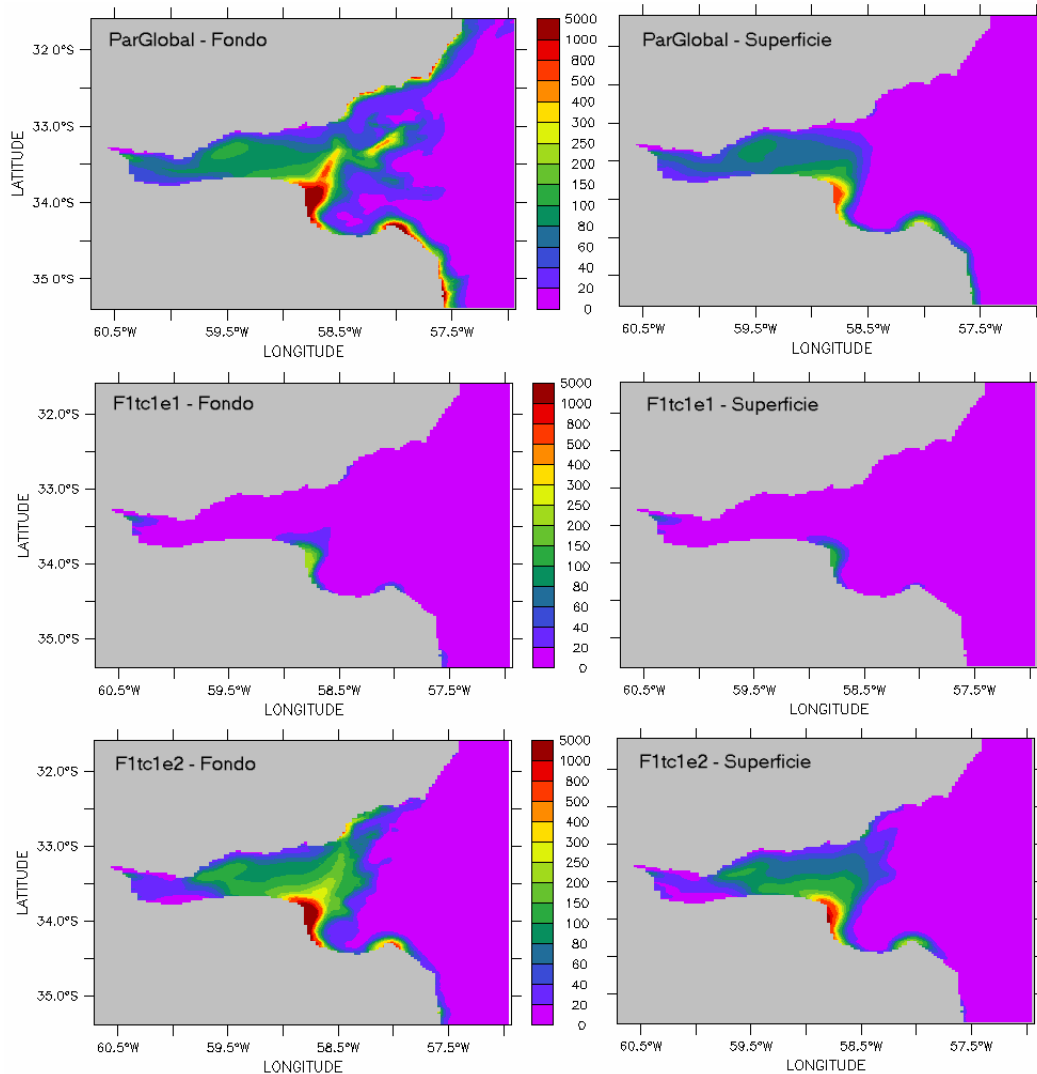


Figura 4.9: Distribución espacial promedio durante agosto 2010 de la concentración de sedimento fino total obtenida con el modelo en fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) en la simulación de referencia ParGlobal (paneles superiores), y en las simulaciones F1tc1e1 (paneles intermedios) y F1tc1e2 (paneles inferiores).

4.4.2.2. F2 - velocidad de caída

Comparando los resultados obtenidos en la simulación F2PGsG con la configuración de referencia ParGlobal es posible determinar la influencia de considerar el efecto de la turbulencia (mediante el parámetro G) sobre la velocidad de caída de los finos. Las diferencias obtenidas entre las series de concentración de sedimento en suspensión en diversas zonas del dominio simulado son muy leves, lo que indica una baja

influencia. En general el efecto es que hay una muy leve disminución de la velocidad de caída en la simulación F2PGsG, es decir, sin considerar el efecto de la turbulencia. En los casos donde la turbulencia es importante su efecto sobre la velocidad de caída es una destrucción de los flocs y por tanto una disminución de la velocidad de caída de los mismos. Al comparar los campos medios mensuales de concentración de sedimento total en superficie y fondo en ambas simulaciones se obtuvieron campos casi idénticos. En consecuencia la comparación con las series de turbidez medidas (Anexo C.2.3) muestra iguales resultados que los obtenidos con ParGlobal.

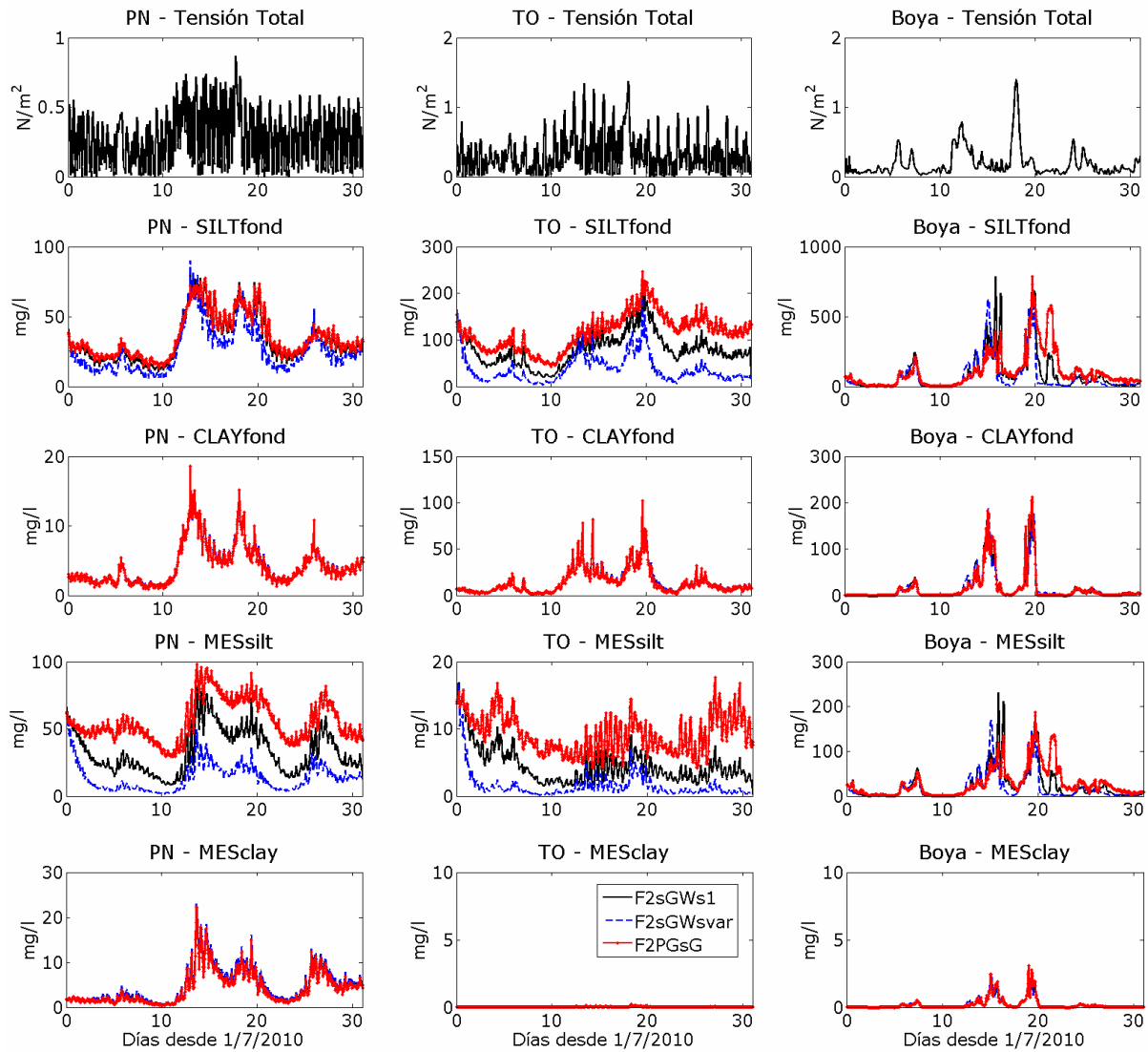


Figura 4.10: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión (SILTfond, CLAYfond, MESsilt y MESclay) obtenida en la capa de fondo en Pilote Norden (paneles izquierdos), Torre Oyarvide (paneles centrales) y en la Boya oceanográfica (paneles derechos) para las simulaciones F2PGsG, F2sGWsvar y F2sGWs1. Se agrega la tensión de corte de fondo como referencia. Julio 2010.

Al comparar los resultados de la simulación F2sGWsvar con los de la simulación F2PGsG se observa el efecto de considerar una ley variable de velocidad de caída para el limo respecto a considerar una velocidad constante igual a 0,1 mm/s (Figura 4.10). La relación entre la ley variable y el valor constante es tal que la W_s definida en F2sGWsvar es en general mayor a la velocidad fija considerada. En Pilote Norden se observa una gran variación en la concentración de MESsilt con valores menores respecto

a F2PGsG y una disminución más rápida de la misma luego de los eventos. En Torre Oyarvide se observa un efecto similar para la variable de limo dominante en la zona (SILTfond); las concentraciones son menores pero la variabilidad general de las series es similar. En la Boya (zona exterior) los cambios son más complejos, con concentraciones mayores en algún caso y menores en otro. El primer caso no se relaciona con evento de resuspensión, y el incremento de concentración en la capa de fondo se debe probablemente a una mayor acumulación de sedimento en dicha zona por mayor velocidad de caída. En el segundo caso el incremento de concentración se debe a un evento de resuspensión por fuerte tensión de corte de fondo y al aumentar la velocidad de caída disminuye el pico de concentración obtenido. La comparación del campo medio mensual (Figura 4.11) muestra una disminución de la concentración media en toda la zona interior e intermedia, tanto en fondo como en superficie, respecto a la simulación con velocidad de caída constante. La comparación con las series de turbidez medidas (ver Anexo C.2.3) muestra que el modelo reproduce en general concentraciones en Torre menores a las medidas y una variabilidad temporal distinta en las tres estaciones.

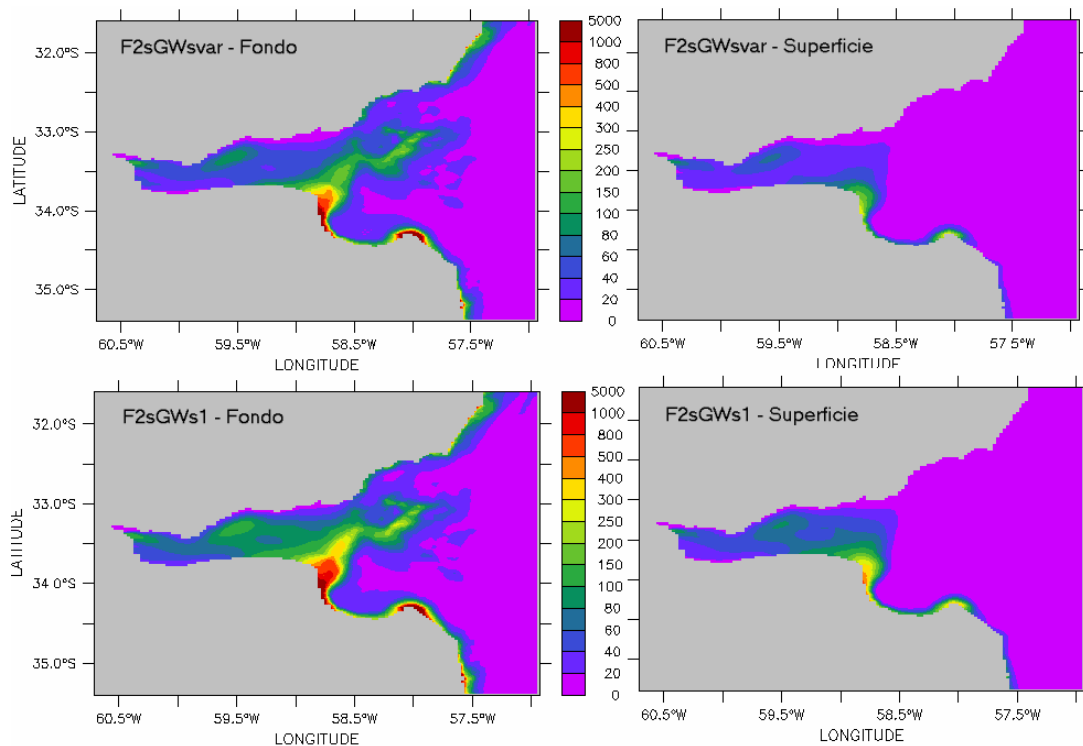


Figura 4.11: Distribución espacial promedio durante julio 2010 de la concentración de sedimento fino total obtenida con el modelo en fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) en la simulación F2sGWsvar (paneles superiores) y F2sGWs1 (paneles inferiores).

Se compararon (Figura 4.10) las curvas de variación de concentración de sedimento en suspensión obtenidas considerando una velocidad de caída W_s constante igual a 0,2 mm/s para la arcilla (F2sGWs1) e igual a 0,1 mm/s constante (F2PGsG). Se observa en general un gran efecto sobre los resultados, principalmente en la zona interior e intermedia del Río de la Plata. En Pilote Norden se observa en la variable MESsilt hay una disminución en la concentración prácticamente a la mitad al aumentar la velocidad de caída. La variación temporal entre ambas series es muy similar. En Torre Oyarvide se observan en las variables MESsilt y SILTfond una gran disminución en la concentración. En la Boya se observa que durante períodos de concentraciones bajas hay una disminución al aumentar la velocidad de caída, pero no se observan diferencias en los picos de concentración obtenidos durante los eventos.

Se calcularon perfiles medios mensuales y concentraciones medias mensuales (no presentados) en cada estación que resumen en líneas generales el comportamiento observado: las mayores concentraciones se obtienen para la velocidad de caída menor (constante igual a 0,1 mm/s), en segundo lugar con W_s un poco mayor y también constante (0,2 mm/s), y con la formulación variable (que representa mayores velocidades de caída) se obtienen concentraciones medias menores en todas las estaciones. Respecto a los perfiles verticales obtenidos en las estaciones se observa en general la forma de los mismos se mantiene en las 3 simulaciones.

4.4.2.3. Combinaciones F1 y F2

Considerando los primeros resultados obtenidos de los análisis de sensibilidad a los parámetros de erosión (F1) y a la velocidad de caída (F2) surge la simulación combinada denominada F1F2sGtc2e3Ws2 en la cual se pretende representar con el modelo la dinámica de sedimentos con una alta velocidad de caída para el limo y en contrapartida fomentar la erosión con una tensión crítica baja y una tasa de erosión media (seleccionada igual al valor intermedio entre F1tc1e1 y F1tc1e2). El objetivo es representar las series medidas considerando una alta deposición del limo pero para generar altos valores de concentración es necesario representar una fuerte erosión. Los resultados muestran una excesiva erosión y gran cantidad de sedimento en suspensión en consecuencia (ver Anexo C.2.4). Claramente el valor E_0 considerado es muy elevado aunque resulta interesante observar como algunos procesos cambian. A pesar de que la W_s del limo es muy grande no se produce deposición de todo el material erosionado lo que significa que en este caso la tensión de corte dominaría sobre la caída. Además se genera una gran estratificación y probablemente sea entonces un valor muy alto. Resulta interesante ajustar este modelo tomando un valor de E_0 menor, es decir, permitiendo la erosión durante la mayor parte del tiempo (tensión crítica baja) pero con una tasa menor, y ajustando la velocidad de caída a un valor menor, igual a 0,2 mm/s, valor impuesto en anteriores simulaciones. Surge entonces la definición de la simulación denominada F1F2sGtc2e0Ws1.

Los resultados obtenidos en la simulación F1F2sGtc2e0Ws1 (ver Anexo C.2.4) muestran que la baja tensión de erosión genera resuspensión permanentemente produciendo concentraciones altas de sedimento en suspensión durante el mes simulado, los cuales superan los valores medidos en Torre Oyarvide. Esto indicaría que la resuspensión está siendo muy alta, y además luego de los eventos se observa que permanecen valores altos de turbidez cuando los datos muestran un descenso. Comparando los resultados de la simulación F1F2sGtc2e0Ws1 con la simulación F2sGWs1 es posible analizar cual es el efecto de la disminución de la tensión de corte crítica en las series de concentración. Por otro lado, comparando los resultados de la simulación F1F2sGtc2e0Ws1 con la simulación F2PGsG es posible analizar la combinación de dos variaciones distintas pero que podrían tener resultados similares: “alta” W_s limo (0,2 mm/s) y “baja” τ_{ce} (0,05 N/m²) contra “baja” W_s limo (0,1 mm/s) y “alta” τ_{ce} (0,1 N/m²). En la Figura 4.12 se presenta la comparación de los resultados obtenidos para las configuraciones F1F2sGtc2e0Ws1, F2sGWs1 y F2PGsG. Se observa que el efecto de disminuir la tensión crítica de erosión en contraposición a la disminución de la W_s es grande. Incluso se alcanzan concentraciones superiores a las anteriores (configuración F1F2sGtc2e0Ws1).

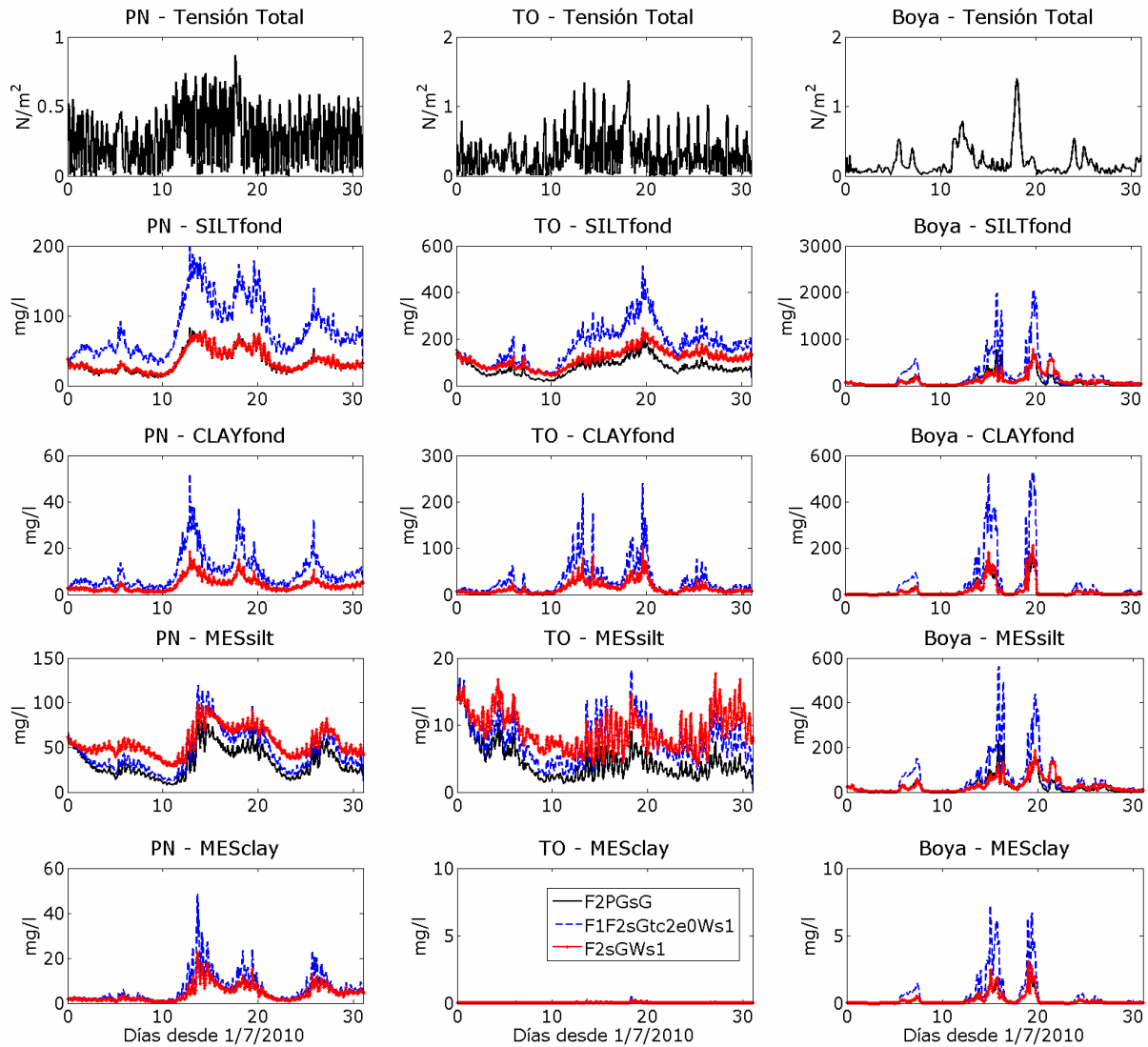


Figura 4.12: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión (SILTfond, CLAYfond, MESSilt y MESclay) obtenida en la capa de fondo en Pilote Norden (paneles izquierdos), Torre Oyarvide (paneles centrales) y en la Boya oceanográfica (paneles derechos) para las simulaciones F2PGsG, F1F2sGtc2e0Ws1 y F2sGWs1. Se agrega la tensión de corte de fondo como referencia. Julio 2010.

En Pilote Norden se observa en la variable SILTfond, que representa el material resuspendido, valores mayores en la simulación combinada (y muy diferentes a los obtenidos en las simulaciones con mayor tensión crítica de erosión: F2PGsG y F2sGWs1). MESSilt por otro lado, al inicio muestra concentraciones más bajas a la simulación F2PGsG y además similares a F2sGWs1, es decir, la mayor W_s del limo genera concentraciones más bajas; sin embargo luego hay un aumento de concentraciones que se representa en todas las simulaciones debido a la mayor erosión y la concentración de la simulación combinada supera la de las otras dos. Sin embargo se observa la caída es mayor (debido a la mayor W_s) que respecto a F2PGsG y en proporción es igual a F2sGWs1 pero las concentraciones iniciales son mayores. Analizando la variable arcilla, se observan las concentraciones son mayores en relación a las anteriores simulaciones (en las cuales los resultados son idénticos pues la modificación se realizó en la velocidad de caída del limo y no de la arcilla). Hay un aumento proporcional de concentración importante aunque solamente se haya bajado a la mitad la tensión crítica de erosión. En Torre Oyarvide también se observa en la variable SILTfond que las concentraciones son

mayores en la simulación F1F2sGtc2e0Ws1 que en las anteriores, lo que indica que el efecto de bajar la tasa de erosión es mayor que la disminución de W_s considerada. Incluso las diferencias son importantes alcanzando en el pico 200 mg/l. Por otro lado la variable MESSilt que mostraría la componente del transporte y no de resuspensión local (por lo menos en momentos con tensiones medias a bajas) muestra concentraciones menores a las obtenidas con F2PGsG, lo cual es razonable pues la W_s es mayor (0,2 mm/s contra 0,1 mm/s). Sin embargo en períodos con tensiones mayores no hay tantas diferencias en los valores de concentración pues la resuspensión domina. Por último en la zona exterior (Boya) la variable SILTfond muestra gran aumento de concentración en la simulación combinada en relación a las anteriores.

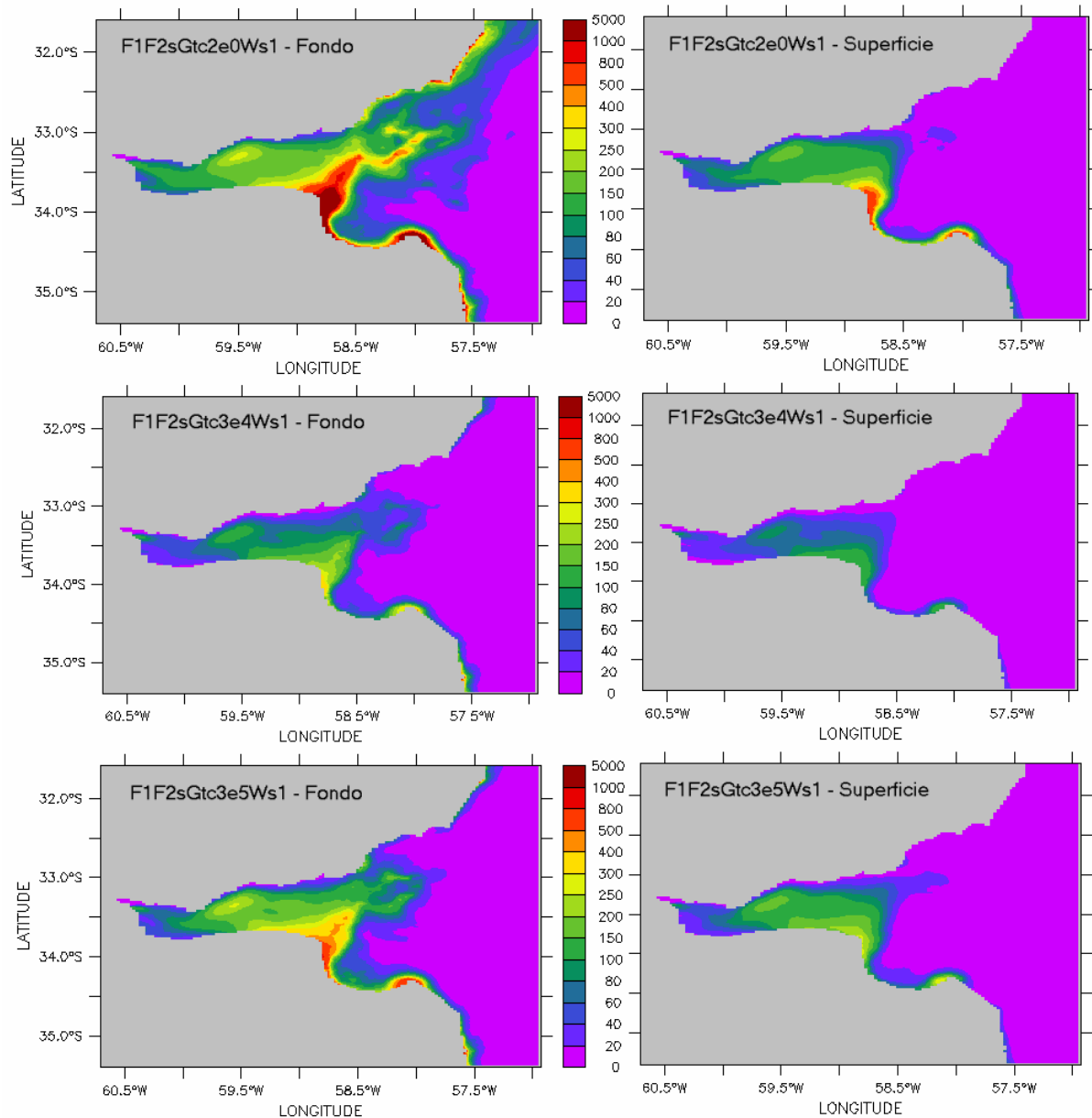


Figura 4.13: Distribución espacial promedio durante julio 2010 de la concentración de sedimento fino total obtenida con el modelo en fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) en la simulación F1F2sGtc2e0Ws1 (paneles superiores), F1F2sGtc3e4Ws1 (paneles intermedios) y F1F2sGtc3e5Ws1 (paneles inferiores).

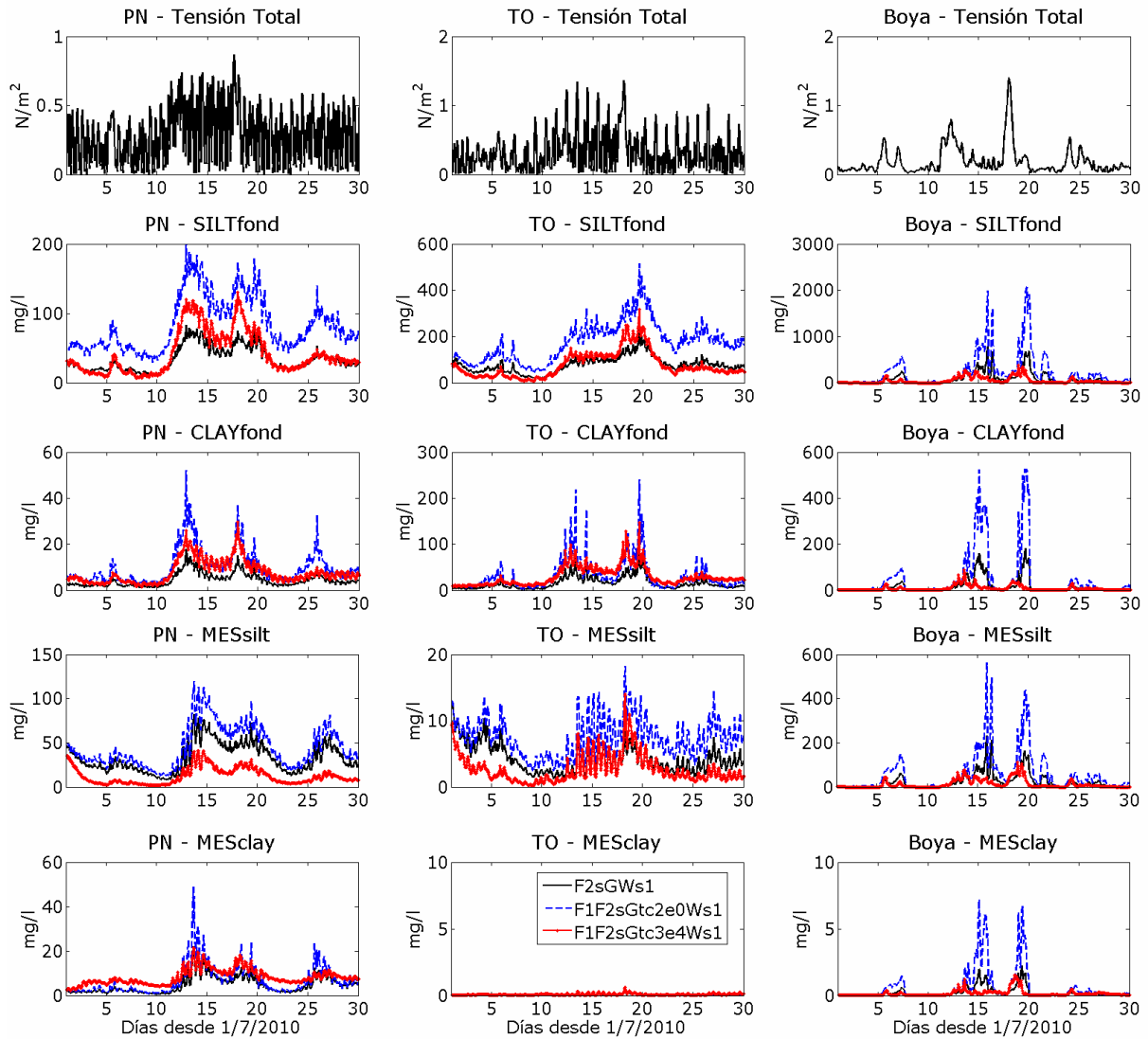


Figura 4.14: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión (SILTfond, CLAYfond, MESsilt y MESclay) obtenida en la capa de fondo en Pilote Norden (paneles izquierdos), Torre Oyarvide (paneles centrales) y en la Boya oceanográfica (paneles derechos) para las simulaciones F2sGWs1, F1F2sGtc2e0Ws1 y F1F2sGtc3e4Ws1. Se agrega la tensión de corte de fondo como referencia. Julio 2010.

Las últimas dos configuraciones analizadas en este punto, F1F2sGtc3e4Ws1 y F1F2sGtc3e5Ws1, fueron diseñadas tomando en cuenta los resultados obtenidos en las simulaciones anteriores. Por una parte se fija la velocidad de caída del limo en un valor constante igual a 0,2 mm/s. Por otro lado se fija la tensión de corte crítica de erosión en 0,21 N/m², y se consideran dos valores diferentes de la tasa de erosión ($e_4=6 \times 10^{-06}$ kg/m²s, y $e_5=1,3 \times 10^{-05}$ kg/m²s) buscando representar los valores basales de concentración de sedimento en suspensión que se observan en las medidas de la zona interior e intermedia. El valor de tensión crítica de erosión surge de una estimación realizada a partir de los datos de Torre Oyarvide durante el Período 3 de medición (julio y agosto 2010). En dicho punto se observa una concentración de base con leves oscilaciones durante gran parte del período analizado. Se calculó el promedio de la tensión crítica de corte total que se obtiene con el modelo durante dichos instantes, lo que resulta en el valor de 0,21 N/m² considerado. Los resultados muestran que la configuración F1F2sGtc3e4Ws1 reproduce valores de concentración más aproximados a los datos que la configuración F1F2sGtc3e5Ws1 (ver Anexo C.2.4), siendo la tasa de resuspensión muy

elevada en esta última simulación. Los resultados de la configuración F1F2sGtc3e4Ws1 muestran que el modelo representa en Torre Oyarvide una concentración permanente no nula similar a la medida, la cual fluctúa con la señal de la marea y durante los eventos de fuerte oleaje.

Los campos medios mensuales de concentración de sedimento en suspensión en fondo y en superficie para las configuraciones analizadas en este punto F2F3sGtc2e0Ws1, F1F2sGtc3e4Ws1 y F1F2sGtc3e5Ws1 se presentan en la Figura 4.13. Se observan variaciones en las plumas de fondo y de superficie. En las configuraciones con $\tau_{ce}=0,21$ N/m² se observan valores medios menores de sedimento en suspensión en relación a la configuración con $\tau_{ce}=0,05$ N/m². Además, se observa el campo medio en superficie obtenido con la configuración F1F2sGtc3e5Ws1 tiene una extensión mayor al obtenido en las otras dos configuraciones.

Comparando los resultados de la simulación F1F2sGtc3e4Ws1 con F1F2sGtc2e0Ws1 y F2sGws1 se tienen tres combinaciones diferentes de tensión de corte crítica y tasa de resuspensión, para una misma condición de velocidad de caída del limo, igual a 0,2 mm/s; $\tau_{ce} = 0,21$ N/m² y $E_0 = 6 \times 10^{-6}$ Kg/m²s (F1F2sGtc3e4Ws1), $\tau_{ce} = 0,05$ N/m² y $E_0 = 1 \times 10^{-6}$ Kg/m²s (F1F2sGtc2e0Ws1), $\tau_{ce} = 0,1$ N/m² y $E_0 = 1 \times 10^{-6}$ Kg/m²s (F2sGws1). En la Figura 4.14 se presenta la comparación de los resultados de dichas simulaciones. En términos generales se observa que las concentraciones mayores se obtienen durante todo el período (en situaciones de tensiones de corte bajas y altas) para la configuración F1F2sGtc2e0Ws1. En Pilote Norden se observa que la configuración F1F2sGtc3e4Ws1 genera valores de concentración menores en relación a las restantes simulaciones pero luego de los eventos de tensión de corte de fondo fuerte las concentraciones superan a las obtenidas con la configuración F2sGws1 por la mayor tasa de resuspensión, a pesar de que la tensión crítica de erosión en la primera es mayor a la de la segunda. Un comportamiento similar se observa en Torre Oyarvide, no siendo así en la Boya.

4.4.3. Discusión

En esta primera etapa de ajuste del modelo se realizaron diversos análisis de sensibilidad simples definiendo varias configuraciones con valores diferentes de los parámetros más relevantes del modelo de sedimentos finos, los vinculados al proceso de erosión (tensión de corte crítica, y tasa de resuspensión) y a la velocidad de caída de la fracción limo. En algunas de las configuraciones analizadas hay ciertos comportamientos observados en los datos que el modelo representa pero en general se observan comportamientos distintos. Los principales avances obtenidos como resultado de estos análisis son:

- El modelo muestra que la dinámica de la zona interior e intermedia del Río de la Plata es muy diferente a la observada en la zona exterior, lo cual se observa en los datos.
- En Pilote Norden el modelo indica el material dominante es el limo.
- En Torre Oyarvide el material principal es el sedimento resuspendido en la zona tipo limo y arcilla (variables del tipo FOND).
- En la zona exterior los resultados son muy sensibles a los parámetros de erosión y a los de velocidad de caída de los finos. Con los parámetros analizados el modelo muestra una fuerte componente de transporte (plumas de sedimento) en esta zona, además de la dependencia con la resuspensión durante eventos de tormenta.
- La tensión crítica de erosión igual a 0.21 N/m² parecería representar correctamente los eventos de resuspensión en la zona de la Boya.

- El efecto de G (turbulencia) en las velocidades de caída es despreciable en los resultados generales.

- Valores de E_0 del entorno a 1×10^{-06} Kg/m²s parecen ser adecuados para la grilla definida y para el valor de tensión crítica de erosión igual a 0,21 N/m². Con tasas mayores los procesos de erosión dominan sobre los procesos de caída de sedimento fino generando en consecuencia una cantidad excesiva de material en suspensión.

- Hay una gran influencia de las variaciones de la velocidad de caída en los resultados finales; pequeñas variaciones modifican fuertemente los valores de concentraciones de base obtenidos con el modelo.

- En los períodos donde domina la marea la variabilidad de la señal parece estar correctamente representada en términos generales.

- Sin embargo otros aspectos, como las señales de mayor duración, no se representan correctamente con las parametrizaciones analizadas. Los eventos de erosión en el modelo generan una resuspensión del material del fondo con un aumento correcto de la concentración en la columna de agua pero la posterior caída de concentración es sumamente lenta en el modelo en comparación a lo que muestran las señales medidas.

En las configuraciones definidas y analizadas en esta sección se trabajó con un modelo conceptual que considera una resuspensión permanente del sedimento de fondo y una caída rápida del material tipo limo que predomina en la zona interior e intermedia. En relación al material más fino (arcilla), muy abundante en la región exterior, la velocidad de caída se incrementa con la concentración. En dicha zona los eventos de resuspensión (tormentas) son de menor frecuencia que los de la zona intermedia (marea) pero tienen un gran efecto en la dinámica pues cubren una zona espacial muy grande y son de mayor duración. Como consecuencia este modelo conceptual sobrestima las concentraciones de sedimento en suspensión post eventos.

4.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD INTEGRADOS

La gran sensibilidad de los resultados del modelo a los parámetros principales vinculados a la dinámica de sedimentos finos refleja la gran complejidad de la misma. Luego de la etapa inicial de análisis de sensibilidad por proceso se realizaron análisis de sensibilidad combinando diversos parámetros y por tanto se les denomina análisis integrados. Se realizaron en total cuatro etapas dentro del ajuste del modelo (análisis de sensibilidad) dentro de las cuales se definieron diversos modelos conceptuales y simulaciones asociadas, con el objetivo de comprender la influencia en los resultados de diversos aspectos específicos de la dinámica: velocidad de caída, forzantes, rugosidad de fondo y deposición. Los procesos que fueron analizados en cada una de las etapas se definieron en función de los resultados obtenidos en las etapas previas. A grandes rasgos se pretende evaluar distintas opciones de parámetros en el modelo con el objetivo de representar la dinámica que muestran los datos.

Uno de los parámetros relevantes en el ajuste es la velocidad de sedimentación o caída del sedimento fino y por tanto se realizaron simulaciones considerando diversos casos. En la Figura 4.15 se presentan las diversas leyes de la velocidad de caída del sedimento fino en función de la concentración utilizadas en las simulaciones definidas durante las distintas etapas de los análisis de sensibilidad integrados. Por un lado se consideran algunos casos de velocidad de caída constante (0,1 mm/s; 0,2 mm/s y 1,0 mm/s) y por otro varias parametrizaciones de ley variable. La ley denominada orig corresponde a la parametrización considerada para la arcilla en la configuración de referencia mencionada anteriormente ParGlobal. Las leyes mf1, mf2 y mf3 fueron definidas con el objetivo de obtener diversos rangos de velocidades de caída en función de

la concentración. Las leyes W_{sfs} (para el limo) y W_{sfc} (para la arcilla) se definieron con valores de velocidades mínimas (W_{smin}) determinadas en base a la formulación anteriormente presentada 4.11 e información de campo según se describe a continuación.

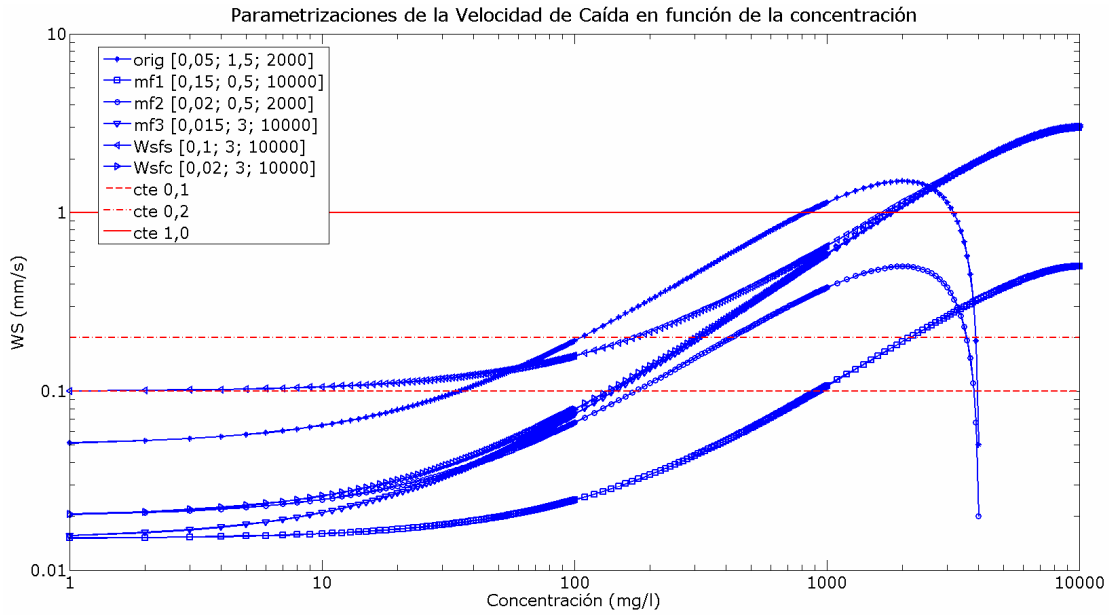


Figura 4.15: Parametrizaciones de la velocidad de caída en función de la concentración de sedimento utilizadas en las diversas simulaciones.

ESTACIÓN	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4	Campaña 5	Promedio D_{50} (μ)	w_s (mm/s)
	D_{50} (μ)	D_{50} (μ)	D_{50} (μ)	D_{50} (μ)		
#1	5.11	11.94	11.92	---	9.66	0.093
#2	4.88	13.29	12.15	---	10.11	0.102
#3	4.58	9.59	8.84	---	7.67	0.059
#5	6.21	7.10	14.21	---	9.17	0.084
#6	5.14	9.80	12.64	9.22	9.20	0.085
#7	4.17	13.73	9.10	12.13	9.78	0.096
#8	5.38	9.67	11.69	34.36	15.28	<u>0.233</u>
#9	6.08	9.19	13.18	17.90	11.59	0.134
#10	5.92	6.77	12.17	---	8.29	0.069
#11	4.44	14.04	12.02	15.15	11.41	0.130
#12	5.92	12.58	8.40	15.95	10.71	0.115
#13	4.40	13.79	8.89	18.04	11.28	0.127
#14	5.76	8.19	10.10	18.27	10.58	0.112
#15	5.79	8.27	9.09	15.17	9.58	0.092
#15bis	5.39	11.77	16.54	---	11.23	0.126
#16	7.45	9.64	2.47	5.81	6.34	0.040
#17	---	3.94	3.19	---	3.57	0.013
#18	2.06	---	---	---	2.06	0.004
#19	2.93	---	10.73	---	6.83	0.047
#20	2.66	4.02	2.43	5.99	3.77	0.014
#21	2.20	3.34	5.28	7.03	4.46	0.020
#22	4.68	3.78	6.26	7.52	5.56	0.031
#23	6.73	3.16	6.39	8.08	6.09	0.037
#24	3.98	4.96	7.57	---	5.50	0.030
#25	3.62	3.89	3.99	---	3.83	0.015
#26	3.57	4.47	5.92	---	4.65	0.022

Tabla 4.4: Determinación del valor de velocidad de caída elemental w_s (mm/s) en función del diámetro medio del sedimento en suspensión medido en las campañas de medición 2 a 5.

Utilizando la información del diámetro medio de las partículas de las muestras de sedimento en suspensión extraídas en las campañas 2 a 5 del Proyecto FREPLATA-FFEM en las estaciones de control se calcularon las velocidades de caída de las partículas elementales. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.4. Se destaca la diferencia de las velocidades de caída entre el sedimento de la zona interior e intermedia predominantemente limoso y el sedimento en suspensión en la zona exterior del tipo arcilloso. Se calculó un valor promedio de velocidad de caída elemental para los limos del Río de la Plata utilizando la información de las estaciones #1 a #15bis (Torre Oyarvide), sin contar la información de la estación #8 por ser considerablemente mayor al resto; y un valor promedio de velocidad de caída elemental para las arcillas del Río de la Plata utilizando la información de las estaciones #16 a #26. Para los limos se obtuvo un valor de 0,10 mm/s y para las arcillas un valor menor de 0,02 mm/s. Estos valores se definen como velocidades de caída mínimas en las leyes denominadas W_{sfs} y W_{sfc} .

4.5.1. Etapa 1

4.5.1.1. Metodología

En esta etapa se analizan dos modelos conceptuales asociados a la caída de los materiales finos, limo y arcilla (Tabla 4.5). La nomenclatura F1F2F3 refiere a que se realizan cambios en los parámetros de las dos familias definidas en la sección anterior, y W_{snew} refiere a nuevas leyes de velocidad de caída. Para simplificar la notación de las configuraciones se las refiere como new y el número asociado (F1F2F3 W_{snew1} como new1 por ejemplo). En todas las simulaciones de esta etapa no se considera la influencia de la turbulencia (a través del parámetro G en la velocidad de caída de los finos).

Simulación	Ws (mm/s y mg/l)		Erosión		Deposición
	Ws limo	Ws arcilla	τ_{ce} (N/m ²)	E_0 (kg/m ² s)	τ_{cd} (N/m ²)
F1F2F3 W_{snew1}	1,0 constante	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	0,21	1×10^{-06}	0,21
F1F2F3 W_{snew1b}	1,0 constante	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	0,21	6×10^{-06}	0,21
F1F2F3 W_{snew2}	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	0,5	1×10^{-06}	0,5
F1F2F3 W_{snew3}	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	0,5	6×10^{-06}	0,5
F1F2F3 W_{snew3b}	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	0,5	1×10^{-05}	0,5
F1F2F3 W_{snew4}	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	0,21	6×10^{-07}	0,21
F1F2F3 W_{snew4b}	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	0,21	1×10^{-06}	0,21
F1F2F3 W_{snew5}	ley mf2 [0,02; 0,5; 2000]	ley mf2 [0,02; 0,5; 2000]	0,21	6×10^{-07}	0,21

Tabla 4.5: Parámetros modificados en las diversas simulaciones realizadas en la etapa 1 de los análisis de sensibilidad integrados.

En primer lugar se considera un modelo conceptual con un comportamiento bien diferenciado de los dos materiales, con una velocidad de caída alta para el limo (1,0 mm/s) y una velocidad de caída baja para la arcilla, con una ley variable (denominada mf1) con $W_{s\min} = 0,015$ mm/s y $W_{s\max} = 0,5$ mm/s para una concentración $C_{\max} = 10$ g/l. Las simulaciones new1 y new1b corresponden a dicho modelo conceptual que se diferencian en la tasa de resuspensión siendo la primera una simulación con menor tasa de resuspensión respecto a la segunda.

En segundo lugar se considera un modelo conceptual con velocidades de caída bajas y variables con la concentración para ambas fracciones de finos. En este caso la dinámica del Río de la Plata estaría dominada por el transporte en suspensión y en menor proporción por la resuspensión. Dos situaciones bien diferentes en relación a la erosión (variando la tensión de corte crítica de erosión) se analizan en este modelo para

representar dicha dinámica. Por un lado se considera un valor alto de $0,5 \text{ N/m}^2$ (erosión poco frecuente) y por otro un valor medio de $0,21 \text{ N/m}^2$. Para cada caso se evaluaron los valores de la tasa de resuspensión que generan concentraciones similares a las medidas. Se analizan en definitiva 5 configuraciones asociadas al modelo conceptual de velocidades de caída bajas para ambos finos (simulaciones new2, new3, new3b, new4 y new4b). De hecho se define la misma función de variación con la concentración para el limo y la arcilla, y por tanto en este modelo no se diferencian ambos materiales. Se simuló el período agosto 2010 en todos los casos salvo para las simulaciones new1b y new5 para las cuales también se simula el período de julio 2010.

Finalmente la simulación new5 surge como resultado del análisis de las configuraciones anteriores como nueva configuración de base que se utilizará en las siguientes etapas del análisis de sensibilidad. En este caso se utiliza una misma ley de velocidad de caída para el limo y para la arcilla dependiente de la concentración denominada mf2 ($W_{s\text{min}}=0,02 \text{ mm/s}$ y $W_{s\text{max}}=0,5 \text{ mm/s}$ para una concentración $C_{\text{max}}=2 \text{ g/l}$) que genera valores levemente mayores de W_s a los obtenidos con la ley mf1.

4.5.1.2. Resultados

En términos generales los resultados obtenidos en la configuración F1F2F2W_snew1 muestran poca cantidad de sedimento en suspensión, producto de la combinación de alta velocidad de caída y poca resuspensión de material de fondo (Anexo C.3.1). Debido a esto la configuración new1b se definió con el objetivo de ajustar el proceso de resuspensión dada una velocidad de caída del material limoso relativamente alta. Los resultados obtenidos en la misma muestran valores de concentración razonables en todo el Río de la Plata (Anexo C.3.1). Al comparar con las parametrizaciones anteriormente consideradas se observó principalmente una variabilidad temporal diferente. La alta velocidad de caída definida para el limo en esta simulación genera que tanto el incremento como la caída de concentración post evento de erosión sea más rápida en relación a las simulaciones anteriores con valores más bajos de velocidad de caída. Por otra parte, los valores altos de velocidad de caída del limo generan una variación vertical de la concentración de sedimento en suspensión en la columna de agua en la zona interior e intermedia que no se observa en los perfiles medidos durante las campañas oceanográficas. Además, en las zonas donde predomina la arcilla se observa en cambio una mayor acumulación de sedimento en suspensión post evento por la consideración en este caso de una ley de velocidades de caída más bajas para la arcilla. En la comparación (Figura 4.16) de los campos medios mensuales de concentración de sedimento en la capa de fondo y en la capa superficial obtenida con ambas configuraciones (new1 y new1b), se observa cómo aumentan las concentraciones en todo el Río de la Plata con el incremento de la tasa de resuspensión.

El segundo modelo conceptual analizado en esta etapa responde a una dinámica dominada por la permanencia de los sedimentos finos en suspensión (valores bajos de velocidad de caída) con una resuspensión limitada del sedimento de fondo durante los eventos. Los resultados obtenidos con la configuración new2 muestran concentraciones en suspensión muy bajas (Anexo C.3.1) y en consecuencia se definieron las configuraciones new3 y new3b, ambas con mayor tasa de resuspensión. Para la configuración new3 los resultados obtenidos muestran un incremento de la concentración en la columna de agua en relación a la configuración new2 pero permanece la subestimación de los eventos de fuerte incremento de concentración por resuspensión observados en los datos. Al continuar el incremento de la tasa de resuspensión (configuración new3b) el modelo reproduce mejor las señales de aumento de turbidez durante los eventos pero la variabilidad de las curvas es claramente diferente a la variabilidad de las medidas (Anexo C.3.1). A pesar de que los valores medios puedan ser

similares la dinámica que muestran los datos no corresponde a la dinámica reflejada por el modelo conceptual de dicha configuración.

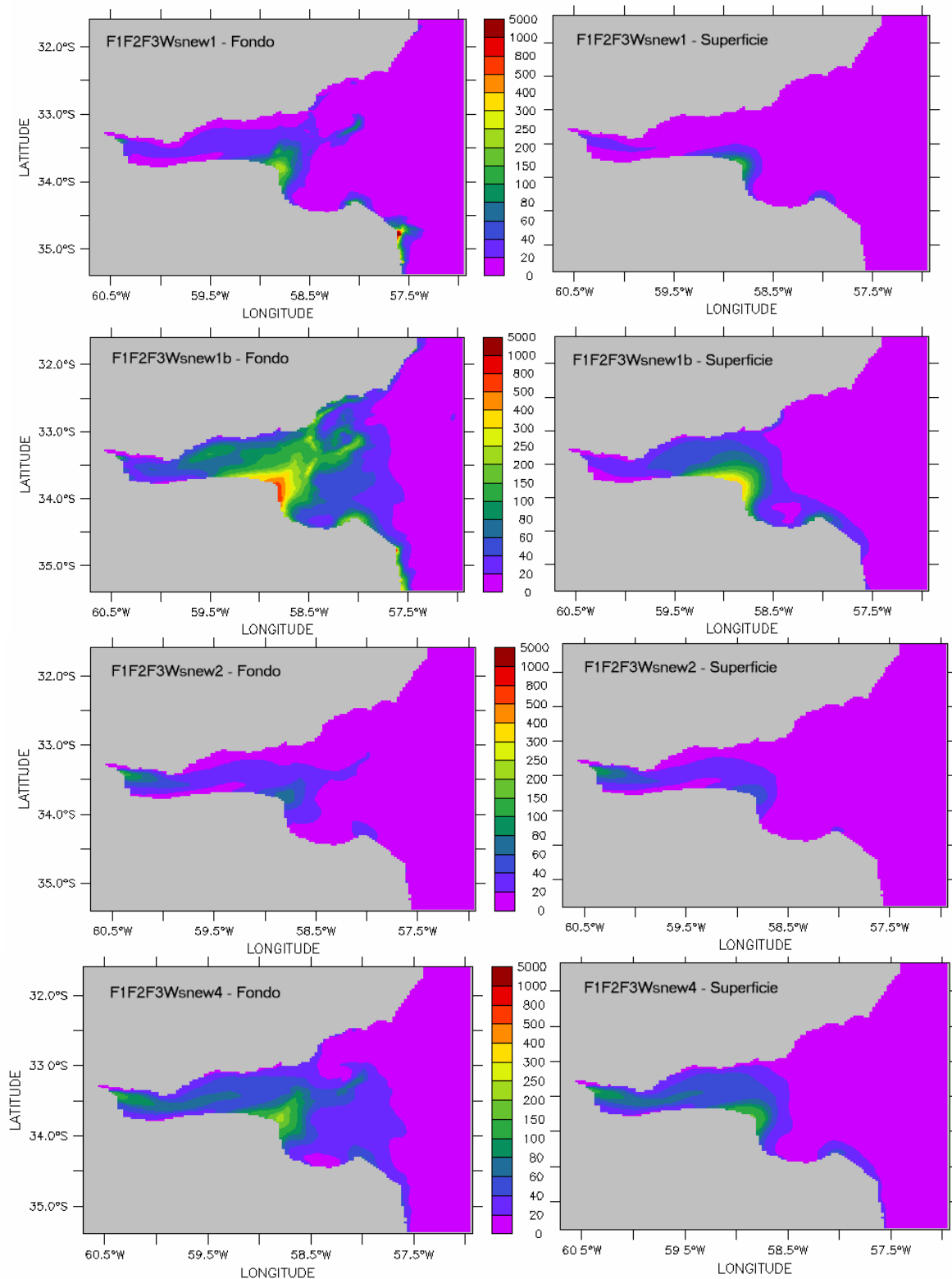


Figura 4.16: Distribución espacial promedio durante agosto 2010 de la concentración de sedimento fino total obtenida con el modelo en fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) en la simulación F1F2F3Wsnew1 (paneles superiores), F1F2F3Wsnew1b (paneles intermedios superiores), F1F2F3Wsnew2 (paneles intermedios inferiores) y F1F2F3Wsnew4 (paneles inferiores).

En la Figura 4.16 se presentan los campos de concentraciones medios mensuales (agosto 2010) obtenidos en fondo y en superficie para la simulación new2. Comparando por ejemplo con el campo correspondiente a la simulación new1 se observa cómo el aumento de la tensión de corte crítica modifica la distribución espacial, limitando la pluma de sedimento medio principalmente a la zona de mayores tensiones de corte de fondo de marea. En los casos mencionados el valor alto de tensión de corte crítica refleja una dinámica donde se acotan los efectos de la erosión a situaciones no frecuentes de altas tensiones de corte. En las configuraciones new4 y new4b se fija una tensión de corte crítica menor ($0,21 \text{ N/m}^2$ respecto a $0,5 \text{ N/m}^2$) y por tanto se permite una mayor frecuencia de los eventos de resuspensión. Los resultados obtenidos en dichos casos muestran que el modelo no es capaz de representar ni las concentraciones de base ni las concentraciones de sedimento en suspensión durante los eventos de resuspensión (Anexo C.3.1) con los parámetros seleccionados. El campo medio de sedimento en suspensión obtenido en la simulación new4 (Figura 4.16) muestra concentración no nula en todo el Río de la Plata interior e intermedio, a diferencia por ejemplo del modelo representado por la simulación new2 que se observa en la misma figura.

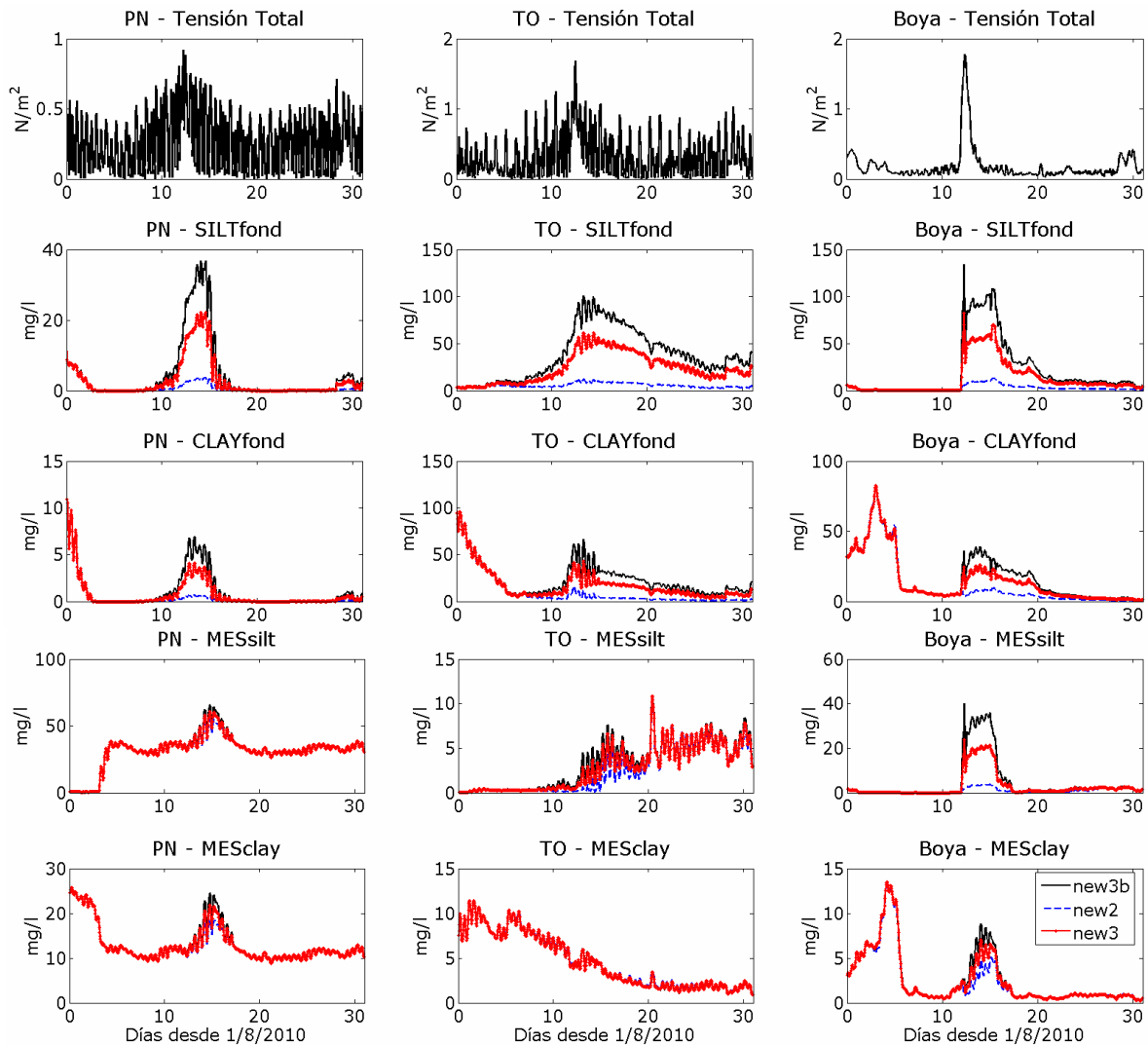


Figura 4.17: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión (SILTfond, CLAYfond, MESsilt y MESclay) obtenida en la capa de fondo en Pilote Norden (paneles izquierdos), Torre Oyarvide (paneles centrales) y en la Boya oceanográfica (paneles derechos) para las simulaciones F1F2F3Wnew2, F1F2F3Wnew3 y F1F2F3Wnew3b. Se agrega la tensión de corte de fondo como referencia. Agosto 2010.

Aunque las configuraciones analizadas no representan exactamente la dinámica medida el análisis comparativo de los resultados obtenidos en las mismas permite comprender la sensibilidad del modelo a diversos parámetros y condiciones. En la Figura 4.17 se presenta la comparación de la evolución temporal de las variables de sedimento fino incluidas en el modelo para las configuraciones F1F2F3W_{new2}, new3 y new3b, las cuales se diferencian en la tasa de resuspensión. Se observa claramente el incremento de concentración durante los eventos con tensión de corte mayor a la tensión de corte crítica ($0,5 \text{ N/m}^2$) proporcional al incremento de la tasa de resuspensión. La disminución de la concentración post evento de grandes tensiones presenta la misma variabilidad en todos los casos. La comparación de los resultados obtenidos entre las configuraciones new4 y new4b muestra el mismo comportamiento.

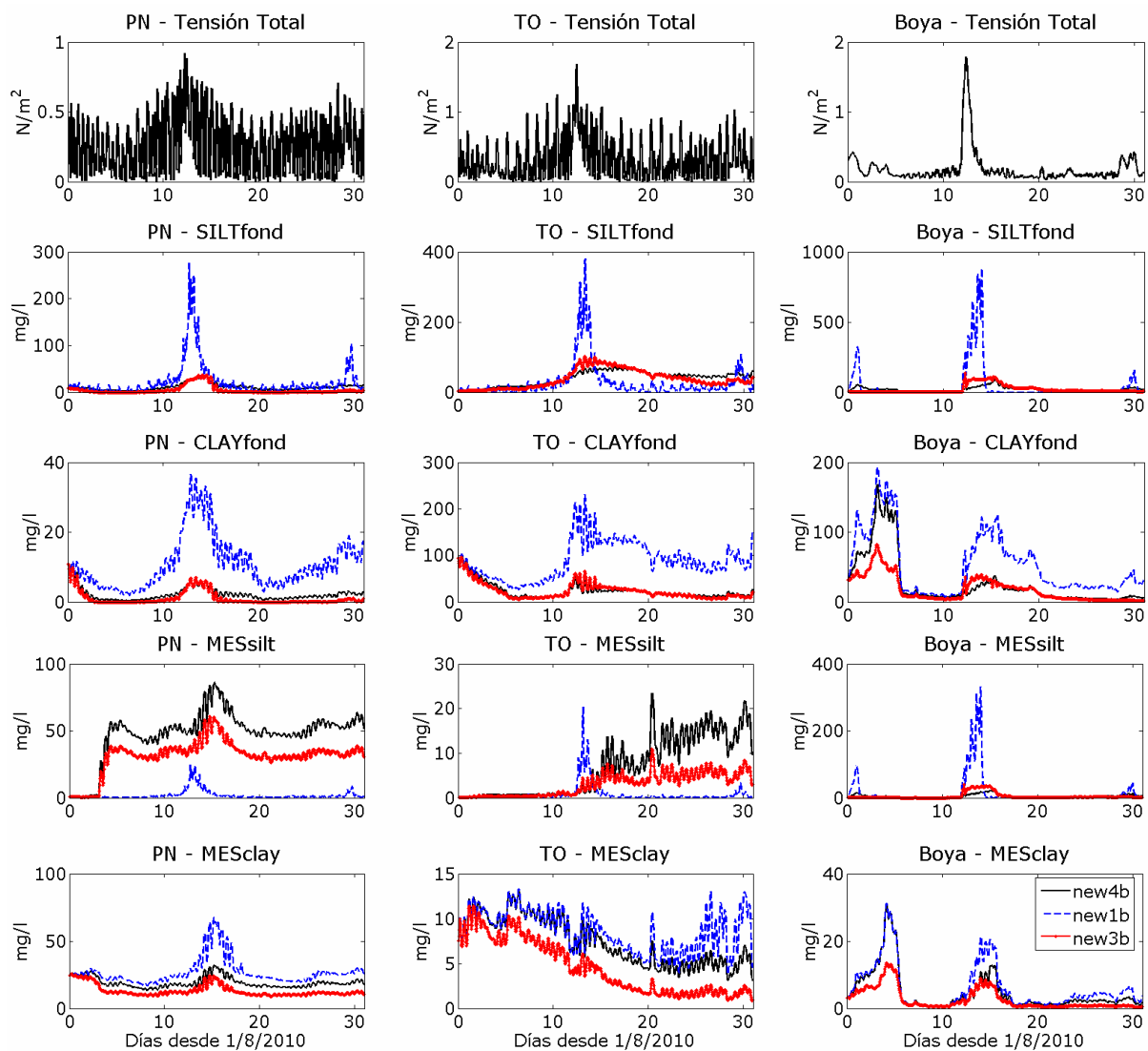


Figura 4.18: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión (SILTfond, CLAYfond, MESsilt y MESclay) obtenida en la capa de fondo en Pilote Norden (paneles izquierdos), Torre Oyarvide (paneles centrales) y en la Boya oceanográfica (paneles derechos) para las simulaciones F1F2F3W_{new1b}, F1F2F3W_{new3b} y F1F2F3W_{new4b}. Se agrega la tensión de corte de fondo como referencia. Agosto 2010.

Por último, se presenta en la Figura 4.18 la comparación de las curvas de concentración de las diversas componentes de sedimento fino simuladas para las configuraciones new1b, new3b y new4b. Analizando la variable SiltFOND se observan

comportamientos muy diferentes en las tres estaciones analizadas, principalmente entre la configuración new1b y las configuraciones new3b y new4b, para las cuales la velocidad de caída es mucho menor y por tanto la disminución de concentración post evento es más lenta en las mismas en relación a la configuración new1b. La variable ClayFOND muestra diferencias principalmente en la magnitud del incremento de concentración durante los eventos debido principalmente a las diferencias en las tasas de resuspensión. Las variables MESsilt y MESclay muestran comportamientos similares a los mencionados anteriormente.

4.5.1.3. Síntesis

Se plantearon en esta etapa diversas simulaciones que representan dos modelos conceptuales diferentes al planteado inicialmente. El primer modelo supone una caída del material tipo limo rápida, es decir, altos valores de W_s , mientras que para la arcilla se considera una caída lenta. El segundo modelo impone una misma ley de variación de la velocidad de caída con valores bajos para ambos materiales. Los parámetros de resuspensión se ajustaron en ambos modelos con el objetivo de representar valores razonables de concentración en función de lo que muestran las mediciones.

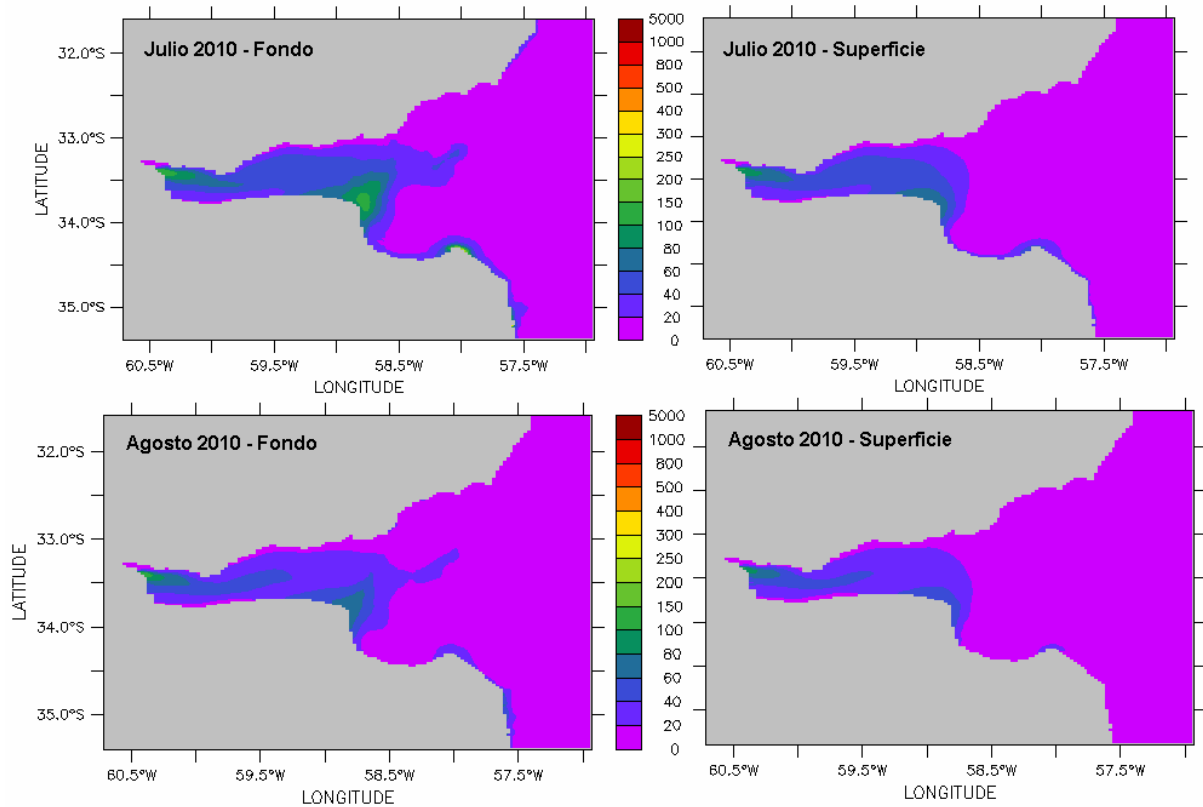


Figura 4.19: Distribución espacial promedio de la concentración de sedimento fino total obtenida con el modelo para la configuración F1F2F3Wsnw5 en fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) para julio 2010 (paneles superiores), y agosto 2010 (paneles inferiores).

En términos generales los resultados muestran que hay una mayor cantidad de sedimento puesto en suspensión durante los eventos de tormenta en los modelos de media y alta velocidad de caída de limo, pues la resuspensión en esos modelos fue incrementada para contrarrestar la caída del sedimento en períodos de marea (calma). Se dificulta entonces en este caso obtener parámetros que representen ambas condiciones, los períodos de marea y los períodos de fuertes eventos de oleaje de tormenta. El modelo conceptual donde se supone una velocidad de caída muy leve para

los sedimentos finos permite disminuir la resuspensión y genera valores razonables de concentraciones en períodos de calma. No obstante este modelo no representa la variación temporal observada en las medidas, especialmente en lo que refiere a la concentración durante los eventos y a la posterior caída de concentración observada luego de los mismos.

Surge la configuración denominada new5 como síntesis de los análisis realizados. La misma responde al modelo conceptual mencionado anteriormente en el cual se limita la tasa de resuspensión de sedimento de fondo y se impone una ley de velocidad de caída que determina valores de W_s bajos para ambos tipos de sedimentos. Se modifica levemente la ley en relación a las simulaciones new2 a new4b incrementando en este caso los valores de W_s pero manteniendo valores bajos en términos generales. Con esta configuración se pretende obtener valores bases representativos de condiciones de calma para luego continuar el proceso de ajuste trabajando específicamente sobre los procesos de erosión y resuspensión durante tormentas. En el Anexo C.3.1 se presentan los resultados obtenidos con la configuración new5 y en la Figura 4.19 se presentan los campos medios mensuales (julio y agosto 2010) de concentración de sedimento fino en la columna de agua sobre el fondo y sobre la superficie libre. Los resultados muestran que con esta configuración el modelo reproduce valores basales de concentración en períodos de calma en la zona interior e intermedia del Río de la Plata, aunque son menores a los medidos en Torre Oyarvide.

4.5.2. Etapa 2

4.5.2.1. Metodología

En esta etapa se realizan una serie de simulaciones con el objetivo de analizar el efecto de los forzantes (corrientes de marea y oleaje) en la resuspensión del material de fondo mediante el proceso de erosión generado por las tensiones de corte del flujo. Por un lado se realizan una serie de simulaciones considerando sólo el efecto del oleaje en la erosión del material de fondo y por otro lado se realizan análisis de sensibilidad modificando la intensidad de las tensiones de corte de fondo generadas por las corrientes de marea. En la Tabla 4.6 se presentan las características y parámetros principales de las simulaciones definidas en la etapa 2 de los análisis de sensibilidad integrados.

Simulación	Ws (mm/s y mg/l)		Erosión		Deposición	Tensiones de corte de fondo
	Ws limo	Ws arcilla	τ_{cd} (N/m ²)	E_0 (kg/m ² s)	τ_{cd} (N/m ²)	
Wsnew5waves	ley mf2 [0,02; 0,5; 2000]	ley mf2 [0,02; 0,5; 2000]	0,21	6×10^{-07}	0,21	oleaje
Wsnew5wavesA	ley mf2 [0,02; 0,5; 2000]	ley mf2 [0,02; 0,5; 2000]	0,21	6×10^{-06}	0,21	oleaje
Wsnew5wavesB	ley mf2 [0,02; 0,5; 2000]	ley mf2 [0,02; 0,5; 2000]	0,1	1×10^{-06}	0,1	oleaje
Wsnew5wavesC	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	0,21	1×10^{-05}	0,21	oleaje
Wsnew6tc4	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	0,1	6×10^{-06}	0,1	oleaje + corrientes/4
Wsnew6tc4corr	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	0,1	6×10^{-06}	0,1	corrientes/4
Wsnew6tc4wave	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	0,1	6×10^{-06}	0,1	oleaje
Wsnew7tc4	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	ley mf2 [0,02; 0,5; 2000]	0,1	1×10^{-06}	0,1	oleaje + corrientes/4
Wsnew7 *	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	ley mf2 [0,02; 0,5; 2000]	0,1	1×10^{-06}	0,1	oleaje + corrientes
Wsnew6tc4cep **	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	0,1	6×10^{-06}	0,1	oleaje + corrientes/4

* en este caso no hay variación de las tensiones de corte de fondo

** se utilizan los vientos CEP en el modelo hidrodinámico de marea en vez de los vientos NCEP

Tabla 4.6: Parámetros modificados en las diversas simulaciones realizadas en la etapa 2 de los análisis de sensibilidad integrados.

Las primeras 4 simulaciones (Wsnew5waves, y wavesA, wavesB y wavesC) consideran solamente la resuspensión del sedimento de fondo generada por efecto del oleaje. El objetivo de las mismas es determinar las variaciones temporales en las señales

de concentración en suspensión generadas por la resuspensión durante eventos de oleaje por tormenta. Para esto se realiza una modificación del código imponiendo que la tensión total de corte de fondo sea igual a la tensión calculada debida al oleaje, y por tanto no se consideran las tensiones de corte generadas por las corrientes de marea. No obstante el efecto de las mismas se considera en la hidrodinámica del sistema y por tanto en el proceso de transporte del sedimento fino en la columna de agua. A partir de los resultados obtenidos en la simulación *Wsnew5waves* se definieron las restantes tres simulaciones en las cuales se modifican parámetros vinculados a la erosión y velocidad de caída con el objetivo de mejorar la representación de las concentraciones medidas.

Conocido el efecto de la resuspensión del material de fondo generada por el oleaje en las señales de turbidez en los puntos de control del modelo se definieron una serie de simulaciones que incorporan el efecto de las tensiones de corte generadas por las corrientes de marea pero de una manera gradual. Las simulaciones ya realizadas en las etapas previas mostraron básicamente la dificultad de combinar el efecto permanente de resuspensión de material de fondo generado por las corrientes de marea con el fuerte efecto del oleaje en la resuspensión de fondo que ocurre durante los eventos de tormenta. Para diferenciar el efecto de ambos forzantes se modifican las tensiones de corte generadas por las corrientes en vez de modificar los parámetros vinculados a la erosión, ya que la versión del modelo MARS utilizada en este trabajo considera que el proceso de erosión no depende del tipo de forzante que las genera. En las configuraciones en cuyo nombre aparece la sigla *tc4* se modifica el código para incorporar las tensiones de corte generadas por las corrientes en las tensiones de corte totales pero dividiéndolas entre 4, es decir, con valores cuatro veces menores a los calculados según la formulación utilizada. De esta manera se analiza en dichas simulaciones el efecto de disminuir la resuspensión generada por las corrientes en relación a la resuspensión generada por los eventos del oleaje.

Por último, se modifica el campo de vientos utilizado para forzar el modelo hidrodinámico MARS (ver Capítulo 3) y se analiza la influencia sobre la dinámica de sedimentos. La simulación denominada *Wsnew6tc4cep*, en cuyo nombre aparece el término *cep*, utiliza para forzar el modelo hidrodinámico de marea, y el modelo de sedimentos acoplado, los vientos de re-análisis del centro europeo ECWMF (denominados CEP en este trabajo), a diferencia de las restantes simulaciones en las cuales el modelo MARS fue forzado por los vientos NCEP. Es importante recordar el modelo hidrodinámico de marea se calibró para ambas fuentes de información aunque la comparación realizada mostró que los resultados obtenidos con CEP son de mejor calidad, principalmente en lo que refiere a la representación del campo salino. Respecto al modelo de oleaje los resultados del modelo SWAN incorporados al modelo MARS en todas las simulaciones fueron obtenidos utilizando como forzante los vientos CEP.

Para las configuraciones *Wsnew5waves*, *Wsnew5wavesA*, *Wsnew5wavesB*, *Wsnew6tc4corr*, *Wsnew7tc4* y *Wsnew7* se simuló el período de tiempo de agosto 2010. Los meses de julio y agosto de 2010 se simularon con las configuraciones *Wsnew5wavesC*, *Wsnew6tc4*, y *Wsnew6tc4cep*. El mes de agosto 2010 se utiliza para las comparaciones entre las simulaciones.

4.5.2.2. Resultados

En el Anexo C.3.2 se presentan las comparaciones de las series de concentración de sedimento en suspensión obtenidas con las diversas configuraciones del modelo analizadas en ésta etapa 2 y los valores medidos en las estaciones de control de Pilote Norden, Torre Oyarvide y Boya Oceanográfica. En esta sección se presentan ciertos análisis que surgen de la comparación de dichos resultados realizados con el objetivo de

comprender los diversos efectos sobre la dinámica de sedimento fino de las variaciones implementadas en las configuraciones.

En términos generales eliminar la resuspensión por las corrientes de marea tiene un gran efecto en la dinámica de sedimento fino en la columna de agua principalmente en la zona interior e intermedia del Río de la Plata. Utilizando los parámetros de caída y de erosión definidos en la simulación *Wsnew5waves* se obtiene poca cantidad de sedimento en suspensión en todo el Río de la Plata y muy poca resuspensión. La comparación de los resultados obtenidos con las simulaciones *Wsnew5waves* y *F1F2F3Wsnew5* permite determinar la influencia de la resuspensión generada por las corrientes de marea en la concentración de sedimento en suspensión (Figura 4.20).

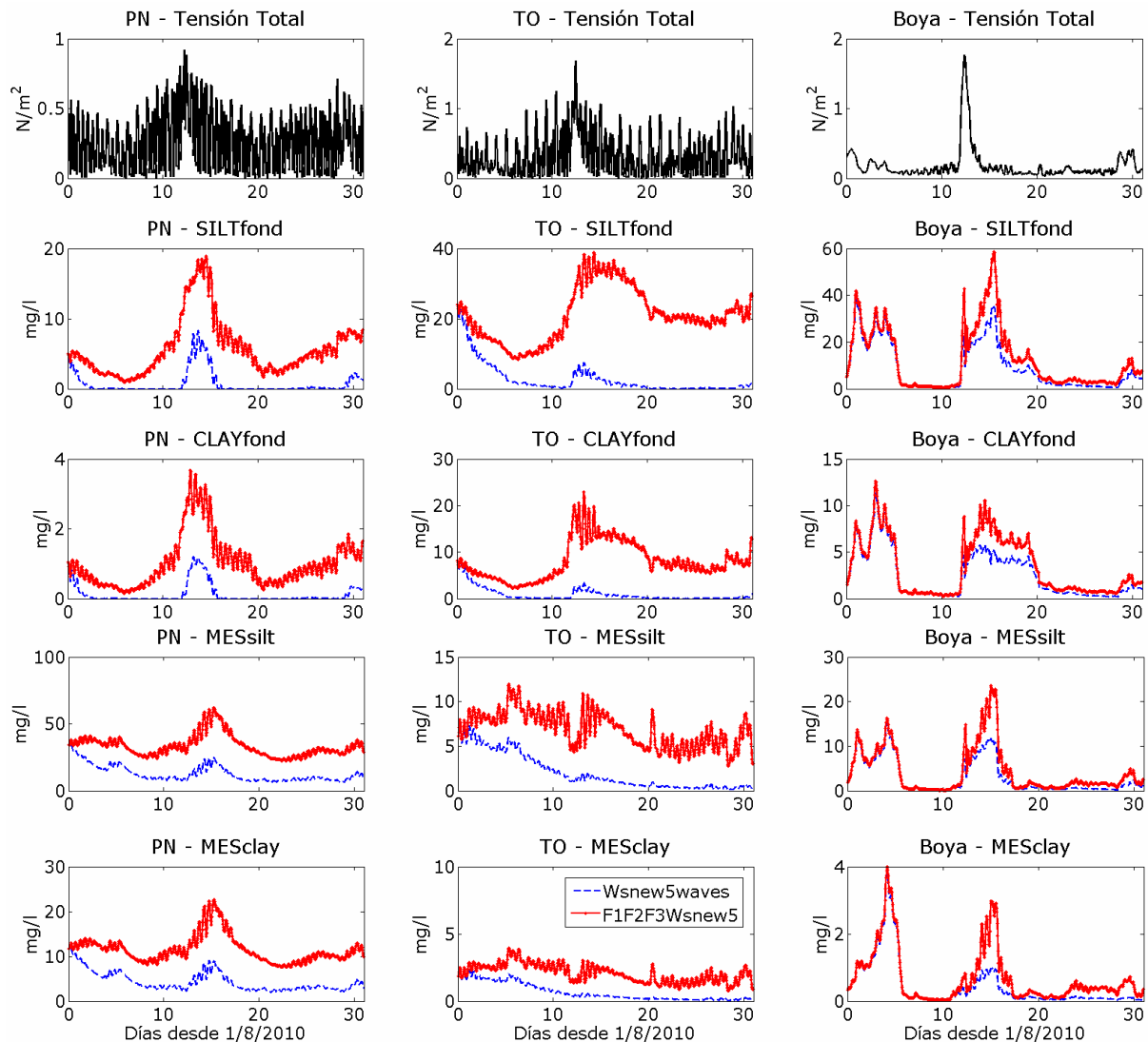


Figura 4.20: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión (SILTfond, CLAYfond, MESsilt y MESclay) obtenida en la capa de fondo en Pilote Norden (paneles izquierdos), Torre Oyarvide (paneles centrales) y en la Boya oceanográfica (paneles derechos) para las simulaciones *Wsnew5waves* y *F1F2F3Wsnew5*. Se agrega la tensión de corte de fondo como referencia. Agosto 2010.

Dicha comparación permite visualizar principalmente el efecto de la resuspensión de material de fondo por las corrientes de marea y por el oleaje en las curvas de concentración. Se observa en Pilote Norden (PN) un descenso en la concentración en todo el período simulado para todas las componentes de sedimento fino (limo y arcilla). La

diferencia por ejemplo en SILTfond permite observar justamente el aporte de cada forzante. Se observa la variabilidad por el evento es mucho más marcada considerando sólo el oleaje. En Torre Oyarvide (TO) se observa que el aporte del oleaje en la resuspensión en relación al aporte de las corrientes es bajo. Claramente la resuspensión en la zona de TO generada por las corrientes de marea es dominante en la dinámica de sedimentos en suspensión en la misma. En la zona de la Boya, se observan diferencias menores entre ambas simulaciones, debido principalmente a que en esta zona domina la tensión del oleaje en la tensión de corte total. De esta manera se verifica el rol predominante que tienen las tensiones de corte generadas por las corrientes en los procesos de resuspensión en gran parte del Río de la Plata y por tanto en la variabilidad de la concentración de los sedimentos finos en la columna de agua.

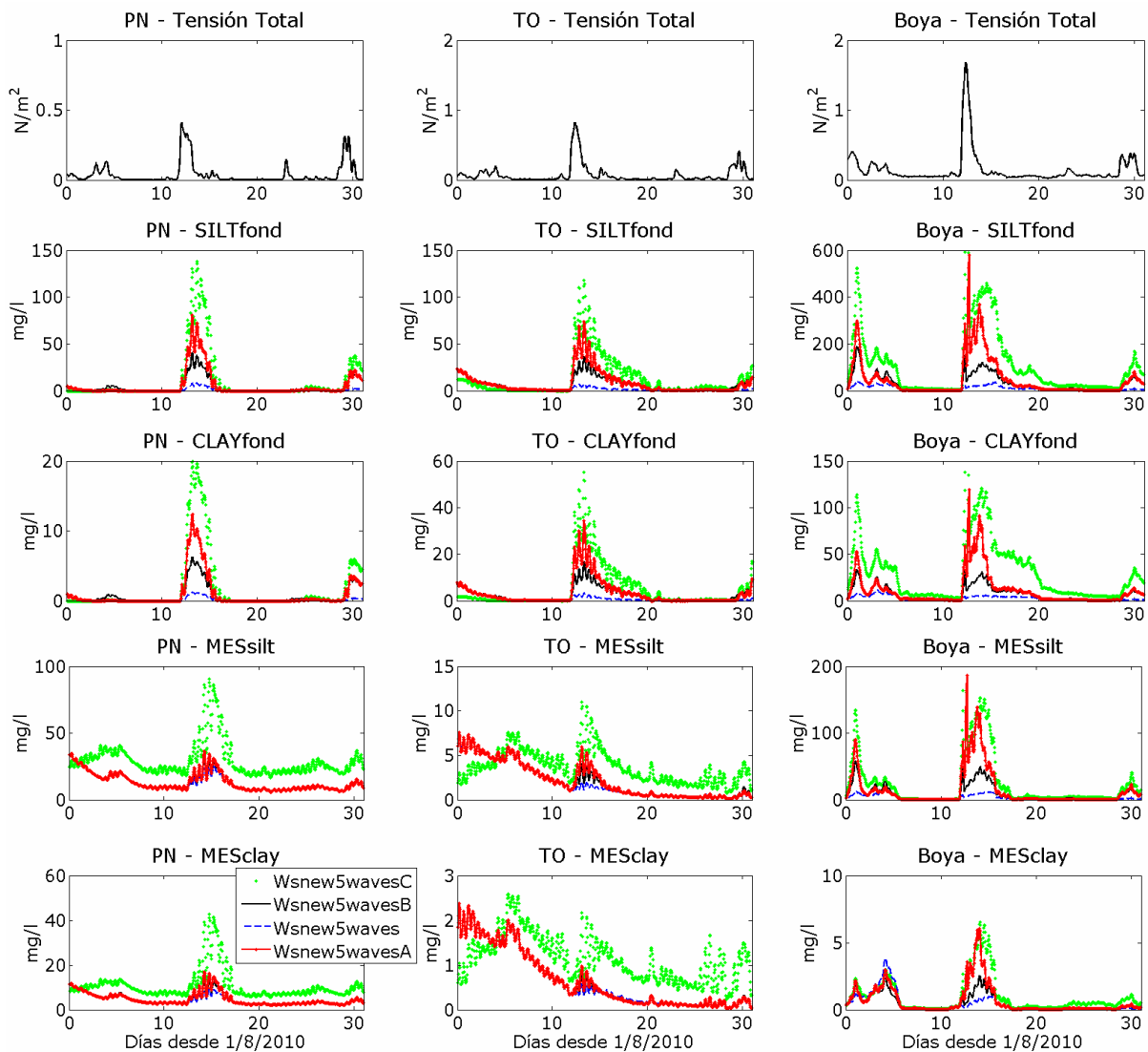


Figura 4.21: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión (SILTfond, CLAYfond, MESsilt y MESclay) obtenida en la capa de fondo en Pilote Norden (paneles izquierdos), Torre Oyarvide (paneles centrales) y en la Boya oceanográfica (paneles derechos) para las simulaciones Wsnew5waves, Wsnew5wavesA, Wsnew5wavesB y Wsnew5wavesC. Se agrega la tensión de corte de fondo como referencia. Agosto 2010.

Las simulaciones Wsnew5wavesA, Wsnew5wavesB y Wsnew5wavesC, incrementan la resuspensión de material de fondo generada por el oleaje a través de la modificación de diversos parámetros vinculados con erosión y velocidad de caída. El

objetivo es mejorar la representación de la resuspensión de material de fondo durante los eventos de oleaje. En la Figura 4.21 se presenta la comparación de las series de concentración de sedimento en suspensión obtenidas con el modelo en los puntos de control PN, TO y Boya sobre el fondo de la columna de agua para las tres simulaciones mencionadas y Wsnew5waves.

Los resultados obtenidos en la simulación Wsnew5wavesA muestran un incremento importante de las concentraciones, en relación a los resultados de Wsnew5waves, durante los eventos con un comportamiento similar a las medidas. No obstante no se representan los valores de base de concentración en la zona interior e intermedia del Río de la Plata al no incluir el efecto de las tensiones de corte de las corrientes de marea en la resuspensión del material de fondo. Respecto a los resultados obtenidos en la simulación Wsnew5wavesB y la comparación con los resultados de Wsnew5waves; se observa hay leves incrementos de la concentración a pesar de que la disminución en la tensión de corte crítica de erosión es importante, de 0,21 N/m² a 0,1 N/m². Esto se debe a que solamente se considera en estas simulaciones el efecto del oleaje, donde los eventos que superan una tensión de corte de 0,1 N/m² en general superan los 0,21 N/m². En términos generales los resultados de esta simulación muestran valores bajos de concentración, con un leve aumento de la misma durante los eventos pero con concentraciones más bajas que las medidas. Por último los resultados obtenidos con la simulación Wsnew5wavesC muestran una excesiva resuspensión de material de fondo durante los eventos de tormenta. Se obtienen valores de concentración de base en la zona interior e intermedia del Río de la Plata levemente mayores a los obtenidos con las otras simulaciones debido a la disminución en las velocidades de caída definidas con la ley mf1 en relación a las correspondientes a la ley mf2 utilizada en las simulaciones wavesA y wavesB. No obstante, aunque se observa un incremento, las medidas muestran un valor mínimo cuasi constante mientras que el modelo muestra un decrecimiento continuo entre eventos.

En la Figura 4.22 se presentan los campos medio mensuales de la concentración de sedimento fino total en la capa de fondo y de superficie de la columna de agua para las simulaciones waves, wavesA, wavesB y wavesC. Se observa en la misma que, excepto para la simulación wavesC que genera fuertes resuspensiones de material de fondo, en la zona intermedia las concentraciones son muy leves. Se observa además el efecto del incremento de la resuspensión por oleaje en la distribución espacial de la concentración. Básicamente se incrementan las concentraciones en las zonas donde las tensiones de corte generadas por el oleaje son mayores, es decir, sobre la costa uruguaya en la zona intermedia y en toda la zona exterior. El campo de concentración obtenido en la zona interior corresponde básicamente a la descarga de los tributarios.

Los resultados mencionados muestran que claramente sin considerar el efecto de las tensiones de corrientes de marea no es posible representar la variabilidad de las señales de turbidez medidas en PN y en TO. El efecto del oleaje es resuspender sedimento de fondo en todo el Río de la Plata pero posteriormente la concentración disminuye a medida que el material deposita o se transporta hacia aguas abajo. En Pilote el aporte de los tributarios genera una concentración de base pero en Torre Oyarvide los valores son muy bajos. Estos resultados reafirman la importancia de la resuspensión por corrientes para representar los valores basales de concentración pero es importante recordar lo visto anteriormente sobre la dificultad de ajustar las concentraciones durante los eventos y durante las calmas. Para avanzar en el ajuste de las dos situaciones se analiza gradualmente el aporte de la resuspensión por las mareas incluyendo en nuevas configuraciones las tensiones de corte generadas por las corrientes en el cálculo de la tensión total pero multiplicadas por un factor menor a uno y se evalúa la sensibilidad del modelo a dichos cambios. De esta manera se representa una situación

con tensiones de corte por corrientes amortiguadas respecto a los casos anteriormente analizados. Con esta estrategia se definieron algunas simulaciones disminuyendo las tensiones generadas por corrientes de marea cuatro veces (simulaciones del tipo tc4).

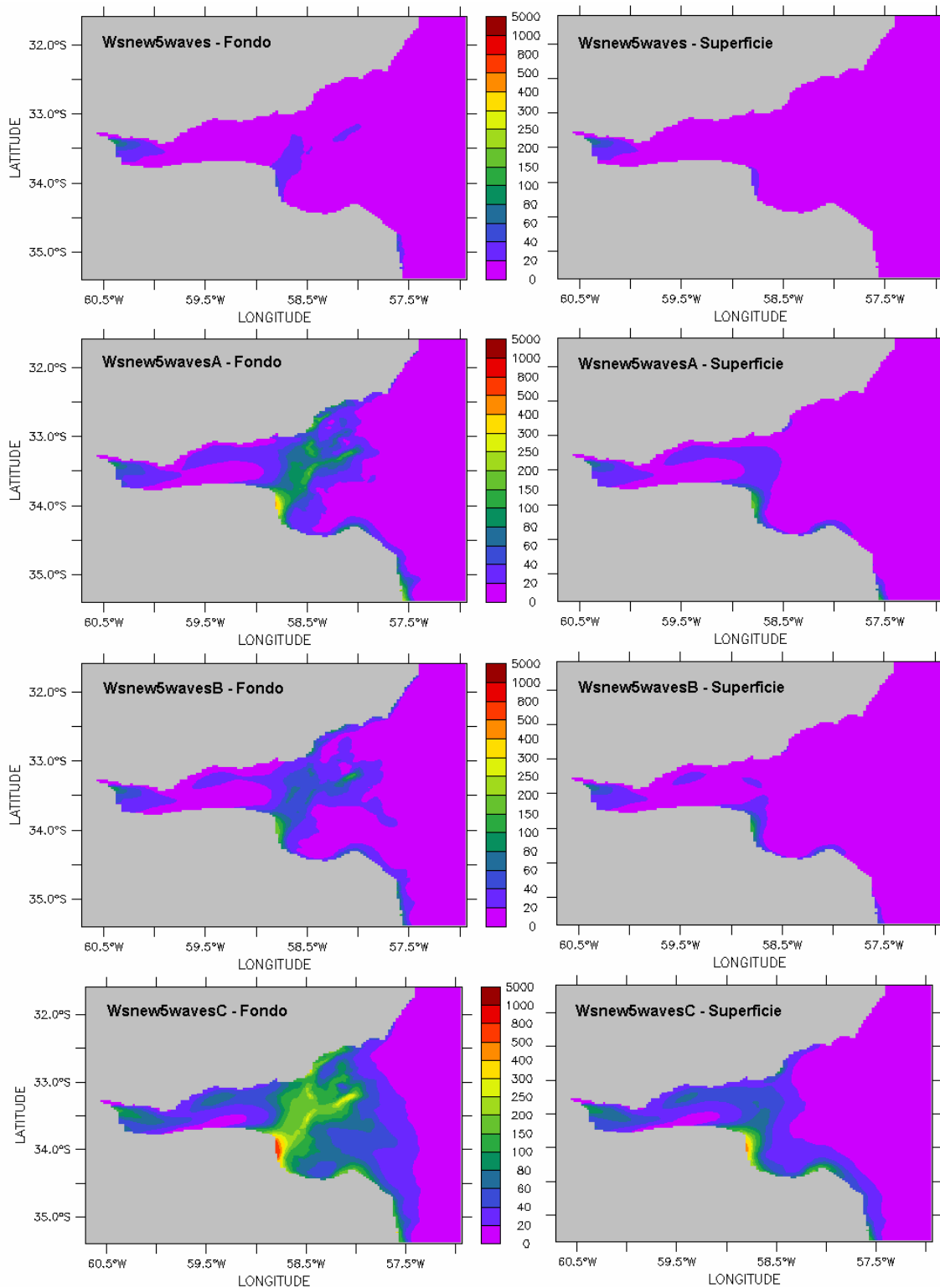


Figura 4.22: Distribución espacial promedio durante agosto 2010 de la concentración de sedimento fino total obtenida con el modelo en fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) en la simulación Wsnew5waves (paneles superiores), Wsnew5wavesA (paneles intermedios superiores), Wsnew5wavesB (paneles intermedios inferiores) y Wsnew5wavesC (paneles inferiores).

Los resultados obtenidos con la simulación *Wsnew6tc4* (ver Anexo C.3.2) muestran por un lado valores altos de concentración de sedimento en suspensión durante los eventos de tormenta y valores basales de concentración similares a los datos durante los períodos de calma (en Torre Oyarvide). Se realizó la misma simulación considerando solo el efecto de las tensiones de corte de las corrientes de marea en la resuspensión, es decir, no se consideró el oleaje (*Wsnew6tc4corr*). Los resultados obtenidos en la misma muestran una variabilidad temporal de sedimento en suspensión similar a la que muestran las medidas durante todo el período simulado (agosto 2010) en la zona interior e intermedia sin el incremento de concentración asociado a las tormentas. Los valores medios se reproducen correctamente. En la zona exterior el modelo reproduce una situación casi sin sedimento en suspensión. Por otra parte, para poder comparar el efecto de cada forzante por separado se realizó la simulación con los mismos parámetros que *Wsnew6tc4* pero considerando solamente el efecto de las tensiones de corte del oleaje en la resuspensión de material de fondo (*Wsnew6tc4wave*). Los resultados muestran que durante los eventos hay mucha resuspensión de material de fondo y una permanencia de material en suspensión posterior a los mismos mayor a la que muestran los datos.

La comparación de los resultados de estas tres simulaciones (*Wsnew6tc4*, *Wsnew6tc4corr* y *Wsnew6tc4wave*) permite identificar claramente qué parte de la variabilidad de los datos corresponde a la resuspensión de material de fondo de las mareas y qué parte corresponde a las tormentas. En la Figura 4.23 se presenta dicha comparación en las estaciones de control PN, TO y Boya. Es importante observar en primer lugar, la disminución en los máximos valores de las tensiones de corte totales en PN y TO, (mediante la comparación con por ejemplo los valores presentados en la Figura 4.20) debido a la disminución en un factor $\frac{1}{4}$ de la tensión de corte generada por las corrientes de marea. Se observa en los tres puntos de control el efecto de resuspensión por el oleaje es relevante en proporción a lo que se resuspende por corrientes de marea. Lo que sucede en la Boya es un caso extremo de esta situación, donde el oleaje predomina frente a las corrientes de marea en la tensión total, pues no hay grandes diferencias entre las simulaciones *Wsnew6tc4* y *Wsnew6tc4wave*, mientras que los valores obtenidos con la simulación *Wsnew6tc4corr* son muy bajos. La dinámica que muestran las curvas de concentración en Pilote Norden y en Torre Oyarvide es bien diferente. La simulación sólo con corrientes genera curvas de concentración con poca variabilidad en el mes mientras que la simulación sólo con oleaje genera picos (eventos) de alta concentración. La simulación completa *Wsnew6tc4* toma ambos aportes y como resultado los valores basales son mayores a los representados en la simulación *Wsnew6tc4corr* y las concentraciones durante los eventos de tormenta son también mayores a los obtenidos con la simulación *Wsnew6tc4wave*; es decir, hay una adición de sedimento resuspendido por ambos forzantes. Esto es razonable y esperable pero desde el punto de vista del ajuste del modelo es importante tenerlo en cuenta: podemos representar la resuspensión por marea analizando un período sin tormenta o representar la resuspensión por tormenta trabajando con la zona de la Boya, pero al considerar ambos forzantes surge un tercer caso que corresponde a la actuación conjunta de eventos de tormenta y corrientes de marea meteorológica. Esto sucede principalmente en la zona interior e intermedia, caracterizada en este trabajo por las estaciones de control de Pilote Norden y Torre Oyarvide.

Esto se observa claramente en la Figura 4.24 donde se presentan las distribuciones espaciales medias mensuales en fondo y superficie de la concentración de sedimento en suspensión para las simulaciones *Wsnew6tc4*, *Wsnew6tc4corr* y *Wsnew6tc4wave*. Se observa la gran diferencia en los patrones medios de concentración entre la simulación que considera sólo el efecto de la tensión de corte de las corrientes de marea en la tensión total (*Wsnew6tc4corr*) y la que considera solo la tensión del oleaje (*Wsnew6tc4wave*), asociada principalmente a las distribuciones medias de ambos

forzantes. Cuantitativamente las concentraciones de la simulación *Wsnew6tc4corr* son menores a cuando se utilizan las tensiones del oleaje. Se observa además la simulación completa presenta una distribución espacial que incluye ambos efectos.

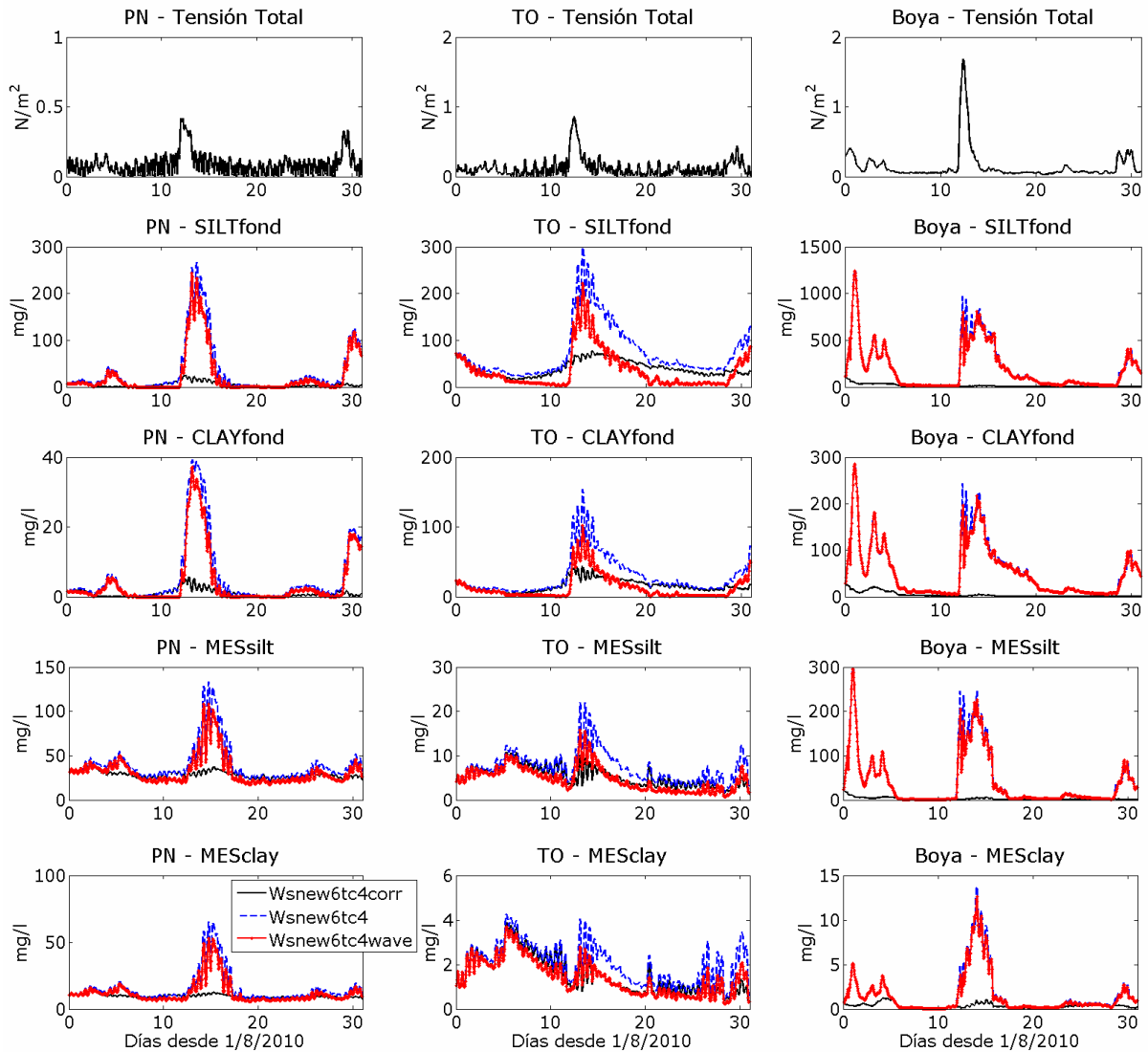


Figura 4.23: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión (SILTfond, CLAYfond, MESSilt y MESclay) obtenida en la capa de fondo en Pilote Norden (paneles izquierdos), Torre Oyarvide (paneles centrales) y en la Boya oceanográfica (paneles derechos) para las simulaciones *Wsnew6tc4*, *Wsnew6tc4corr* y *Wsnew6tc4wave*. Se agrega la tensión de corte de fondo como referencia. Agosto 2010.

La simulación denominada *Wsnew7tc4* considera una menor tasa de resuspensión de material de fondo que la simulación *Wsnew6tc4*, y una ley diferente de velocidad de caída para la arcilla. El objetivo de la misma es reproducir en el modelo concentraciones de sedimento en suspensión producto de la resuspensión de material de fondo durante eventos de altas tensiones (producto del efecto conjunto de oleaje y corrientes de marea) pero menores a las obtenidas con la simulación *Wsnew6tc4*. Se realizó también la simulación *Wsnew7*, con los mismos parámetros pero considerando la totalidad de las tensiones de fondo de corrientes en el cálculo de la tensión total, con el objetivo de analizar exactamente el efecto en las curvas de concentración de la disminución de las tensiones por marea del factor igual a $\frac{1}{4}$. Los resultados obtenidos con la configuración *Wsnew7tc4* (ver Anexo C.3.2) muestran una variabilidad temporal de las curvas similar

a la simulación *Wsnew6tc4* con concentraciones considerablemente más bajas, producto de los cambios implementados en los parámetros (Figura 4.25). Al realizar la comparación con los datos, el cambio es muy fuerte pues el modelo pasa de una situación de sobrestimación de las concentraciones (configuración *Wsnew6tc4*) a una situación de subestimación de las mismas (configuración *Wsnew7tc4*).

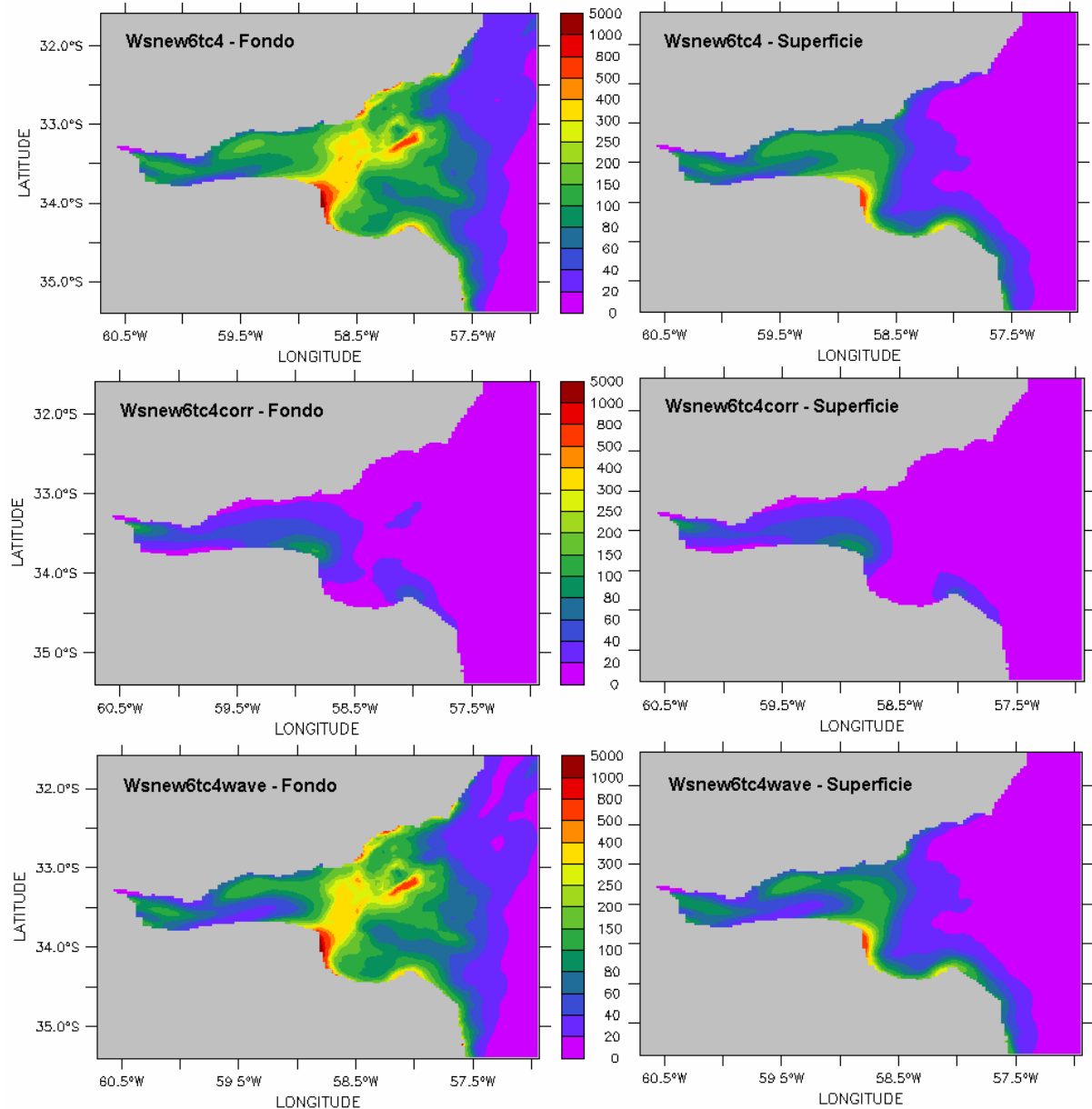


Figura 4.24: Distribución espacial promedio durante agosto 2010 de la concentración de sedimento fino total obtenida con el modelo en fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) en la simulación *Wsnew6tc4* (paneles superiores), *Wsnew6tc4corr* (paneles intermedios) y *Wsnew6tc4wave* (paneles inferiores).

La comparación de los resultados obtenidos en las simulaciones *Wsnew7tc4* y *Wsnew7* permite analizar la sensibilidad de la concentración de sedimento en la columna de agua a la disminución de las tensiones de corte de fondo por corrientes de marea (Figura 4.25). Se observa el efecto en las estaciones PN y TO es grande con una disminución de la concentración en suspensión durante todo el mes. No obstante la variabilidad temporal de la concentración es similar en ambas simulaciones. En la zona

de la Boya las diferencias son menores ya que la influencia de las tensiones de corte de fondo de las corrientes en dicha zona es baja. En la Figura 4.26 se presentan los campos medios mensuales de concentración en suspensión en fondo y en superficie para ambas simulaciones. Se observa claramente la gran influencia de la disminución del efecto de las corrientes de marea en toda la zona intermedia del Río de la Plata.

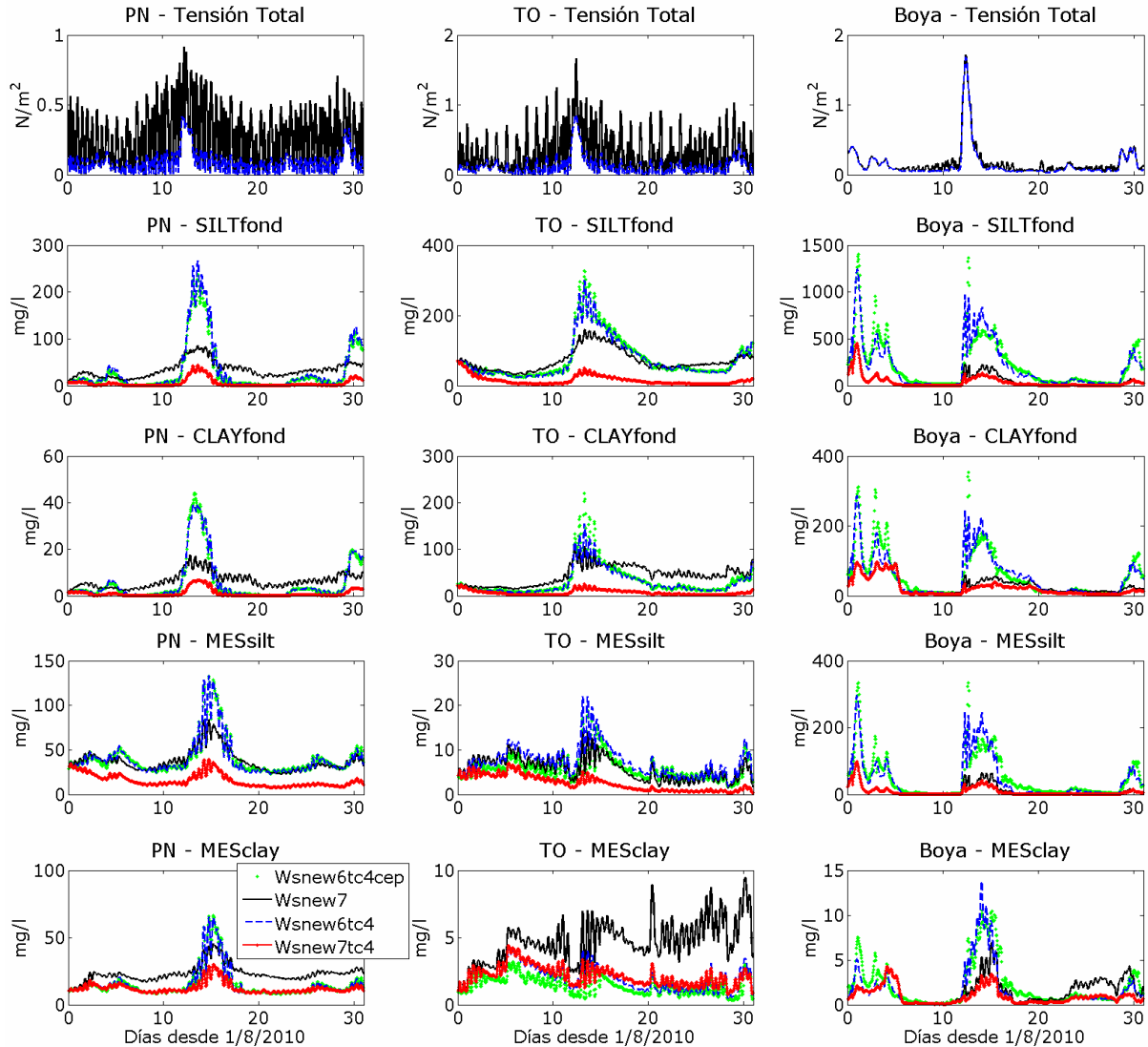


Figura 4.25: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión (SILTfond, CLAYfond, MESsilt y MESclay) obtenida en la capa de fondo en Pilote Norden (paneles izquierdos), Torre Oyarvide (paneles centrales) y en la Boya oceanográfica (paneles derechos) para las simulaciones Wsnew6tc4, Wsnew7tc4, Wsnew7 y Wsnew6tc4cep. Se agrega la tensión de corte de fondo como referencia. Agosto 2010.

Por último, se realizó la simulación Wsnew6tc4cep que mantiene los parámetros definidos para la simulación ya analizada Wsnew6tc4 pero utiliza para forzar el modelo hidrodinámico de marea y de sedimentos fino MARS la información de vientos denominada CEP en vez de los vientos NCEP. Al comparar los resultados obtenidos con los datos (ver Anexo C.3.2) se observa el mismo comportamiento mencionado anteriormente; el modelo representa en general el comportamiento durante períodos de calma pero sobrestima las concentraciones medidas durante las tormentas. No obstante, la comparación entre las simulaciones Wsnew6tc4cep y Wsnew6tc4 permite evaluar el efecto sobre la dinámica de sedimentos finos de las diferencias del campo hidrodinámico

generado por los vientos CEP y NCEP, respectivamente (Figura 4.25). Se observa en la zona interior los resultados cambian levemente al modificar los vientos. En cambio en la zona de Torre Oyarvide y en la zona exterior la influencia es mayor pues el viento genera mayores modificaciones sobre el campo hidrodinámico. En particular en la Boya las diferencias responden principalmente a diferencias en la dinámica del campo de salinidad, la cual es muy sensible al forzante viento según lo visto en el Capítulo 3. En la Figura 4.26 se presentan los campos medios mensuales de concentración de sedimento en suspensión sobre el fondo y en la superficie, para la simulación con vientos CEP. Se observa los mismos son muy similares a los presentados en la Figura 4.24 correspondientes a la simulación Wsnew6tc4 pero con vientos NCEP.

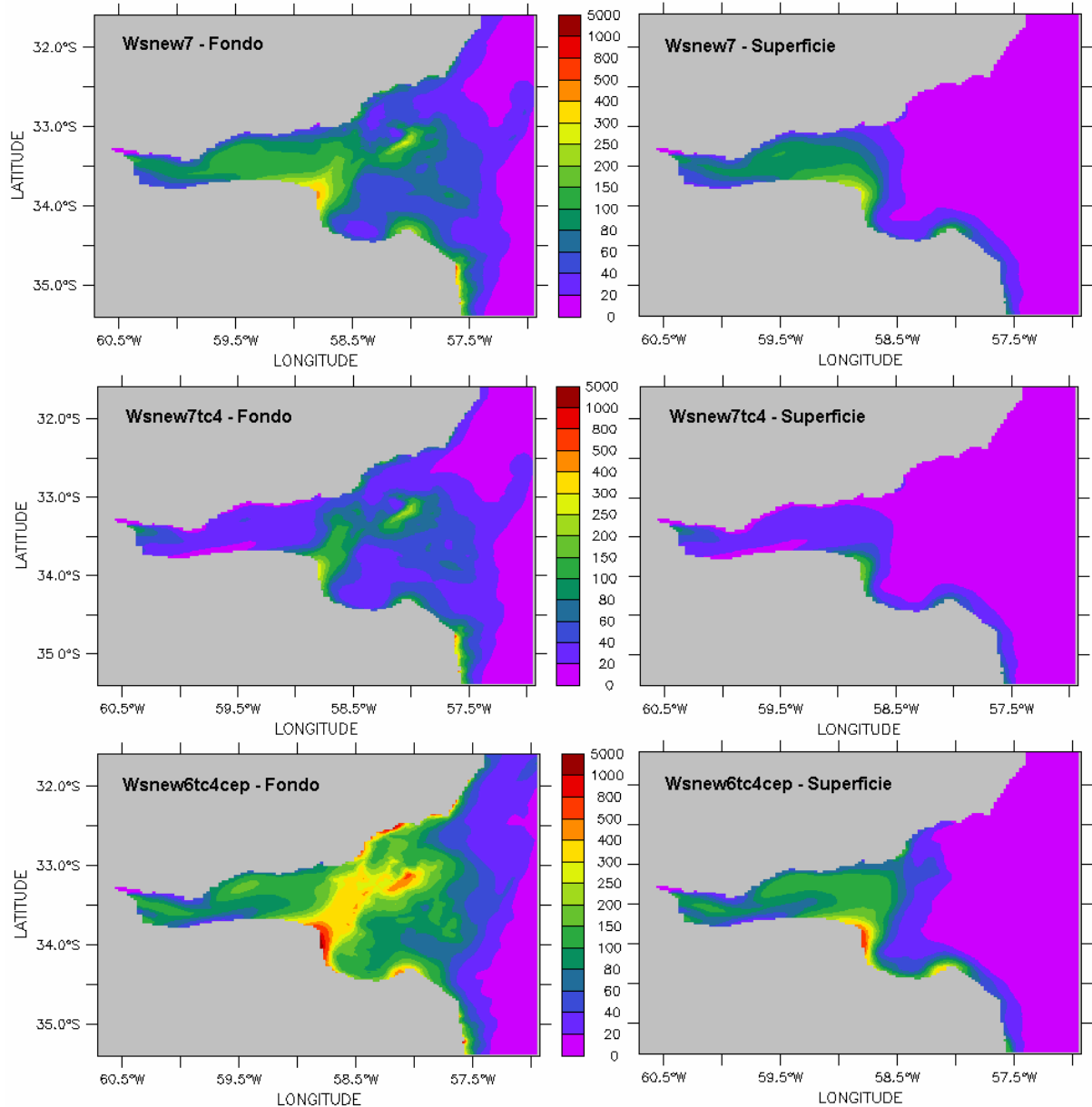


Figura 4.26: Distribución espacial promedio durante agosto 2010 de la concentración de sedimento fino total obtenida con el modelo en fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) en la simulación Wsnew7 (paneles superiores), Wsnew7tc4 (paneles intermedios) y Wsnew6tc4cep (paneles inferiores).

4.5.2.3. Síntesis

En la segunda etapa de ajuste del modelo mediante la realización de diversos análisis de sensibilidad se definieron diversas simulaciones con el objetivo de determinar la influencia de las corrientes de marea y del oleaje en los procesos de resuspensión de sedimento de fondo.

Por un lado se realizaron una serie de simulaciones considerando solamente la resuspensión del sedimento de fondo generada por tensiones de corte producidas por eventos de tormenta. Se observó la dinámica de sedimentos finos asociada muestra valores muy bajos de concentración de sedimento en suspensión en la zona intermedia del Río de la Plata y valores altos en la zona exterior. Esto se debe principalmente al predominio de las tensiones de corte de fondo generadas por el oleaje en la zona exterior.

Posteriormente se definieron varias simulaciones donde se incluyó nuevamente en el modelo el efecto de la resuspensión de material de fondo por las corrientes de marea pero en estos casos de manera amortiguada. El análisis de los resultados obtenidos en las diversas simulaciones realizadas muestran una gran influencia en los valores y en la variabilidad de la concentración del sedimento en suspensión en la zona intermedia del Río de la Plata. Además, se observó que durante los eventos de tormenta hay un efecto combinado de ambos forzantes en dicha zona, a diferencia de lo que sucede por ejemplo en la zona exterior donde el oleaje determina la dinámica de resuspensión.

Por último, se analizó en esta etapa el efecto sobre la dinámica de sedimentos finos de la modificación del forzante viento del modelo hidrodinámico y de sedimentos finos MARS, utilizando vientos CEP en sustitución de los vientos NCEP. El efecto se observa principalmente en la zona exterior del Río de la Plata donde la dinámica del campo salino tiene gran influencia en la dinámica de sedimento fino. No obstante no es posible afirmar, desde el punto de vista de la dinámica de sedimento fino, qué base de datos de Re-análisis de vientos genera mejores resultados. Sin embargo se considera que las mejoras obtenidas en el modelo hidrodinámico directamente producen una mejora en el modelo de sedimentos finos. Se establece entonces el uso de los vientos tipo CEP en las simulaciones que se realizaran de aquí en adelante.

4.5.3. Etapa 3

4.5.3.1. Metodología

Durante esta etapa se analizó el efecto de la variabilidad espacial de la composición del sedimento de fondo, y por tanto de la rugosidad, sobre las tensiones de corte de fondo determinadas en el MARS. Como se explicó en el Capítulo 3, el MARS considera el parámetro z_{0sed} , que depende de la composición del material de fondo, en el cálculo de las tensiones de corte de fondo de las corrientes y del oleaje. Durante la etapa de determinación de las tensiones de corte de fondo (Sección 3.4) se seleccionó el valor de dicho parámetro igual a 0,1 mm y por tanto en todas las simulaciones vinculadas a los análisis de sensibilidad realizados se utilizó dicho valor de z_{0sed} .

No obstante, analizando la variabilidad espacial en la composición del sedimento de fondo del Río de la Plata, se ha observado que en la zona interior-intermedia se encuentran básicamente limos y en la zona exterior predominan los barros o materiales con predominio de arcilla (ver Capítulo 2). Debido a esto en esta etapa se explora el efecto de introducir la variación espacial del parámetro z_{0sed} en respuesta a la variación espacial de la composición del material de fondo. Para determinar la zonificación de dicho parámetro se utilizó como referencia la información del diámetro medio de las muestras de sedimento de fondo extraídas en las campañas 2 a 5 de medición. No se incluyó la información del diámetro medio obtenida de los datos recolectados en la

campaña 1 por presentar valores apartados de los restantes en varias estaciones. Además, para determinar la variación relativa frente al parámetro utilizado $z_{0sed}=0,1$ mm se toma como hipótesis que el mismo corresponde a la zona de materiales más finos y en concreto que se corresponde con el D_{50} en la estación #22 ($6,25 \mu$). Por tanto se toma como referencia la información de dicha estación y se calcula de forma lineal el parámetro z_{0sed} en las restantes estaciones en función de la variación del D_{50} en cada una respecto al D_{50} de sedimento de fondo de la Boya.

ESTACIÓN	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4	Campaña 5	Promedio D_{50} (μ)	z_{0sed} (mm)
	D_{50} (μ)	D_{50} (μ)	D_{50} (μ)	D_{50} (μ)		
#1	19.73	19.22	19.96	---	19.64	0.3
#2	34.15	31.63	41.00	---	35.59	0.6
#3	27.89	26.86	24.74	---	26.50	0.4
#5	19.61	16.71	17.04	17.83	17.80	0.3
#6	26.66	24.83	20.10	24.66	24.06	0.4
#7	25.18	37.69	21.62	21.89	26.60	0.4
#8	6.55	19.77	19.26	15.13	15.18	0.2
#9	23.24	18.34	22.91	25.31	22.45	0.4
#10	21.51	20.42	20.47	21.65	21.01	0.3
#11	7.89	8.36	8.32	10.08	8.66	0.1
#12	15.36	16.38	19.11	14.04	16.22	0.3
#13	19.91	19.38	11.17	14.55	16.25	0.3
#14	5.54	4.43	5.24	4.93	5.04	0.1
#15	9.84	8.00	5.85	7.40	7.77	0.1
#15bis	5.52	6.58	5.13	5.55	5.70	0.1
#16	6.52	10.11	5.09	7.28	7.25	0.1
#17	4.87	4.28	5.34	5.17	4.92	0.1
#18	4.46	4.72	4.05	4.76	4.50	0.1
#19	159.00	167.16	220.40	166.60	178.29	2.8
#20	4.25	4.14	4.65	4.62	4.42	0.1
#21	6.03	5.16	4.44	4.73	5.09	0.1
#22	5.50	4.77	5.95	8.86	6.27	0.1
#23	4.14	15.32	6.21	6.96	8.16	0.1
#24	5.94	7.50	6.69	8.94	7.27	0.1
#25	4.66	4.87	9.22	4.98	5.93	0.1
#26	4.63	4.55	5.42	6.29	5.22	0.1

Tabla 4.7: Determinación del valor del coeficiente z_{0sed} (mm) en función del diámetro medio del sedimento de fondo en las estaciones de monitoreo.

En la Tabla 4.7 se presentan los valores del D_{50} para cada campaña, el valor medio obtenido y el valor de z_{0sed} calculado para cada estación de monitoreo. Según la relación de referencia definida se observa básicamente que el valor de 0,1 mm sería válido para toda la zona donde predominan las arcillas (zona exterior), y en la zona interior e intermedia donde predominan los limos los valores de z_{0sed} son mayores. Para la estación #19 donde el material de fondo es arena el valor de rugosidad z_{0sed} se incrementa a casi 3 mm. Cruzando con el código de Laborde determinado para cada estación se obtiene que en las estaciones clasificadas como limo (código 4) de la zona intermedia del Río de la Plata el valor de rugosidad de 0,4 mm sería el apropiado.

En función de estos resultados se definieron diversas simulaciones considerando la variabilidad espacial de la rugosidad de fondo en función del tipo de material, las cuales se presentan en la Tabla 4.8. En primer lugar utilizando la distribución de material de fondo de Laborde se diferencian valores de z_{0sed} para el material tipo limo definido por el código 4 (0,4 mm); el material tipo arena de código 1 (3 mm) y el resto de los materiales con el valor original de 0,1 mm. Esta distribución espacial de rugosidad de fondo se denomina z0var. Se utilizaron los mismos parámetros de erosión y velocidad de caída definidos para la simulación denominada Wsnew7 de formar de analizar la sensibilidad de la variación en la rugosidad de fondo. En segundo lugar se definió la simulación Wsnew9z0cep en la cual se utiliza la ley de velocidad de caída mf3 que incrementa las velocidades respecto a las leyes mf1 y mf2 utilizadas en la configuración Wsnew7z0var. Además, se analiza con esta simulación el efecto de considerar variación de rugosidad de fondo diferenciando solamente la zona de material tipo limo con el valor de rugosidad de 0,4 mm. Esta distribución espacial de rugosidad de fondo se denomina z0. Por último, se define la simulación Wsnew9z02cep en la cual se considera la ampliación de la zona de material tipo limo (código 4) en la parte intermedia del Río de la Plata en función de la nueva información sobre composición del fondo surgida en las campañas del Proyecto según el análisis realizado en el Anexo C.1. Los resultados de dicho análisis indicaron que en las estaciones #5, #6, #7, #8, #12 y #13 una clasificación tipo 4 es más apropiada que la determinada por Laborde. Extendiendo esta reclasificación a las zonas cercanas es posible definir una nueva distribución espacial de material de fondo que incorpora las variaciones obtenidas de los nuevos datos sobre la zona intermedia del Río de la Plata. La misma se presenta en la Figura 4.27 y se denomina Laborde Modificado. Al comparar con la distribución de Laborde original (Figura 4.3) se observa se ha extendido la zona correspondiente al código 4 en la zona intermedia del Río de la Plata. Al incorporar las estaciones mencionadas al código 4 se modifica el valor representativo de rugosidad de dicha zona a un valor igual a 0,35 mm. Esta distribución espacial de rugosidad de fondo se denomina z02.

Simulación	Ws (mm/s y mg/l)		Erosión		Deposición	Mapa Composición del Fondo	Rugosidad de fondo (z_{0sed})
	Ws limo	Ws arcilla	τ_{ce} (N/m ²)	E_0 (kg/m ² s)	τ_{cd} (N/m ²)		
Wsnew7z0var	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	ley mf2 [0,02; 0,5; 2000]	0,1	1×10^{-06}	0,1	Laborde	Limos: 0,4 mm Arenas: 1 mm Resto materiales: 0,1 mm
Wsnew9z0cep **	ley mf3 [0,015; 3; 10000]	ley mf3 [0,015; 3; 10000]	0,1	1×10^{-06}	0,1	Laborde	Limos: 0,4 mm Resto materiales: 0,1 mm
Wsnew9z02cep **	ley mf3 [0,015; 3; 10000]	ley mf3 [0,015; 3; 10000]	0,1	1×10^{-06}	0,1	Laborde Modificado	Limos: 0,35 mm Resto materiales: 0,1 mm

** se utilizan los vientos CEP en el modelo hidrodinámico de marea en vez de los vientos NCEP

Tabla 4.8: Parámetros modificados en las diversas simulaciones realizadas en la etapa 3 de los análisis de sensibilidad integrados.

Es importante aclarar la primer simulación donde se analizó la variabilidad espacial de la rugosidad de fondo (Wsnew7z0var) es forzada por los vientos NCEP para el modelo hidrodinámico del MARS. En cambios en las restantes dos simulaciones, Wsnew9z0cep y Wsnew9z02cep, se utilizan los vientos CEP para forzar el modelo hidrodinámico ya que se obtienen mejores resultados (ver Capítulo 3). Se simuló el mes de agosto de 2010 para el caso Wsnew7z0var y los meses de julio y agosto de 2010 en las restantes dos simulaciones definidas en la etapa 3 de los análisis de sensibilidad integrados.

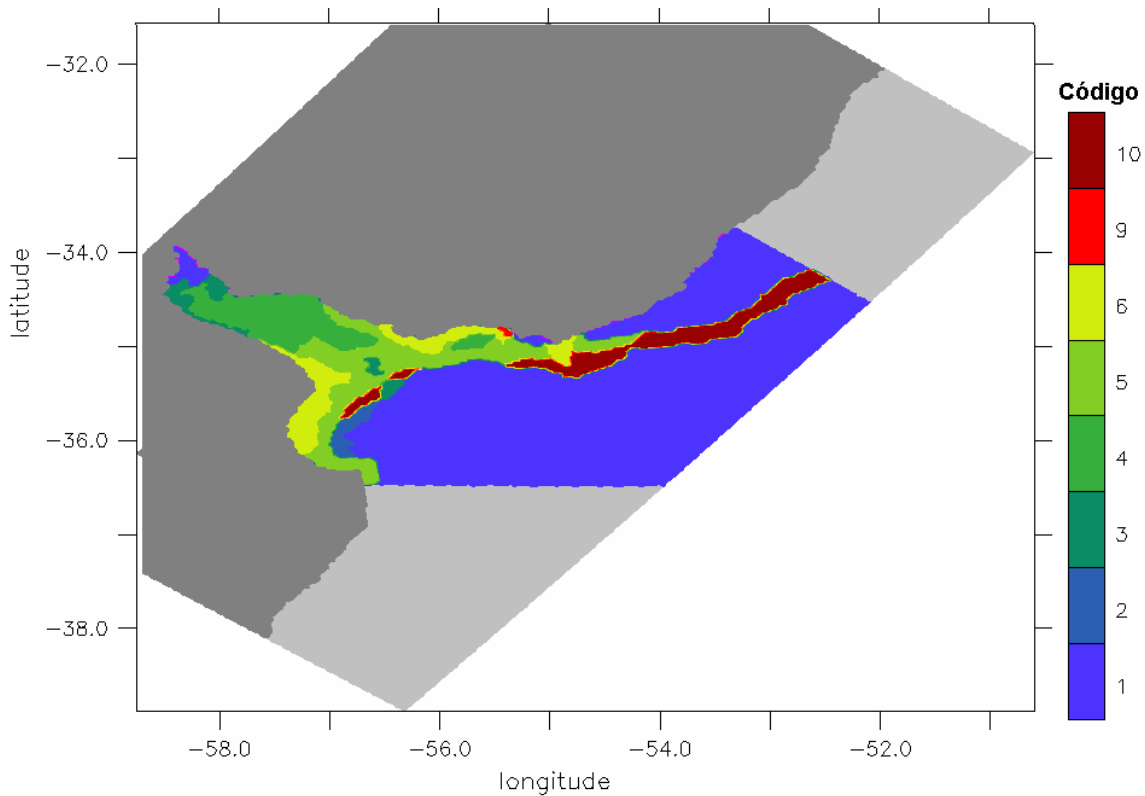


Figura 4.27: Representación del mapa de Laborde Modificado de composición de sedimento de fondo en el Río de la Plata.

4.5.3.2. Resultados

En términos generales el efecto de incrementar el valor de z_{0sed} es aumentar los valores de tensiones de corte de fondo generadas por corriente y por oleaje, y por tanto de la tensión de corte total. Los resultados obtenidos en la simulación *Wsnew7z0var* muestran concentraciones elevadas de sedimento en suspensión en comparación con las medidas en las estaciones fijas (Anexo C.3.3). La comparación con los resultados de la simulación *Wsnew7* permite analizar el efecto de la variación de la rugosidad de fondo sobre la concentración de sedimento en suspensión. En la Figura 4.28 se presenta dicha comparación. Para la tensión de corte de fondo en Pilote Norden se observa la diferencia en la tensión de corte total producto del incremento en el parámetro de rugosidad. En dicha estación hay un incremento de la concentración de sedimento en suspensión producto de la mayor erosión con una variabilidad temporal similar a la simulación *Wsnew7*. En Torre (donde no se modificaron las tensiones de corte de fondo) los valores de concentración son muy similares. En la Boya se observan diferencias en la concentración luego de eventos de tormentas importantes, a pesar de que las tensiones de corte en la celda correspondiente y zonas aledañas no fueron modificadas. Esto indica en esta zona el transporte de material desde zonas más alejadas es un factor importante en la concentración del material en suspensión.

En la simulación denominada *Wsnew9z0cep* se elimina la modificación de rugosidad de fondo en las zonas de código 1. Además, se definen velocidades de caída de los sedimentos finos menores a las anteriormente consideradas con el objetivo de disminuir los valores de concentración en suspensión y se utilizan los vientos tipo CEP en el modelo hidrodinámico. Como consecuencia las tensiones de corte de fondo totales promedio mensuales muestran valores razonables en todo el dominio con un incremento, respecto a la simulación *Wsnew7* de rugosidad uniforme, de los valores en la zona exterior e interior-intermedia sobre la costa uruguaya. Respecto a la concentración de

sedimento en suspensión, los resultados obtenidos muestran valores elevados en relación a los datos (Anexo C.3.3).

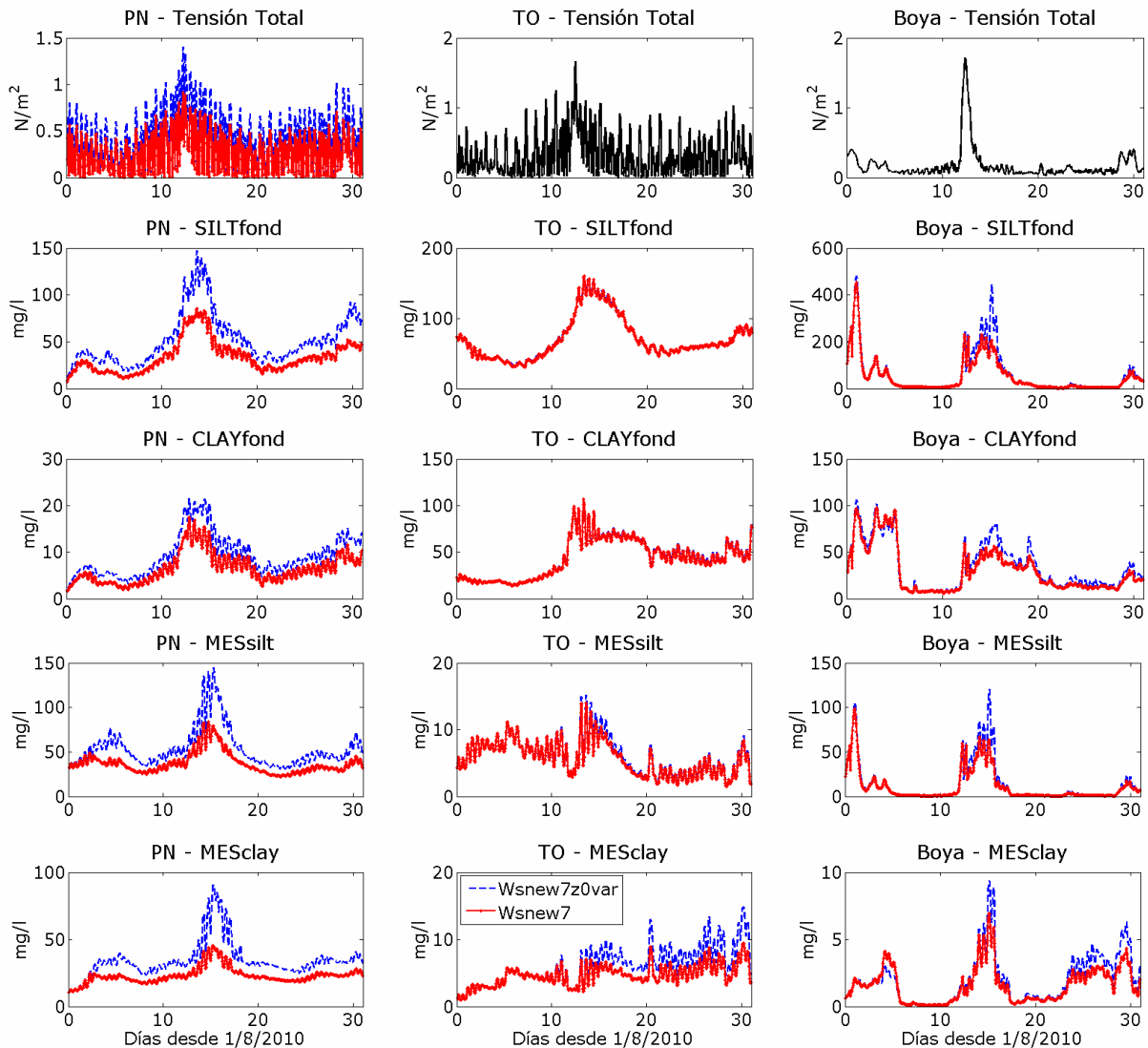


Figura 4.28: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión (SILTfond, CLAYfond, MESsilt y MESclay) obtenida en la capa de fondo en Pilote Norden (paneles izquierdos), Torre Oyarvide (paneles centrales) y en la Boya oceanográfica (paneles derechos) para las simulaciones Wsnew7 y Wsnew7z0var. Se agrega la tensión de corte de fondo como referencia. Agosto 2010.

En la Figura 4.29 se presentan las concentraciones medias mensuales en la columna de agua sobre el fondo y cerca de la superficie para las tres simulaciones de ésta etapa. Al comparar los campos de la simulación Wsnew9z0cep con los de la simulación Wsnew7z0var se observa disminuyen las concentraciones medias en el fondo en la zona exterior mientras que en el frente y en la zona intermedia se observa un leve incremento. Sobre la superficie la variabilidad espacial de la concentración media difiere en la zona intermedia contra la zona exterior, debido principalmente a los efectos del campo de vientos sobre el modelo hidrodinámico.

Por último, en la simulación Wsnew9z02cep se extiende el área asociada a los limos (mayor rugosidad en relación al resto del dominio) producto del análisis de los nuevos datos de campo. Como resultado, las tensiones de fondo se incrementan respecto a la simulación anterior sobre la zona intermedia del Río de la Plata y en consecuencia la

distribución espacial de la concentración media varía en dicha zona principalmente (Figura 4.29). La comparación de los resultados obtenidos en las simulaciones Wsnew9z0cep y Wsnew9z02cep (Figura 4.30) en las estaciones fijas muestra leves variaciones de las concentraciones en Pilote Norden y en la Boya, y un incremento de concentración en Torre Oyarvide producto de las mayores tensiones de corte de fondo en las zonas aledañas al extender el área de mayor rugosidad.

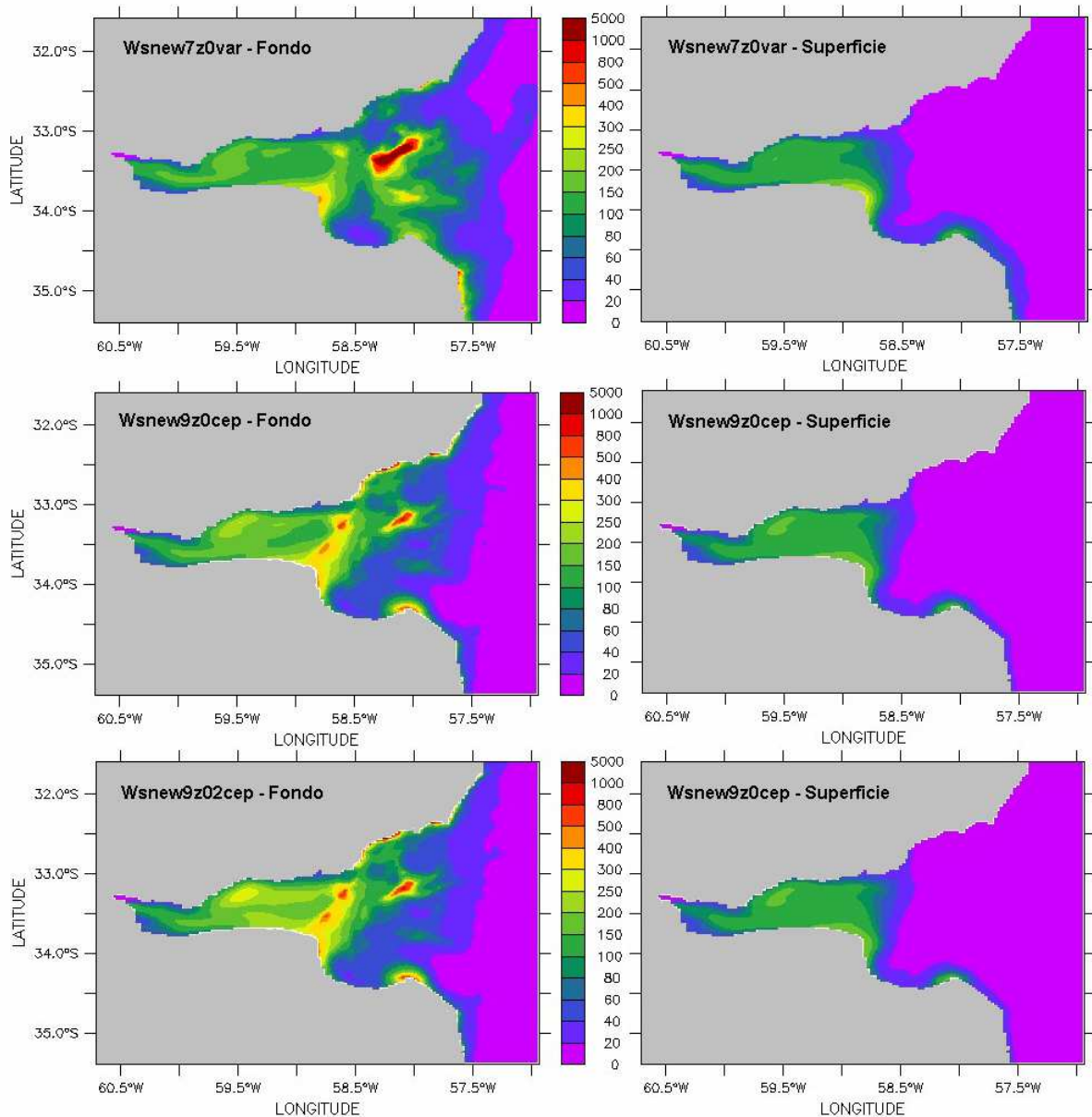


Figura 4.29: Distribución espacial promedio durante agosto 2010 de la concentración de sedimento fino total obtenida con el modelo en fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) en la simulación Wsnew7z0var (paneles superiores), Wsnew9z0cep (paneles intermedios) y Wsnew9z02cep (paneles inferiores).

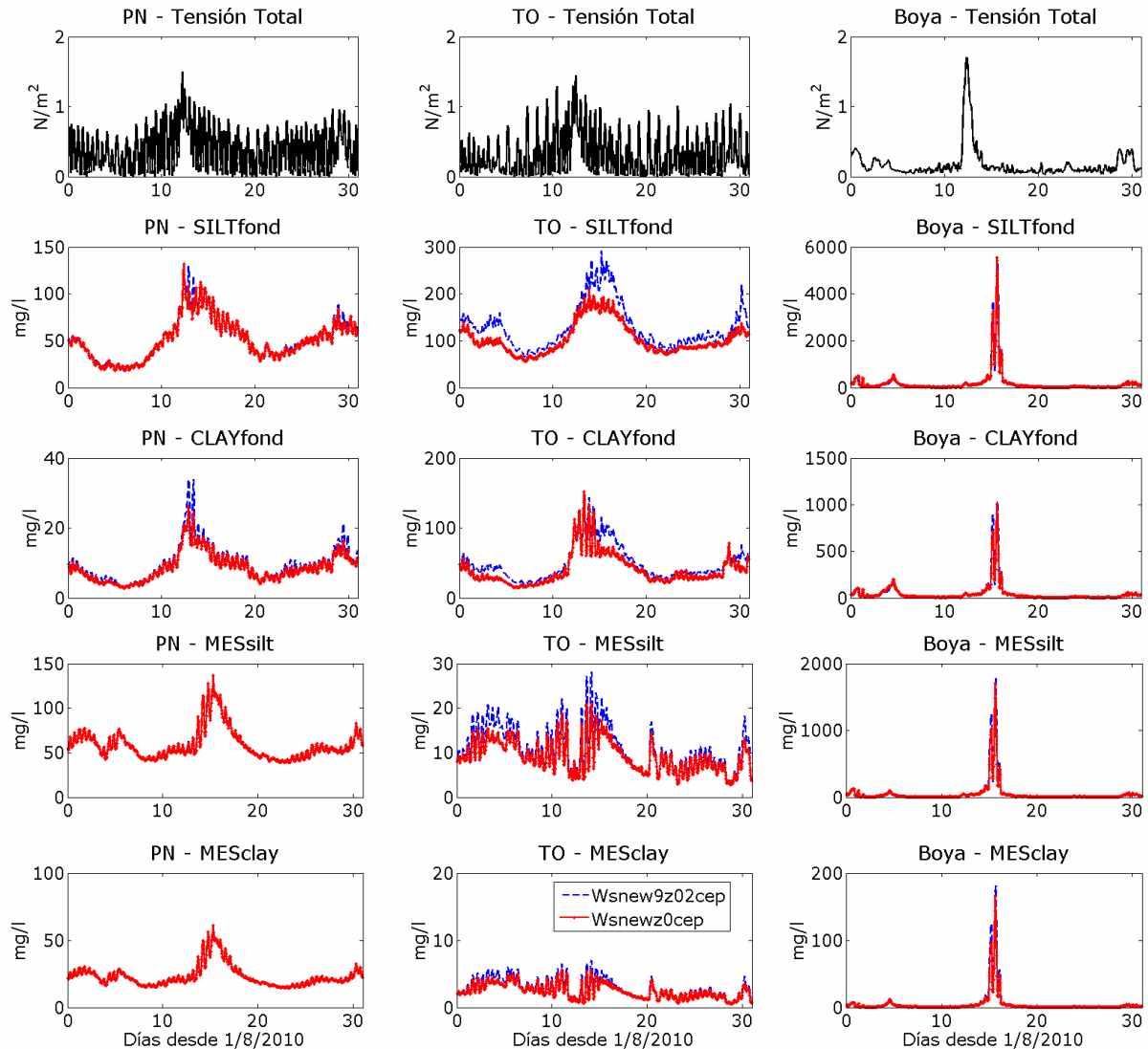


Figura 4.30: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión (SILTfond, CLAYfond, MESSilt y MESclay) obtenida en la capa de fondo en Pilote Norden (paneles izquierdos), Torre Oyarvide (paneles centrales) y en la Boya oceanográfica (paneles derechos) para las simulaciones Wsnew9z0cep y Wsnew9z02cep. Se agrega la tensión de corte de fondo como referencia. Agosto 2010.

4.5.3.3. Síntesis

En esta sección se analizó la sensibilidad del modelo y el ajuste de las medidas al incorporar en las simulaciones el efecto de la variación espacial del sedimento de fondo en la rugosidad. Tomando como referencia la información del diámetro medio de las muestras de material de fondo extraídas en el Proyecto FREPLATA-FFEM se determinaron las zonas de mayor variabilidad. Las mayores diferencias se observan entre las zonas interior e intermedia donde predominan los limos, y la zona exterior donde predominan los materiales de mayor contenido de arcilla. Se exploraron en consecuencia tres alternativas de distribución espacial de rugosidad de fondo diferentes, con mayores valores cuánto mayor sea el grano medio del material. Los resultados muestran un incremento de las tensiones de corte de fondo en las zonas donde fue incrementada la rugosidad. En consecuencia se observa un incremento del material en suspensión principalmente en las zonas de aumento de rugosidad y zonas aledañas. En relación al ajuste de los datos en términos generales no hay una mejora de la representación de las medidas pues el modelo determina mayores concentraciones de

sedimento en suspensión que las medidas principalmente en la zona interior e intermedia. No obstante conceptualmente se consideraría correcto incluir en el modelo la variabilidad espacial de la rugosidad de fondo.

4.5.4. Etapa 4

4.5.4.1. Metodología

En esta etapa de los análisis de sensibilidad se considera un modelo conceptual en el cual se define un valor muy alto de tensión de corte de deposición y no igual a la tensión de erosión crítica como se venía trabajando. De esta manera se habilita la deposición del material que está en el fondo en cualquier instante de tiempo, y ocurre la erosión solamente en los casos que se supere el flujo de deposición. Esta modificación se realiza con el objetivo de disminuir la cantidad de sedimento en suspensión que calcula el modelo pues se superan ampliamente los valores de concentración medidos.

Comprenden esta etapa una serie de simulaciones que se definieron de forma de ajustar el modelo de sedimentos finos, y cuyas características se presentan en la Tabla 4.9. Manteniendo todas las características de la simulación de la etapa 3 *Wsnew9z02cep* salvo la tensión crítica de deposición se definió la simulación *Wsnew9z02cepd*. Las simulaciones *Wsnew9e04* y *Wsnew9e05* son leves modificaciones de la anterior en las cuales se incrementa la tasa de resuspensión con el objetivo de ajustar los datos. En función de los resultados se definieron las simulaciones *Wsf01*, *Wsf02*, *Wsf03* y *Wsf04*, en las cuales se fijan las leyes de velocidad de caída para el limo y la arcilla (denominadas *Wsfs* y *Wsfc*, respectivamente), y se modifica gradualmente la tasa de resuspensión. La simulación denominada *Wsf1e02* es una variante de la simulación *Wsf02* en la cual se define una velocidad de caída constante para el limo.

Simulación	Ws (mm/s y mg/l)			Erosión		Deposición	Rugosidad de fondo (z_{0sed})
	Ws limo	Ws arcilla	Efecto G	τ_{ce} (N/m ²)	E_0 (kg/m ² s)	τ_{cd} (N/m ²)	
<i>Wsnew9z02cepd</i>	ley mf3 [0,015; 3; 10000]	ley mf3 [0,015; 3; 10000]	no	0,1	1×10^{-06}	10	z02
<i>Wsnew9e04</i>	ley mf3 [0,015; 3; 10000]	ley mf3 [0,015; 3; 10000]	no	0,1	4×10^{-06}	10	z02
<i>Wsnew9e05</i>	ley mf3 [0,015; 3; 10000]	ley mf3 [0,015; 3; 10000]	no	0,1	2×10^{-06}	10	z02
<i>Wsf01</i>	ley <i>Wsfs</i> [0,1; 3; 10000]	ley <i>Wsfc</i> [0,02; 3; 10000]	no	0,1	1×10^{-05}	10	z02
<i>Wsf02</i>	ley <i>Wsfs</i> [0,1; 3; 10000]	ley <i>Wsfc</i> [0,02; 3; 10000]	no	0,1	9×10^{-06}	10	z02
<i>Wsf1e02</i>	0,1 constante	ley <i>Wsfc</i> [0,02; 3; 10000]	no	0,1	9×10^{-06}	10	z02
<i>Wsf03</i>	ley <i>Wsfs</i> [0,1; 3; 10000]	ley <i>Wsfc</i> [0,02; 3; 10000]	no	0,1	7×10^{-06}	10	z02
<i>Wsf04</i>	ley <i>Wsfs</i> [0,1; 3; 10000]	ley <i>Wsfc</i> [0,02; 3; 10000]	no	0,1	4×10^{-06}	10	z02
<i>Wsf04hom</i>	ley <i>Wsfs</i> [0,1; 3; 10000]	ley <i>Wsfc</i> [0,02; 3; 10000]	no	0,1	4×10^{-06}	10	uniforme
<i>Wsf03hom</i>	ley <i>Wsfs</i> [0,1; 3; 10000]	ley <i>Wsfc</i> [0,02; 3; 10000]	si	0,1	7×10^{-06}	10	uniforme
<i>Wsf03homtc3</i>	ley <i>Wsfs</i> [0,1; 3; 10000]	ley <i>Wsfc</i> [0,02; 3; 10000]	si	0,21	7×10^{-06}	10	uniforme
<i>Wsf03tc3</i>	ley <i>Wsfs</i> [0,1; 3; 10000]	ley <i>Wsfc</i> [0,02; 3; 10000]	si	0,21	7×10^{-06}	10	z02
<i>Wsf04homsGd</i>	ley <i>Wsfs</i> [0,1; 3; 10000]	ley <i>Wsfc</i> [0,02; 3; 10000]	no	0,1	4×10^{-06}	10000	uniforme
<i>Wsf03homsGd</i>	ley <i>Wsfs</i> [0,1; 3; 10000]	ley <i>Wsfc</i> [0,02; 3; 10000]	no	0,1	7×10^{-06}	10000	uniforme

Tabla 4.9: Parámetros modificados en las diversas simulaciones realizadas en la etapa 4 de los análisis de sensibilidad integrados.

Debido al gran efecto que se obtiene en los resultados del modelo con el incremento de la tensión crítica de deposición se vuelven a incluir ciertas variaciones en los parámetros ya analizados con el objetivo de conocer el comportamiento de los mismos en el nuevo modelo conceptual. Se definen así las simulaciones *Wsf03hom* y *Wsf04hom* que mantienen los parámetros de las simulaciones correspondientes *Wsf03* y *Wsf04* pero utilizan nuevamente una distribución homogénea de la rugosidad de fondo ($z_{0sed}=0,1$ mm). Además, se analiza nuevamente el efecto de elevar la tensión de corte crítica de erosión a través de las simulaciones *Wsf03homtc3* y *Wsf03tc3*. También en

varias simulaciones se vuelve a considerar el efecto de la turbulencia en la velocidad de caída ($W_{sfe03hom}$, $W_{sfe03homtc3}$, $W_{sfe03tc3}$). Por último, se definen las simulaciones $W_{sfe03homsGd}$ y $W_{sfe04homsGd}$ que incorporan los parámetros y combinaciones de los mismos para los cuales se obtiene una aceptable representación de los datos medidos.

4.5.4.2. Resultados

El incremento de la tensión crítica de deposición realizado en la simulación $W_{snew9z02cepd}$ genera principalmente una considerable disminución de los valores de concentración de sedimento fino en suspensión en los instantes posteriores a los grandes eventos de resuspensión. En el Anexo C.3.4 se presenta la comparación con los datos medidos. En la Figura 4.31 se comparan las series temporales de las simulaciones $W_{snew9z02cepd}$ y $W_{snew9z02cep}$ en las estaciones fijas de control.

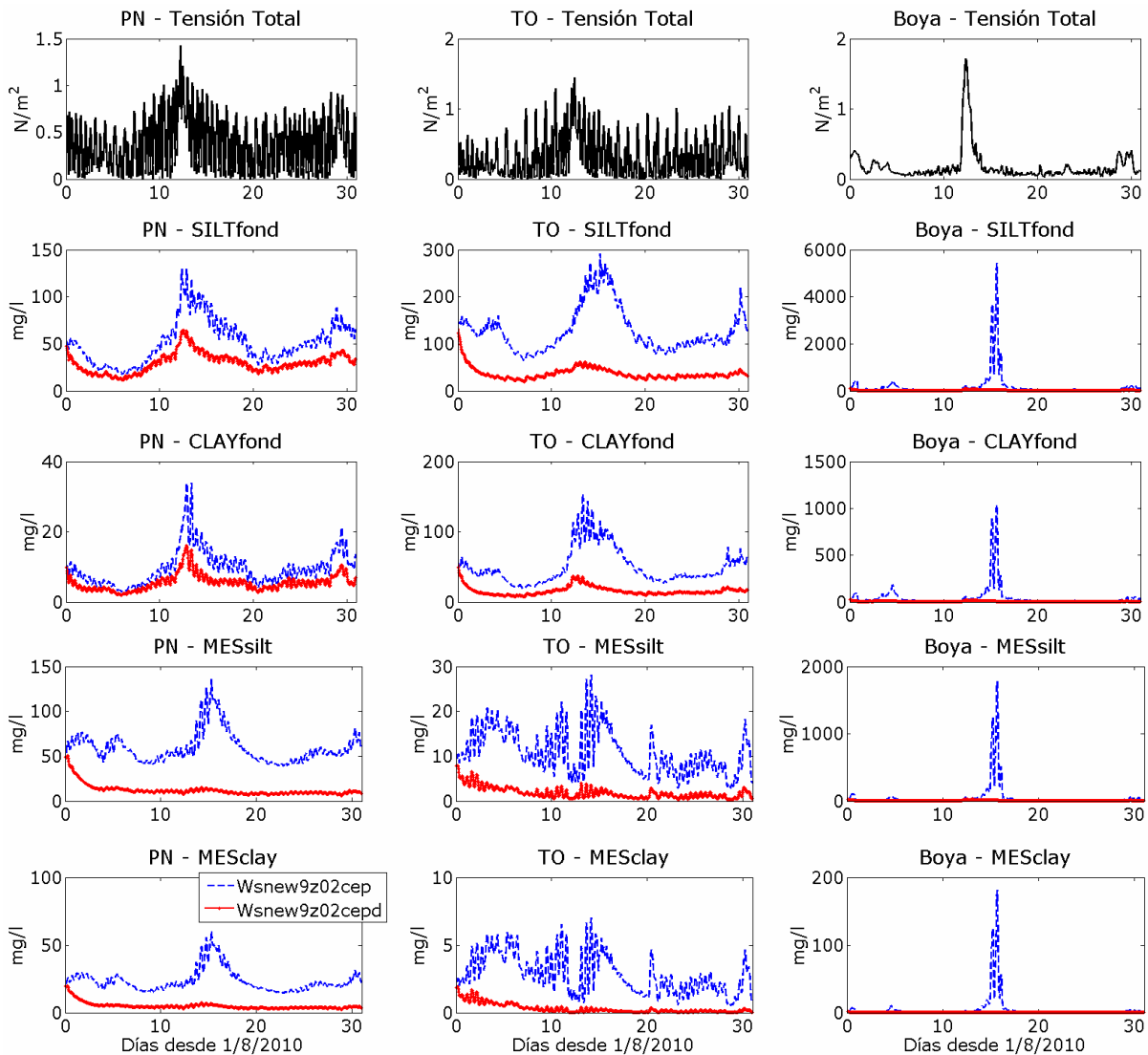


Figura 4.31: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión (SILTfond, CLAYfond, MESsilt y MESclay) obtenida en la capa de fondo en Pilote Norden (paneles izquierdos), Torre Oyarvide (paneles centrales) y en la Boya oceanográfica (paneles derechos) para las simulaciones $W_{snew9z02cep}$ y $W_{snew9z02cepd}$. Se agrega la tensión de corte de fondo como referencia. Agosto 2010.

Se observa una gran disminución de los valores de concentración en suspensión en las tres estaciones en situaciones de calma y de tormenta. Dicho efecto se observa

además para las fracciones limo y arcilla, y en las componentes provenientes de los tributarios y del fondo. En la Boya prácticamente todo el incremento de concentración representado en la simulación *Wsnew9z02cep* es eliminado en la simulación *Wsnew9z02cepd*. Al comparar los campos medios de concentración presentados para la simulación *Wsnew9z02cepd* en la Figura 4.32 con los anteriormente presentados para la configuración *Wsnew9z02cep* (Figura 4.29) se observa claramente la disminución de la cantidad de sedimento en suspensión que se obtiene al incrementar la tasa de tensión crítica de deposición. A diferencia de los casos anteriores, en la simulación *Wsnew9z02cepd* el campo obtenido para el fondo de la columna de agua muestra mayores concentraciones medias en la zona intermedia que en la zona exterior, lo que se corresponde con la distribución espacial de las tensiones de corte de fondo medias mensuales.

Con el objetivo de mejorar la representación del modelo durante los eventos de fuerte resuspensión se definieron las simulaciones *Wsnew9e04* y *Wsnew9e05* en las cuales la tasa de resuspensión de material de fondo se incrementa en relación al caso anterior. Como resultado se mejora la representación de los picos de concentración durante los eventos de mayores tensiones de corte de fondo (Anexo C.3.4). Esto indica que es posible representar los picos de concentración que muestran los datos utilizando el modelo conceptual que fomenta la deposición.

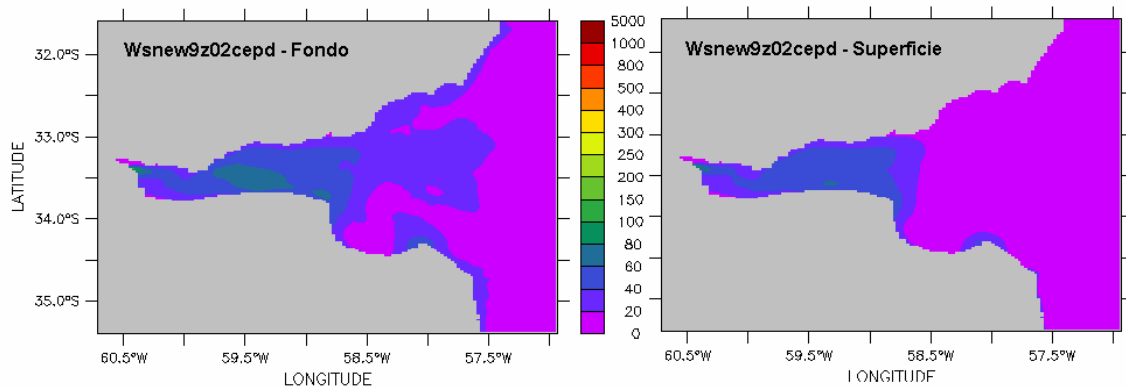


Figura 4.32: Distribución espacial promedio durante agosto 2010 de la concentración de sedimento fino total obtenida con el modelo en fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) en la simulación *Wsnew9z02cep*.

Con el objetivo de avanzar en el ajuste se definieron las simulaciones *Wsfe01*, *Wsfe02*, *Wsfe03* y *Wsfe04*, en las cuales se modifica la tasa de resuspensión y se utilizan las leyes de velocidad de caída definidas para el limo (*Wsfs*) y la arcilla (*Wsfc*). La simulación *Wsf1e02* es una variante de la simulación *Wsfe02* en la cual se utiliza una velocidad de caída constante para el limo. Básicamente los resultados muestran una mejora en la representación de la variabilidad temporal de la concentración de sedimento en suspensión (Anexo C.3.4). Los resultados obtenidos en la simulación *Wsf1e02* no mejoran los resultados pues en general se incrementan las concentraciones en la zona intermedia en relación a la simulación *Wsfe02* por lo que se continúa trabajando con las leyes de velocidad de caída variable. La disminución gradual de la tasa de resuspensión impuesta entre las simulaciones genera una disminución de las concentraciones tanto en períodos de calma como durante las tormentas en toda la zona de estudio, lo que favorece al ajuste de los datos. Al comparar los campos medios de concentración en suspensión en superficie y sobre el fondo, presentados para las configuraciones *Wfe03* y *Wsfe04* en la Figura 4.33, se observa cómo disminuyen las concentraciones en todo el dominio al

disminuir la tasa de resuspensión en la segunda simulación respecto a la considerada en la primera.

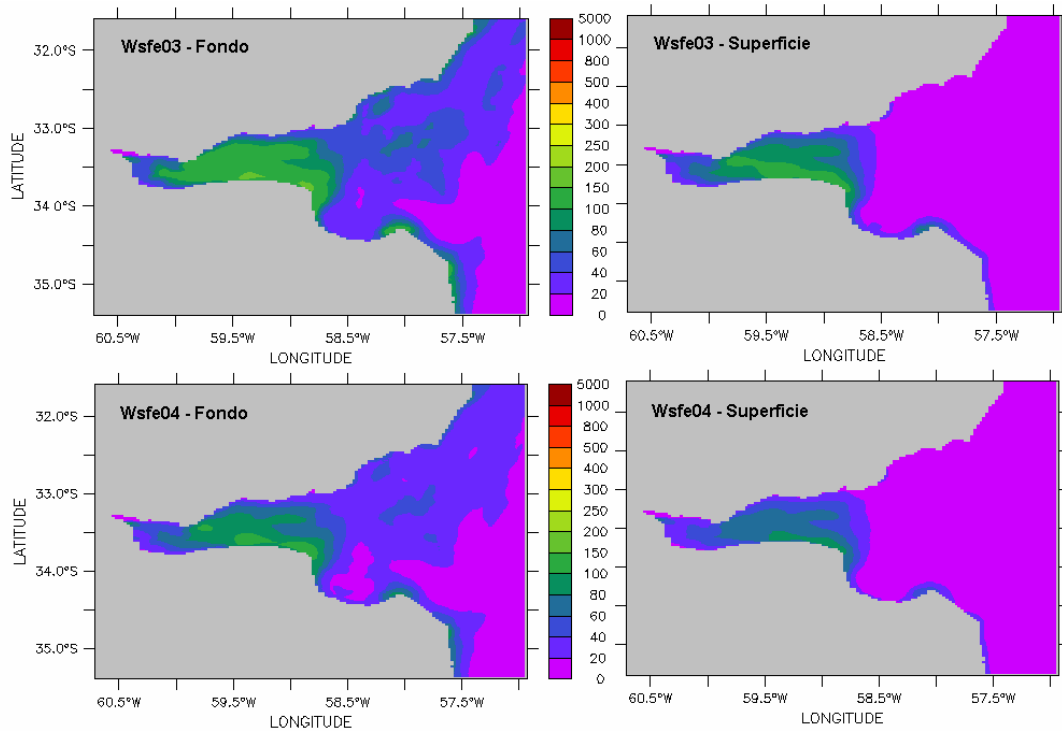


Figura 4.33: Distribución espacial promedio durante agosto 2010 de la concentración de sedimento fino total obtenida con el modelo en fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) en la simulación Wsfe03 (paneles superiores) y Wsfe04 (paneles inferiores).

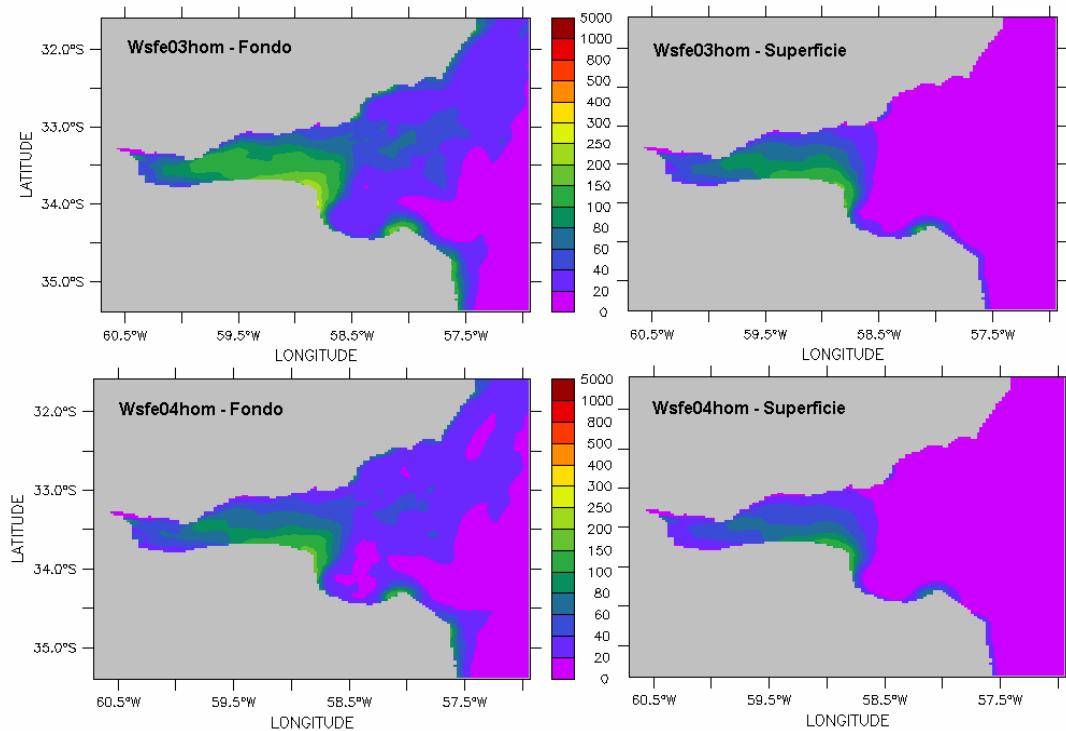


Figura 4.34: Distribución espacial promedio durante agosto 2010 de la concentración de sedimento fino total obtenida con el modelo en fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) en la simulación Wsfe03hom (paneles superiores) y Wsfe04hom (paneles inferiores).

En las simulaciones denominadas Wsfe03hom y Wsfe04hom se evalúa si disminuir las tensiones de corte en la zona interior e intermedia (volviendo a imponer el valor de rugosidad de fondo uniforme en todo el dominio igual a 0,1 mm) mejora la representación de las concentraciones en suspensión para el modelo conceptual de deposición continua respecto a la utilización de rugosidad variable espacialmente. La comparación de los resultados de dichas simulaciones con los datos se presenta en el Anexo C.3.4. Básicamente es favorable la disminución del factor de rugosidad pues las tensiones de corte de fondo disminuyen y por tanto también las concentraciones de sedimento en suspensión en la zona intermedia. En particular la simulación Wsfe04hom representa correctamente el evento de incremento de concentración que muestran los datos en Torre Oyarvide producto de una fuerte tormenta. En la Figura 4.34 se presentan los campos medios de concentración obtenidos en ambas simulaciones.

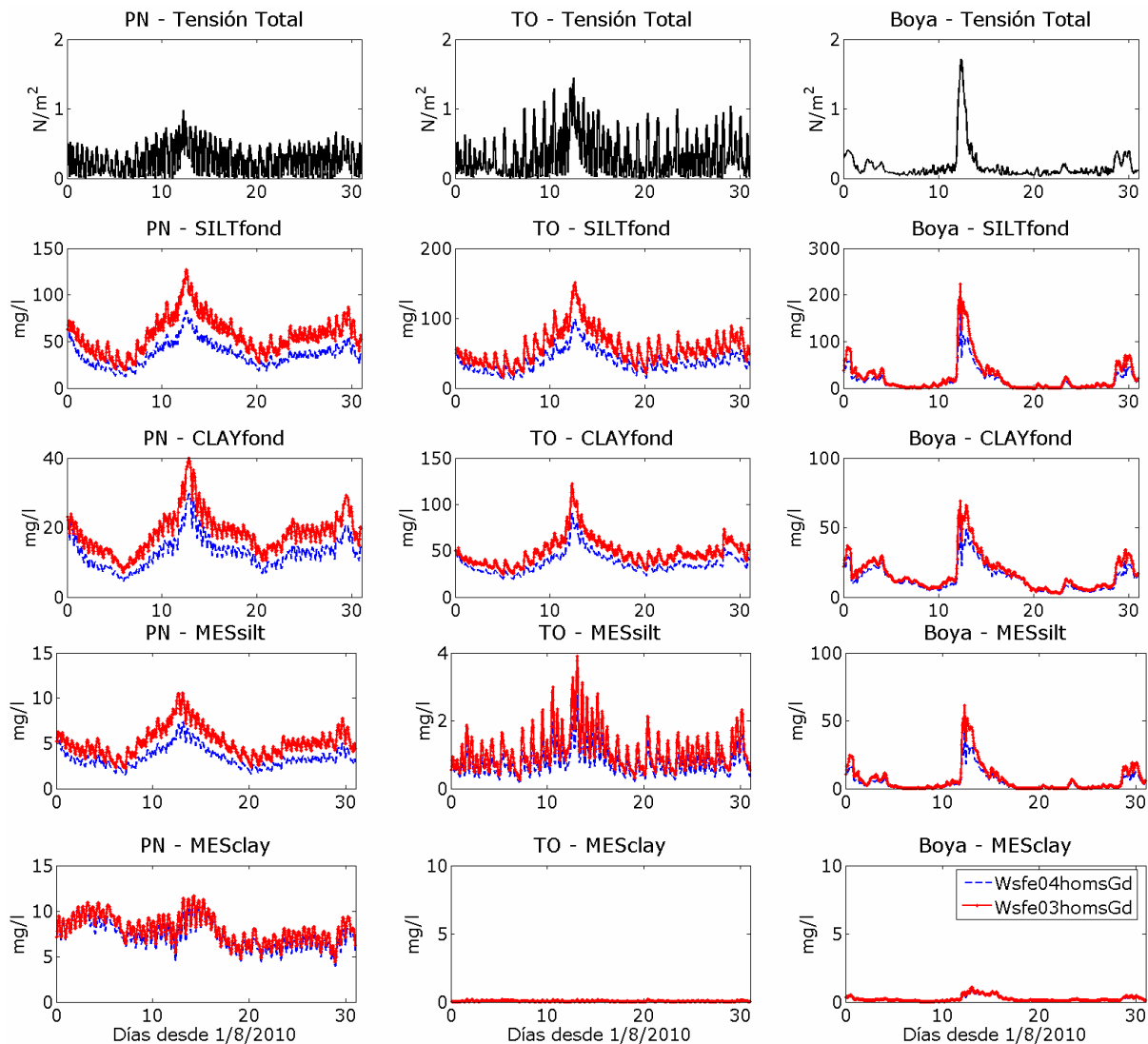


Figura 4.35: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión (SILTfond, CLAYfond, MESsilt y MESclay) obtenida en la capa de fondo en Pilote Norden (paneles izquierdos), Torre Oyarvide (paneles centrales) y en la Boya oceanográfica (paneles derechos) para las simulaciones Wsfe04homsGd y Wsfe03homsGd. Se agrega la tensión de corte de fondo como referencia. Agosto 2010.

También se representa correctamente la variabilidad de los datos medidos en Torre Oyarvide con las simulaciones Wsfe03homtc3 y Wsfe03tc3, en las cuales se

considera una tensión crítica de erosión mayor a la considerada en las simulaciones anteriores Wsfe03hom y Wsfe03 (Anexo C.3.4). No obstante hay ciertas características de la dinámica que muestran los datos que estas parametrizaciones no representan correctamente. Para la simulación Wsfe03homtc3 la concentración media en superficie muestra valores muy bajos en algunas partes de la zona interior e intermedia del Río de la Plata que no es compatible con lo que muestran los datos. Por otro lado, considerar la variación espacial de la rugosidad con dichos parámetros (Wsfe03tc3) genera elevadas concentraciones durante eventos fuertes de tormenta en la zona interior.

En base a los buenos resultados obtenidos con la simulación Wsfe04hom se define la simulación Wsfe04homsGd que considera una tensión crítica de deposición muy alta de forma de siempre tener un valor mucho mayor a las tensiones de fondo que ocurren en la zona. Posteriormente se define la simulación Wsfe03homsGd que difiere en la anterior en la tasa de resuspensión (mayor en ésta última) con el objetivo de mejorar la representación de los eventos de resuspensión durante fuertes tormentas. La comparación de los resultados obtenidos con los datos en las dos últimas simulaciones de los análisis de sensibilidad se presentan en el Anexo C.3.4. La comparación de las series temporales en los puntos de control para las simulaciones Wsfe04homsGd y Wsfe03homsGd se presenta en la Figura 4.35. Se observa en términos generales las concentraciones obtenidas con la simulación Wsfe03homsGd son mayores a las obtenidas con la simulación Wsfe04homsGd y que el comportamiento cualitativo de la variación temporal de las series es similar en ambas.

4.5.4.3. Síntesis

En esta última etapa de los análisis de sensibilidad se realizó el ajuste final del modelo de sedimentos finos. Considerando una tensión de corte crítica de deposición elevada se reduce la cantidad de sedimento en suspensión post eventos de tormenta lo que mejora la representación de los datos. Se realizaron una serie de simulaciones modificando principalmente parámetros de erosión (tasa de resuspensión) manteniendo fija las leyes de velocidad de caída del limo y de la arcilla para ajustar las medidas. Se consideraron las opciones de rugosidad de fondo uniforme y rugosidad de fondo variable espacialmente según el material del sedimento de fondo, obteniéndose mejores resultados con la opción de rugosidad de fondo uniforme. Las últimas simulaciones realizadas representan las principales características de la variabilidad temporal de la turbidez medida en las tres estaciones fijas de control.

4.6. SELECCIÓN DE LA PARAMETRIZACIÓN DEFINITIVA DEL MODELO

Durante el proceso de ajuste del modelo de sedimentos finos en base a diversos análisis de sensibilidad se evaluaron diversos modelos conceptuales. Inicialmente el modelo de base consideró los parámetros de partida definidos principalmente en estudios anteriores similares realizados con el modelo (Tessier, 2006; Dufois, 2008). Posteriormente se evaluaron diversas variaciones a partir de dichos parámetros de base, comenzando por procesos básicos como velocidad de caída y erosión. Fueron consideradas diversas leyes de velocidad de sedimentación o caída variables con la concentración para las fracciones de limo y arcilla del sedimento en suspensión, así como también aproximaciones que suponen una velocidad de caída constante para la fracción limo. Debido a la gran influencia del proceso de erosión en la dinámica de sedimentos finos se consideraron diversas combinaciones de la tensión crítica de erosión y de la tasa de resuspensión. Además, se determinó la influencia de las corrientes de marea y del oleaje en la erosión del material de fondo. Se evaluó también la influencia en la dinámica de la variación espacial de la rugosidad de fondo debido a las diferencias en el material que comprende el sedimento del fondo del Río de la Plata. Finalmente se consideró un modelo

que habilita continuamente la deposición del material que alcanza el fondo de la columna de agua. En el mismo ocurre la erosión cuando el flujo de erosión supera el flujo de deposición. Los diferentes modelos y parámetros considerados muestran resultados diferentes siendo la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata sumamente sensible a la mayoría de los parámetros considerados.

Se seleccionaron una serie de configuraciones representativas de las diversas situaciones analizadas a partir de las cuales se realiza una discusión de la representación de los datos y se seleccionan los parámetros finales del modelo. Dichas configuraciones se presentan en la Tabla 4.10. En primer lugar se considera la configuración inicial de partida ParGlobal. Por otra parte se consideran las simulaciones F1F2F3Wsnew1b y Wsnew7 que consideran dos modelos conceptuales diferentes de sedimentación del sedimento en suspensión. En el primero se considera que el limo sedimenta rápidamente y la arcilla lentamente mientras que en segundo se considera que ambas componentes presentan una velocidad de caída media. Se considera también la simulación Wsnew9e04 en la que se incluye la variación espacial de la rugosidad de fondo. Por último, se incluyen las simulaciones Wsfe03homtc3 y Wsfe04homsGd que consideran las leyes de velocidad de caída determinadas en función de las características de los sedimentos obtenidas de las mediciones y valores elevados de la tensión crítica de deposición.

Simulación	Ws (mm/s y mg/l)			Erosión		Deposición
	Ws limo	Ws arcilla	Efecto G	τ_{ce} (N/m ²)	E_0 (kg/m ² s)	τ_{cd} (N/m ²)
<i>ParGlobal</i> *	0,1 constante	ley orig [0,05; 1,5; 2000]	si	0,1	1×10^{-06}	0,1
<i>F1F2F3Wsnew1b</i> *	1,0 constante	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	no	0,21	6×10^{-06}	0,21
<i>Wsnew7</i> *	ley mf1 [0,015; 0,5; 10000]	ley mf2 [0,02; 0,5; 2000]	no	0,1	1×10^{-06}	0,1
<i>Wsnew9e04</i> **	ley mf3 [0,015; 3; 10000]	ley mf3 [0,015; 3; 10000]	no	0,1	4×10^{-06}	10
<i>Wsfe03homtc3</i> **	ley Wsfs [0,1; 3; 10000]	ley Wsfc [0,02; 3; 10000]	si	0,21	7×10^{-06}	10
<i>Wsfe04homsGd</i> **	ley Wsfs [0,1; 3; 10000]	ley Wsfc [0,02; 3; 10000]	no	0,1	4×10^{-06}	10000

* Se utilizan los vientos NCEP en el modelo hidrodinámico
 ** Se utilizan los vientos CEP en el modelo hidrodinámico

Tabla 4.10: Parámetros principales de las simulaciones seleccionadas para el análisis final.

Para realizar la discusión se considera la comparación de los resultados del modelo con los datos medidos de series de turbidez en las estaciones fijas y con los perfiles de turbidez de la campaña 4 de medición en todas las estaciones de control del Río de la Plata. En las Figuras 4.36, 4.37 y 4.38 se comparan los resultados del modelo obtenidos en las configuraciones mencionadas y los datos medidos durante agosto 2010 en las estaciones Pilote Norden, Torre Oyarvide y Boya Oceanográfica, respectivamente. A grandes rasgos se observa en las mismas la gran variación de los resultados obtenidos con las diversas configuraciones del modelo en las tres estaciones.

Específicamente en Pilote Norden se observa que ninguna simulación representa exactamente la variabilidad de escala mayor a la de marea que muestran los datos. No obstante se considera las simulaciones Wsfe03homtc3 y Wsfe04homsGd representan mejor los períodos de baja turbidez y alta turbidez observados en las medidas. En Torre Oyarvide los resultados del modelo difieren principalmente en cómo representan el incremento de concentración correspondiente a la tormenta del día 12 y la posterior caída. En las simulaciones ParGlobal, F1F2F3Wsnew1b, Wsnew7 y Wsnew9e04 el modelo representa razonablemente el incremento de concentración durante la tormenta pero la caída posterior es mucho más lenta que la de los datos. En las simulaciones Wsfe03homtc3 y Wsfe04homsGd en cambio se representa correctamente el incremento y el posterior descenso de concentración. Es importante también controlar que el modelo

represente el estado basal de concentración en suspensión que registran los datos en esta estación. En ese sentido la simulación Wsnew7 representa correctamente el valor basal previo a la tormenta pero no resuelve correctamente el regreso a la situación de régimen post evento. Las simulaciones Wsnew9e04 y Wsfe04homsGd sí representan el valor de concentración de régimen observado al final del período.

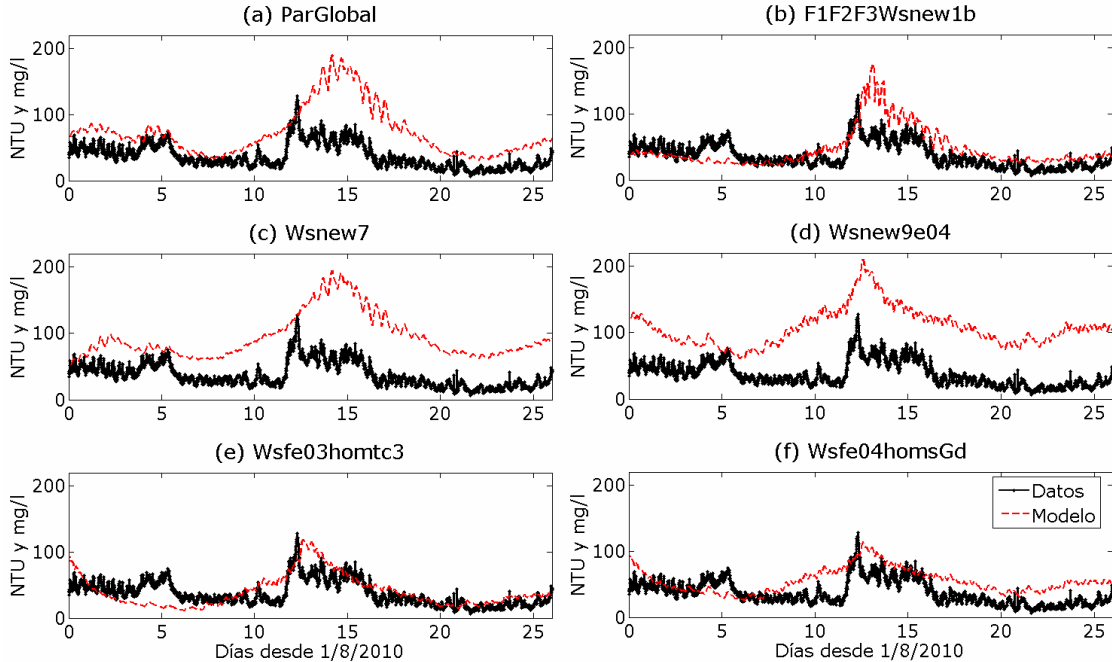


Figura 4.36: Comparación de la evolución temporal (agosto 2010) de las medidas de turbidez (NTU) y de los resultados del modelo (mg/l) en Pilote Norden para las simulaciones (a) ParGlobal, (b) F1F2F3Wsnew1b, (c) Wsnew4, (d) Wsnew9e04, (e) Wsfe03homtc3 y (f) Wsfe04homsGd.

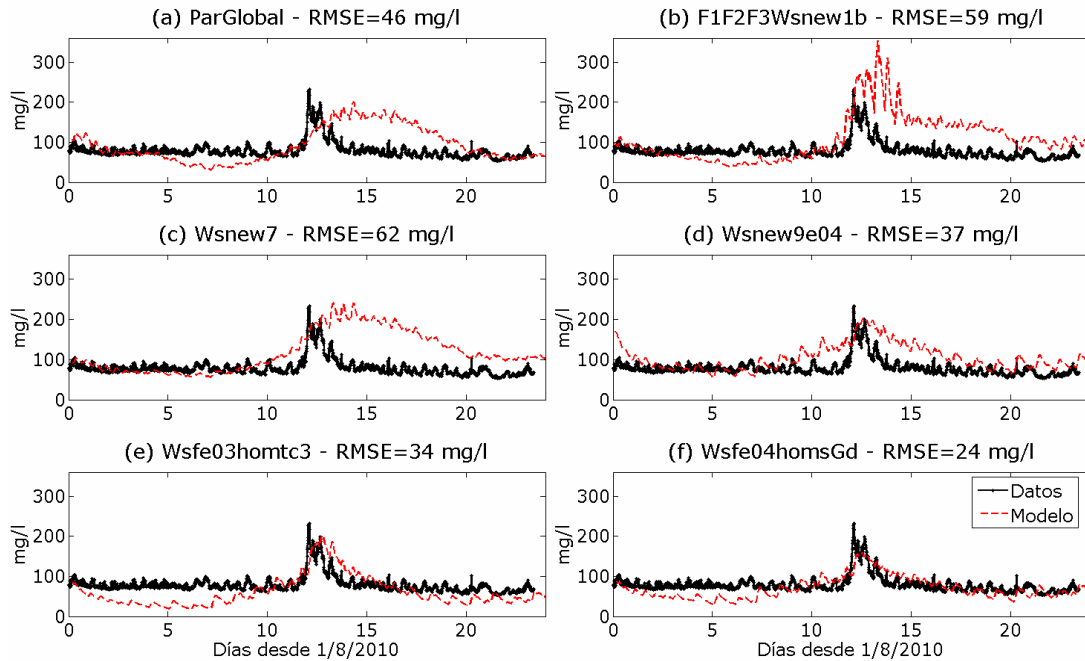


Figura 4.37: Comparación de la evolución temporal (agosto 2010) de las medidas de turbidez (mg/l) y de los resultados del modelo (mg/l) en Torre Oyarvide para las simulaciones (a) ParGlobal, (b) F1F2F3Wsnew1b, (c) Wsnew4, (d) Wsnew9e04, (e) Wsfe03homtc3 y (f) Wsfe04homsGd.

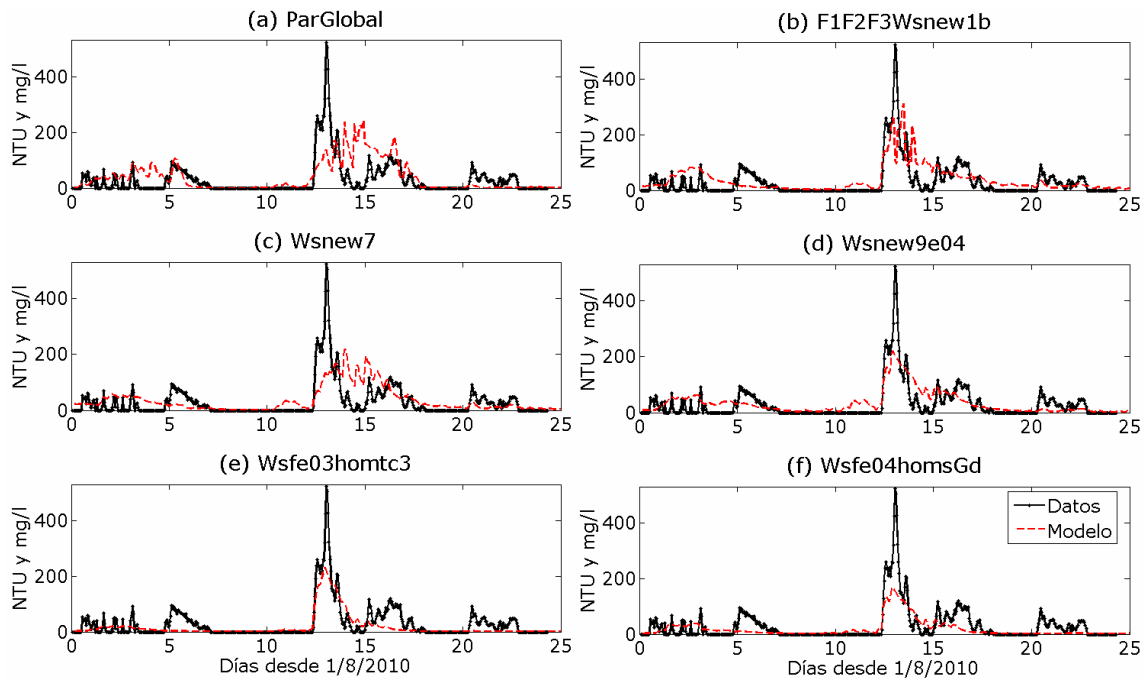


Figura 4.38: Comparación de la evolución temporal (agosto 2010) de las medidas de turbidez (NTU) y de los resultados del modelo (mg/l) en la Boya para las simulaciones (a) ParGlobal, (b) F1F2F3Wsnew1b, (c) Wsnew4, (d) Wsnew9e04, (e) Wsfe03homtc3 y (f) Wsfe04homsGd.

En Torre Oyarvide es posible calcular el error medio cuadrático del ajuste del modelo pues se cuenta con información de las medidas en mg/l. Los valores obtenidos en las simulaciones consideradas se presentan en la Figura 4.37. Se observa que los mayores errores se obtienen en las simulaciones Wsnew7 (62 mg/l), F1F2F3Wsnew1b (59 mg/l), y ParGlobal (46 mg/l). En las simulaciones Wsnew9e04 y Wsfe03homtc3 los errores disminuyen a 37 mg/l y 34 mg/l. El error más bajo, igual a 24 mg/l, se obtiene para la simulación Wsfe04homsGd.

En la Boya Oceanográfica ubicada en la zona exterior del Río de la Plata se observa que todas las simulaciones representan el incremento de concentración ocurrido producto de la tormenta del día 12. No obstante se observa que las simulaciones ParGlobal y Wsnew7 no representan la caída posterior de concentración luego del evento y las simulaciones F1F2F3Wsnew1b y Wsnew9e04 muestran un descenso más lento a lo que muestran los datos. En cambio los valores obtenidos con las simulaciones Wsfe03homtc3 y Wsfe04homsGd representan correctamente la variabilidad observada durante todo el evento.

Por otro lado se presenta en la Figura 4.39 la comparación de los perfiles obtenidos con las simulaciones seleccionadas del modelo con los perfiles medidos durante la campaña 4 de medición realizada durante agosto 2010. Se observa en la misma los resultados son muy diversos, dependiendo de la estación de medición y de las simulaciones. Este tipo de comparación instantánea de perfiles verticales es sumamente exigente pero ayuda a seleccionar la parametrización más apropiada. Cualitativamente se observa algunos perfiles se representan mejor con ciertas simulaciones que con otras. Para cada estación se evaluó cualitativamente el ajuste de cada simulación con un número que representa en qué lugar se ubica la simulación en la representación de dicha estación, es decir, se asigna un 1 a la simulación que mejor representa el perfil, 2 a la siguiente, etc. Esta valoración considera la aproximación de los valores medidos así como también de la forma del perfil. Se considera válido repetir el puntaje y se suma para cada simulación el puntaje obtenido en el ajuste de cada estación. De esta manera es posible

ordenar la calidad del ajuste de las simulaciones de una manera aproximada. En la Tabla 4.11 se presentan los valores obtenidos. En términos generales la simulación Wsfe03homtc3 representa mejor la mayoría de los perfiles (menor puntaje total) seguido por la simulación Wsfe04homsGd.

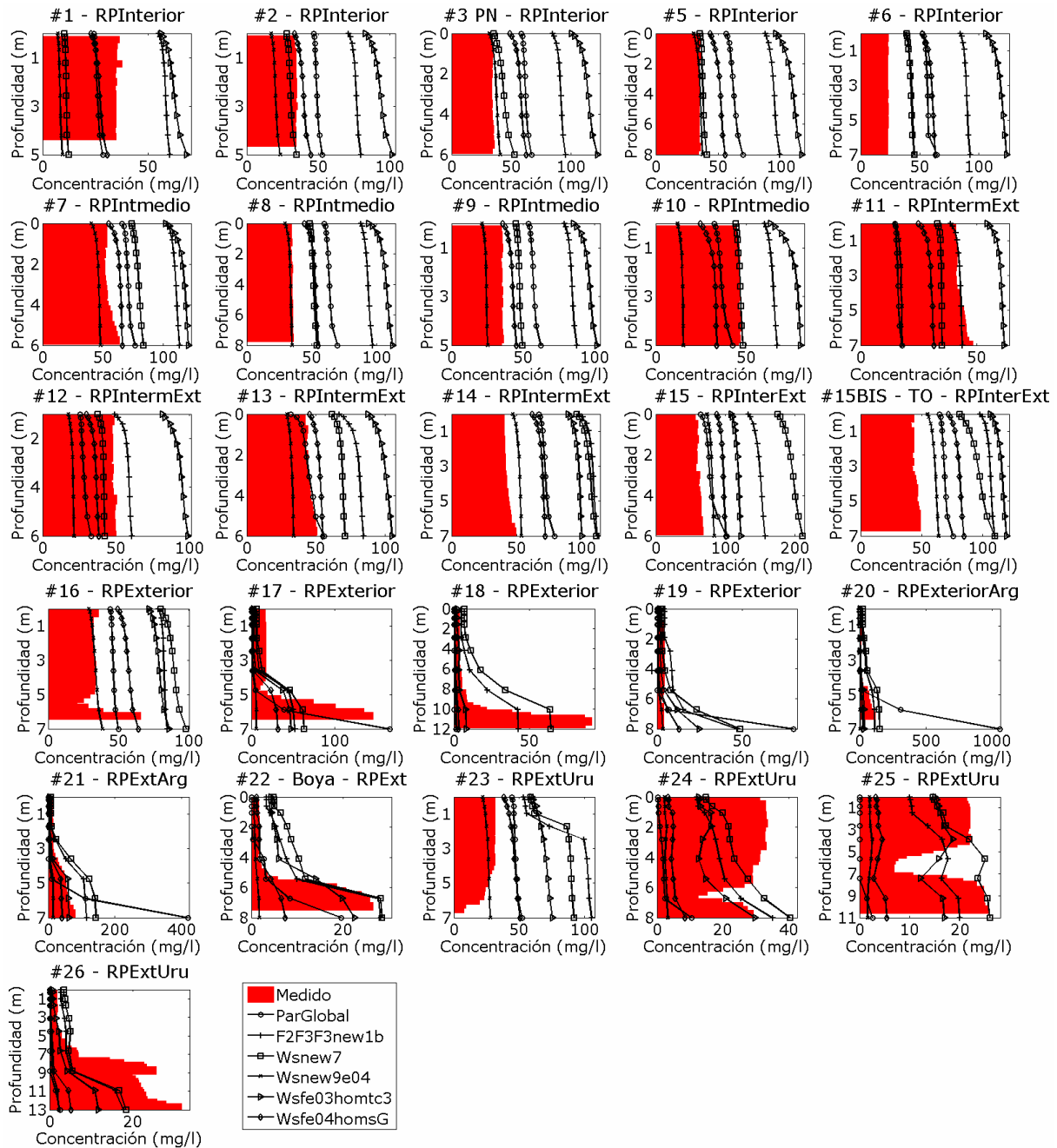


Figura 4.39: Comparación de los perfiles de concentración de sedimento en suspensión medidos durante la Campaña 4 y los obtenidos con las simulaciones (a) ParGlobal, (b) F1F2F3Wsnew1b, (c) Wsnew4, (d) Wsnew9e04, (e) Wsfe03homtc3 y (f) Wsfe04homsGd, en las estaciones de monitoreo #1 a #26.

Considerando los elementos planteados anteriormente se selecciona la parametrización del modelo de sedimentos finos correspondiente a la simulación denominada Wsfe04homsGd como la definitiva. En la Tabla 4.10 se presentaron los parámetros correspondientes a la misma. A pesar de que conceptualmente parecía razonable la opción de rugosidad variable espacialmente en función del tipo de sedimento

de fondo, se obtienen mejores resultados al considerar un fondo homogéneo y por tanto un mismo valor de rugosidad en todo el dominio. La configuración seleccionada representa correctamente las características principales de la variabilidad temporal de las medidas de turbidez que muestran los datos en las estaciones fijas de Pilote Norden, Torre Oyarvide y Boya Oceanográfica, y de la variabilidad vertical que muestran los perfiles en las estaciones de monitoreo del Río de la Plata. La gran variación entre los parámetros iniciales considerados (configuración ParGlobal), y los parámetros definitivos seleccionados, así como las grandes diferencias obtenidas en los resultados con cada conjunto de parámetros, certifican la importancia del proceso de ajuste realizado.

ESTACIÓN	Puntaje por simulación					
	ParGlobal	F1F2F3Wsnew1b	Wsnew7	Wsnew9e04	Wsfe03homtc3	Wsfe04homsGd
#1	1	2	2	2	2	1
#2	2	1	3	4	2	1
#3	2	1	3	4	1	2
#5	3	1	4	5	1	2
#6	2	1	3	4	1	2
#7	2	2	3	3	1	1
#8	3	2	4	5	1	2
#9	3	2	4	5	1	1
#10	2	1	2	3	3	2
#11	4	2	1	3	4	2
#12	2	1	1	3	3	1
#13	1	2	3	4	2	1
#14	2	4	4	3	1	2
#15	1	5	4	3	1	2
#15bis	2	4	5	6	1	3
#16	2	5	4	4	1	3
#17	1	2	2	2	4	3
#18	3	1	3	3	2	3
#19	5	4	4	3	1	2
#20	2	1	1	1	1	1
#21	5	4	3	1	3	2
#22	2	1	1	1	2	2
#23	2	4	5	3	1	2
#24	2	1	2	1	1	2
#25	2	1	1	1	2	2
#26	2	1	1	1	2	2
Total	60	56	73	78	45	49

Tabla 4.11: Puntaje asociado a cada simulación en la representación de los perfiles de concentración de sedimento en suspensión medidos en la Campaña 4 en las estaciones de control.

4.7. VALIDACIÓN DEL MODELO: PERÍODO 2009-2010

4.7.1. Características generales

Una vez calibrado el modelo de sedimentos finos MARS se realizó la simulación de todo el período completo 2009-2010 como validación del modelo. Se utilizaron las condiciones iniciales y los forzantes según lo descrito anteriormente en la sección 4.2.3. Se utilizó el fondo de Laborde como condición inicial de la composición del sedimento de fondo. Se utilizaron los parámetros obtenidos como resultado de la calibración del modelo (configuración Wsfe04homsGd). Se utilizan los vientos CEP para forzar el modelo hidrodinámico de corrientes. Debido a la disponibilidad de los mismos concretamente el período de tiempo evaluado es el comprendido entre el 1/01/2009 y el 31/08/2010.

Para evaluar la calidad del modelo se compararon los resultados obtenidos con los datos de calidad disponibles durante el período de tiempo simulado. En el Capítulo 2 se realizó el procesamiento y análisis de calidad de las mediciones. Coinciden los datos medidos en el Período 3 de medición en Pilote Norden, Torre Oyarvide y en la Boya

Oceanográfica. Respecto a los perfiles de sedimento en suspensión es posible utilizar los perfiles medidos durante las campañas 2, 3 y 4. Aunque en la etapa de ajuste se evaluó la representación del modelo para agosto 2010 en este caso se realizó nuevamente el chequeo ya que se simula desde enero 2009 con la misma parametrización, habiéndose obtenido nuevamente una correcta representación de los mismos.

Como complemento se utilizaron las medidas de concentración calculadas indirectamente en la costa de Montevideo (Bellón et al., 2010) para ciertos meses del año 2009 y se compararon con los resultados del modelo. En el Anexo C.4.1 se presenta dicha comparación y se analizan los resultados. Básicamente el modelo representa las características generales que muestran las medidas en la zona de Montevideo.

4.7.2. Resultados obtenidos

4.7.2.1. Series temporales

Se evaluó la calidad del modelo a partir de la comparación de las series temporales de sedimento en suspensión en Pilote Norden (Períodos 2 y 3 de medición), Torre Oyarvide (Período 3) y Boya Oceanográfica (Período 3). El Período 3 de medición incluye básicamente los meses de julio y agosto de 2010. Los resultados obtenidos en las tres estaciones fijas de medición durante el mes de julio 2010 se presentan en la Figura 4.40.

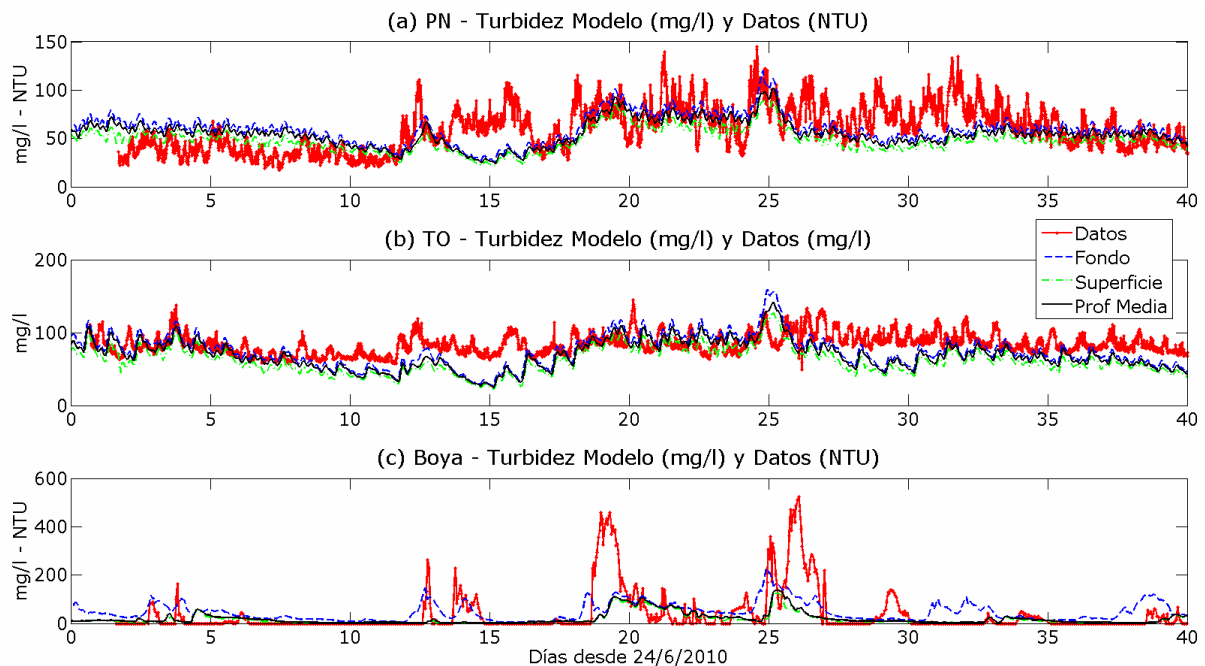


Figura 4.40: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Parametrización final: julio 2010.

Se observa hay similitudes pero también diferencias entre los resultados del modelo y los datos. En Pilote Norden los datos muestran una variabilidad diaria elevada mientras que los datos muestran una menor fluctuación. No obstante durante varios días el modelo sigue la tendencia de las medidas, como por ejemplo los primeros días del mes y en el incremento observado en los datos a partir del día 17 hasta la caída posterior al evento del día 25. En Torre Oyarvide se observa algo similar, durante ciertos días la señal del modelo y de las medidas son similares (primeros 10 días ó entre el día 18 y el 25) mientras que en otros hay mayores diferencias (por ejemplo en el entorno del día 15).

En la Boya se observa la mayoría de los incrementos de concentración observados en las medidas son representados en el modelo, por lo menos en las capas de fondo. El error medio cuadrático obtenido para todo el Período 3 en la estación de control de Torre Oyarvide es igual a 26 mg/l. La representación del modelo de la concentración de sedimento en suspensión en Pilote Norden durante el Período 2 de medición (abril a junio 2010) se presenta en la Figura 4.41. Se observa el modelo representa correctamente la fase de la oscilación medida pero representa levemente las variaciones asociadas a eventos mayores como por ejemplo tormentas. No obstante se observa un comportamiento similar al obtenido durante la etapa de ajuste del modelo.

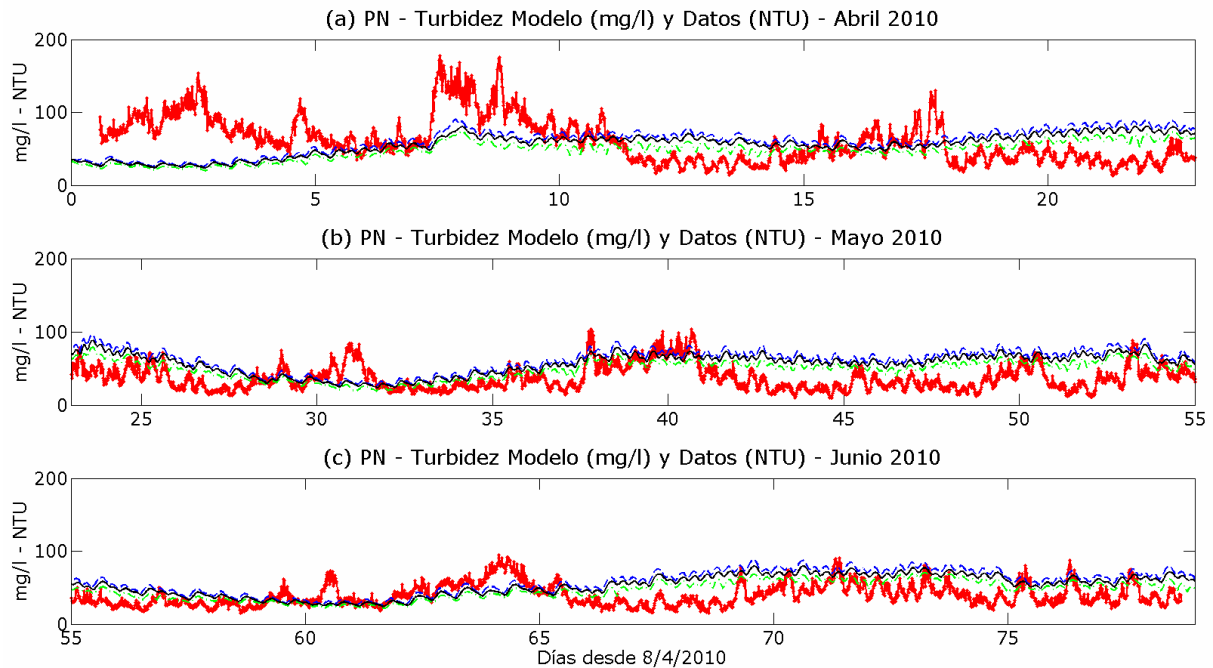


Figura 4.41: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en Pilote Norden durante (a) abril, (b) mayo y (c) junio 2010. Parametrización final; Período 2 de medición.

4.7.2.2. Perfiles de concentración

Se analiza en esta sección cómo es la representación del modelo de los perfiles verticales de concentración de sedimento en suspensión medidos durante las campañas 2 (Figura 4.42) y 3 (Figura 4.43) de medición en todas las estaciones de control. A pesar de que es una comparación muy exigente la misma se considera útil para conocer las fortalezas y debilidades de la parametrización final del modelo.

Se observa para las dos campañas comparadas que en la mayoría de los casos el modelo representa aceptablemente los perfiles verticales de concentración de sedimento en suspensión. Se observan algunos casos particulares como por ejemplo las estaciones #16 y #23 en la campaña 2 o las estaciones #11 y #20 en la campaña 3 donde los valores obtenidos con el modelo difieren considerablemente de los medidos. No obstante parecería el comportamiento general que muestran los perfiles se representa correctamente. Es decir, el incremento de concentración hacia la zona intermedia y exterior que muestran los datos, y el cambio en la variación vertical de perfiles homogéneos a perfiles con estratificación, con mayores concentraciones sobre el fondo, son representados correctamente por el modelo.

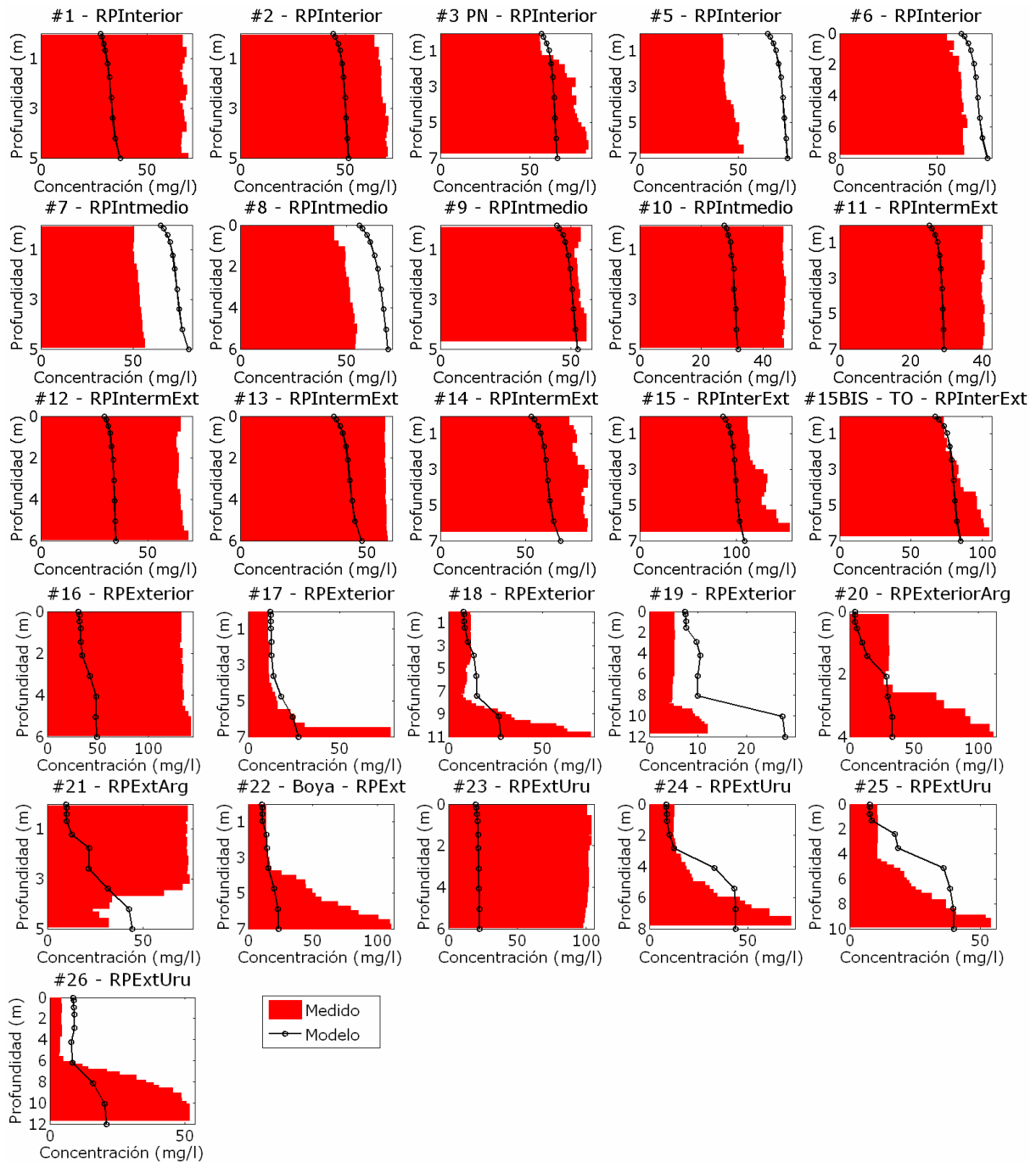


Figura 4.42: Comparación de los perfiles de concentración de sedimento en suspensión medidos durante la Campaña 2 (abril 2010) y los obtenidos en las estaciones de monitoreo #1 a #26 con la parametrización final del modelo.

Se calcularon los errores medios cuadráticos (RMSE) del ajuste de cada perfil medido durante las campañas 2, 3 y 4 en todas las estaciones de control. Los valores por estación y por campaña se presentan en la Tabla 4.12. Para cada estación se calculó además el error promedio en las tres campañas de medición, los cuales se presentan en la Figura 4.44.

Analizando los resultados obtenidos para la campaña 2 se observa que en 9 estaciones de control se obtienen errores menores a 10 mg/l, y los errores mayores se obtienen para las estaciones #16 (92 mg/l) y #23 (76 mg/l). En la campaña 3 en la estación #20 el error es elevado (240 mg/l) y en 10 estaciones el error es menor a 10 mg/l.

En la campaña 4 los errores presentan menos fluctuaciones entre las estaciones, siendo los valores máximos 32 mg/l en las estaciones #15 y #17, y 30 mg/l en las estaciones #15bis (Torre Oyarvide) y #6. El error medio cuadrático para cada campaña (obtenido como el promedio de los valores obtenidos en cada estación) resultan en 21 mg/l para la campaña 2, 27 mg/l para la campaña 3 y 15 mg/l para la campaña 4. Analizando los errores promedio por estación se observa que en general en la zona interior e intermedia los errores son menores a los obtenidos sobre la zona exterior, principalmente sobre la costa uruguaya.

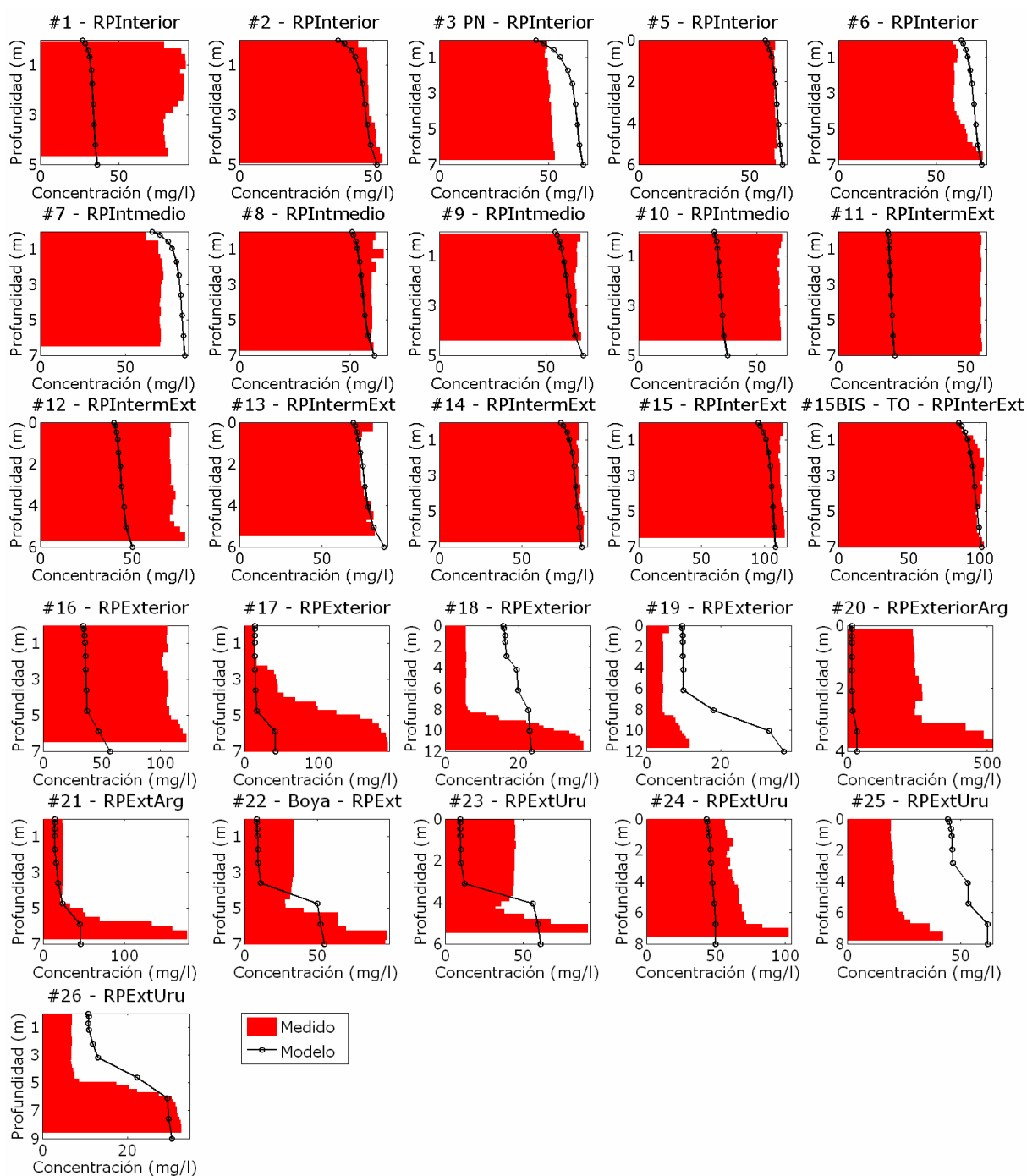


Figura 4.43: Comparación de los perfiles de concentración de sedimento en suspensión medidos durante la Campaña 3 (junio 2010) y los obtenidos en las estaciones de monitoreo #1 a #26 con la parametrización final del modelo.

ESTACIÓN	RMSE (mg/l) por Campaña		
	C2	C3	C4
#1	34	50	10
#2	17	4	4
#3	8	9	19
#5	25	2	13
#6	8	7	30
#7	18	10	6
#8	14	6	13
#9	5	7	5
#10	16	25	17
#11	12	34	10
#12	30	27	12
#13	15	5	6
#14	19	5	24
#15	22	11	32
#15bis	8	3	30
#16	92	65	22
#17	2	53	32
#18	4	11	5
#19	7	10	3
#20	28	240	28
#21	51	20	12
#22	18	22	5
#23	76	30	16
#24	7	14	23
#25	9	27	15
#26	11	6	9
RMSE (mg/l) Global Campaña	21	27	15

Tabla 4.12: Valores del error medio cuadrático del modelo (mg/l) en la representación de los perfiles verticales de concentración de sedimento en suspensión medidos en las campañas 2, 3 y 4 en las estaciones de control #1 a #26.

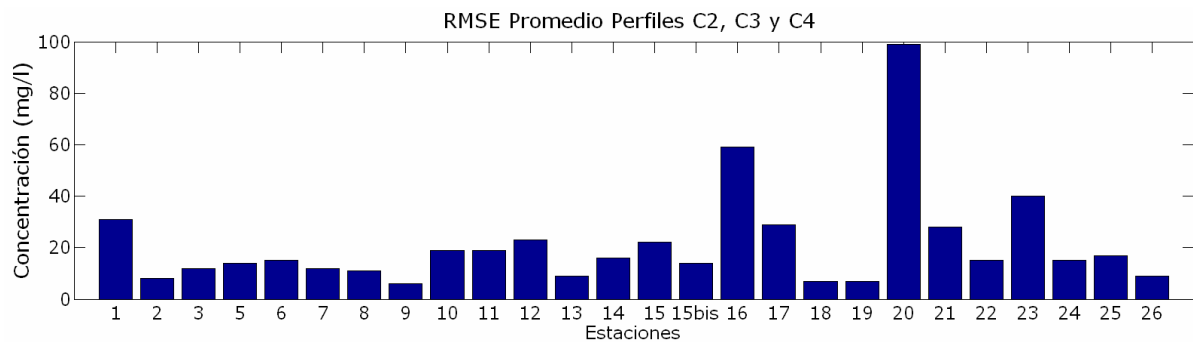


Figura 4.44: Errores medios cuadráticos (mg/l) promedio en cada estación de la representación del modelo de los perfiles de concentración de sedimento en suspensión medidos en cada una durante las campañas 2, 3 y 4.

4.7.2.3. Composición del material de fondo

Por último se evalúa la calidad del modelo en la representación del tipo de material de fondo para las distintas zonas del Río de la Plata utilizando como referencia la información granulométrica del sedimento de fondo extraído en las estaciones de control #1 a #26 durante las campañas de medición 1 (noviembre 2009), 2 (marzo 2010), 3 (junio 2010) y 4 (agosto 2010). Nuevamente es importante considerar que la comparación es exigente para el modelo. Además, es importante tener en cuenta que la

composición del material de fondo que presenta el modelo en zonas donde predomina la erosión neta es directamente la composición inicial ingresada al modelo.

Para realizar esta evaluación se comparan, para cada campaña de medición mencionada, los porcentajes de las diversas fracciones de sedimento de fondo medidos y obtenidos con el modelo en cada estación para el instante correspondiente a la medida. Las medidas están referidas a fracciones de grava, arena, limo y arcilla; siendo en el modelo las variables consideradas arena, limo y arcilla. Para el modelo se detalla también la subdivisión de fracciones limo y arcilla según sea su procedencia inicial, del fondo (variables SILTfond y CLAYfond), ó de los tributarios (MESsilt y MESclay). Las Figuras 4.45, 4.46, 4.47, y 4.48 presentan las comparaciones entre los resultados del modelo y las medidas para las campañas de medición 1, 2, 3 y 4, respectivamente. Cuando no aparece material en los datos medidos el porcentaje corresponde a la fracción grava; en esos casos para evaluar el modelo hay que comparar la proporción entre los materiales finos.

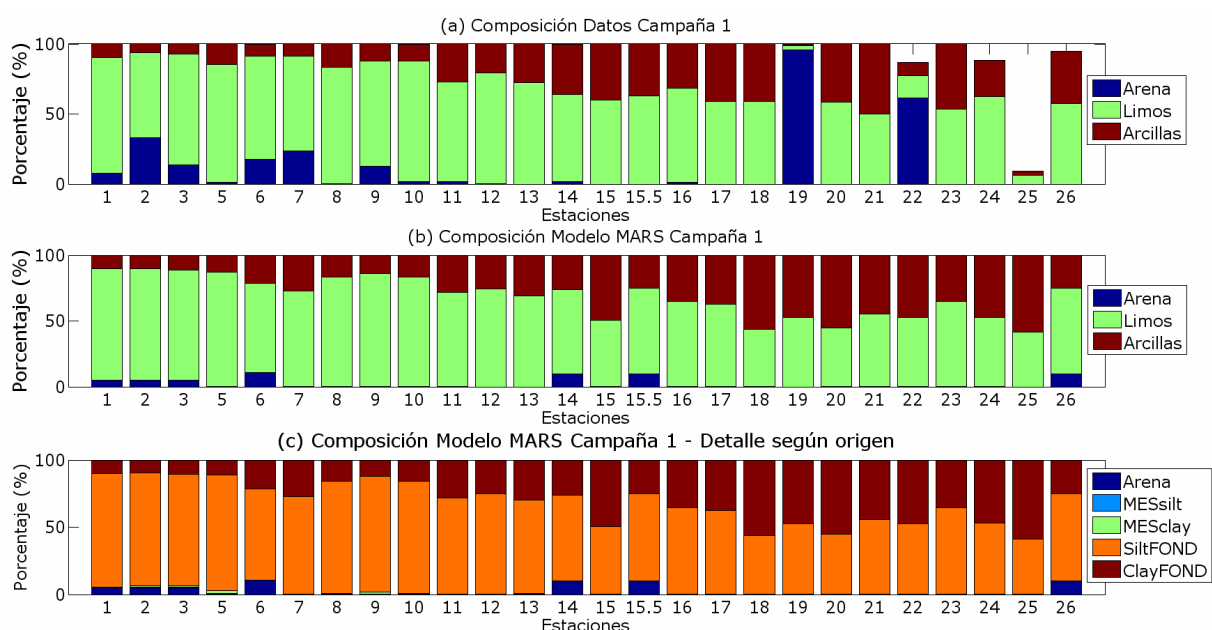


Figura 4.45: Composición del material de fondo (a) medido en la campaña 1 de noviembre 2009, (b) obtenidos con el modelo MARS en las fechas correspondientes a la campaña 1 y (c) el detalle de los resultados del modelo en función del origen del material. Estaciones de medición #1 a #26.

Debido a la estabilidad de la composición del material de fondo según los análisis realizados a los datos medidos (ver Capítulo 2) básicamente los resultados generales se mantienen para las cuatro campañas consideradas. Se observa que en general el modelo representa la distribución de las proporciones principales de los materiales de fondo. Es importante aclarar para las estaciones #2, #3, #6, #14, #15 y #15bis el modelo no muestra deposición y por tanto la composición presentada corresponde a la composición original de Laborde. También es importante aclarar la comparación en la estación #19 no es válida pues la condición inicial del modelo (tipo arena pero espesor nulo) no contempló las características básicas de la zona, y por tanto solamente es posible comparar la componente del material fino en la misma. Más allá de dicha aclaración, es posible observar que en la estaciones #1, #5 y #7 el modelo representa correctamente la composición en todas las campañas. En la estación #8 hay diferencias en la campaña 2 donde los datos muestran un porcentaje de arcilla levemente mayor, siendo en las otras campañas la representación del modelo muy similar. Analizando las estaciones #9, #10, #11 y #12 se observa el modelo representa correctamente las proporciones de arcilla y

limo observadas en los datos e incluso representa el mayor porcentaje de arcilla que se observa en la estación #11.

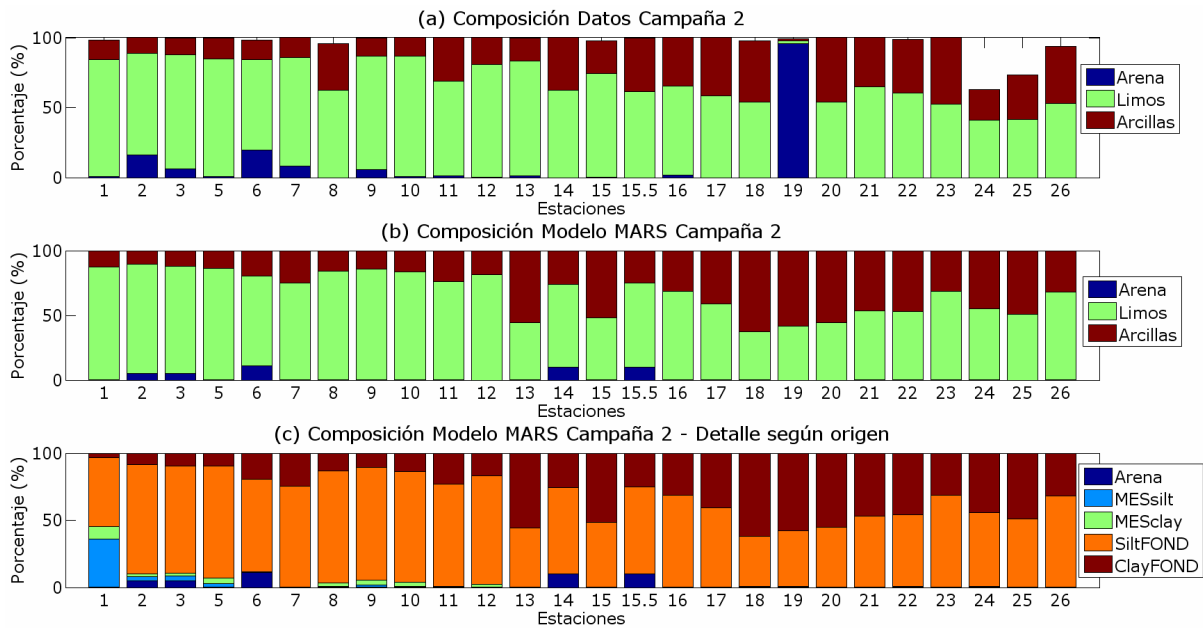


Figura 4.46: Composición del material de fondo (a) medido en la campaña 2 de marzo 2010, (b) obtenidos con el modelo MARS en las fechas correspondientes a la campaña 2 y (c) el detalle de los resultados del modelo en función del origen del material. Estaciones de medición #1 a #26.

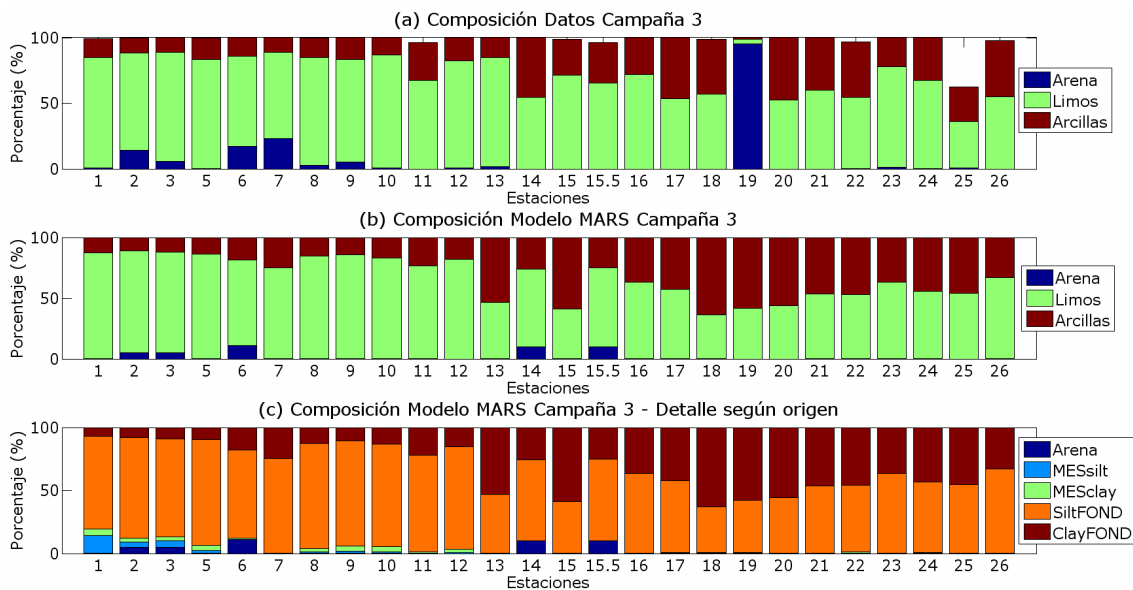


Figura 4.47: Composición del material de fondo (a) medido en la campaña 3 de junio 2009, (b) obtenidos con el modelo MARS en las fechas correspondientes a la campaña 3 y (c) el detalle de los resultados del modelo en función del origen del material. Estaciones de medición #1 a #26.

En la estación #13 se observan algunas diferencias entre el modelo y los datos de las campañas 2, 3, y 4, donde en general el modelo representa mayor porcentaje de arcilla que lo que muestran los datos. En las estaciones #16 y #17 se observa el modelo representa correctamente la composición de los materiales medidos. En la estación exterior #18 en general el modelo representa mayores porcentajes de arcilla que lo que muestran los datos de las cuatro campañas. En las estaciones exteriores #21, #22, #23,

#24 y #26 en general el modelo reproduce las distribuciones de composición del material que muestran los datos, salvo algunas excepciones (estación #22 campaña 1 o estación #24 campaña 2). Respecto a la estación #25 los datos medidos muestran cierto porcentaje de grava y un predominio de los limos dentro de los materiales finos mientras que el modelo en general representa un mayor porcentaje de arcillas.

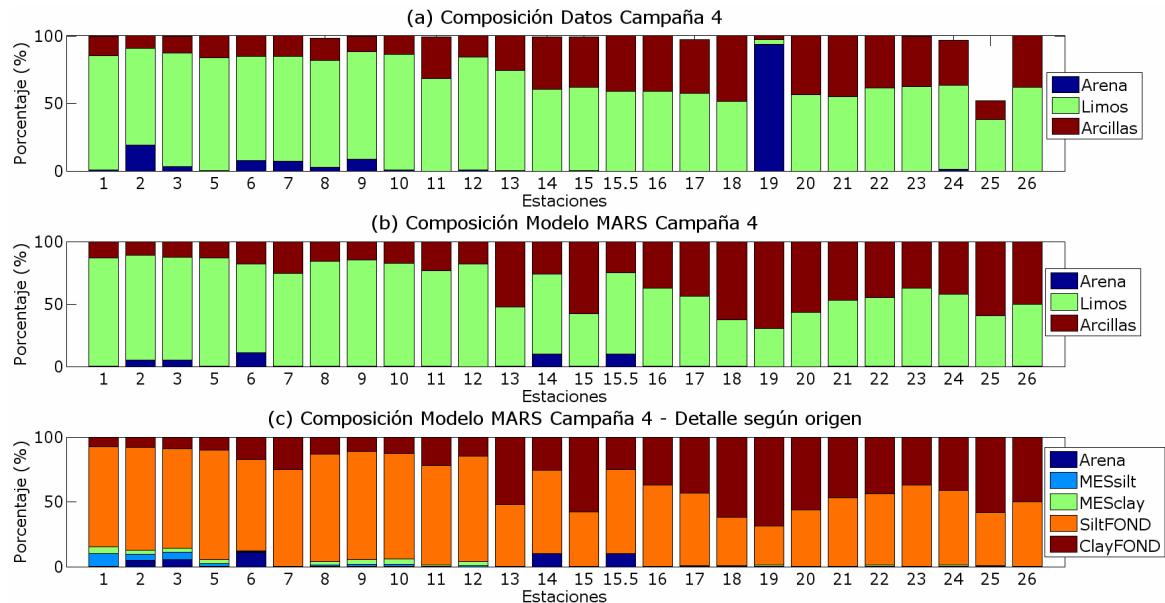


Figura 4.48: Composición del material de fondo (a) medido en la campaña 4 de agosto 2010, (b) obtenidos con el modelo MARS en las fechas correspondientes a la campaña 4 y (c) el detalle de los resultados del modelo en función del origen del material. Estaciones de medición #1 a #26.

Se observa también en las comparaciones presentadas, que básicamente los materiales SILTfond y CLAYfond constituyen el sedimento del fondo, siendo muy leves los aportes de las variables fluviales MESSilt y MESclay. Estos se encuentran solamente en las estaciones interiores y algunas estaciones intermedias. Teniendo esto en cuenta y considerando los buenos resultados obtenidos en la representación de la composición del material de fondo por parte del modelo, se verifica la importancia de considerar información lo más real posible en la composición del sedimento de fondo al simular la dinámica del Río de la Plata.

4.7.3. Síntesis

Luego de que se determinaron los parámetros finales del modelo de sedimentos finos se simuló el período completo 2009-2010 como validación del mismo partiendo de la condición inicial de fondo Laborde. Para evaluar el modelo se compararon los resultados con las medidas válidas de series temporales de turbidez (Pilote Norden, Torre Oyarvide y Boya Oceanográfica), perfiles de sedimento en suspensión en las estaciones de control, y composición del sedimento de fondo también en las estaciones de control. También se testeó la representación de medidas indirectas de concentración de sedimento en suspensión en la costa de Montevideo. A partir de ésta evaluación se determina la calidad del modelo de dinámica de sedimentos finos del Río de la Plata implementado y ajustado.

En términos generales es posible afirmar el modelo representa correctamente las principales características de la dinámica de sedimentos finos observada en los datos. En la zona interior e intermedia se reproducen valores de base de concentración similares a los medidos dados por la componente de marea del flujo. A su vez, los incrementos de

concentración generados en la zona intermedia principalmente por las fuertes tormentas también son representados correctamente por el modelo. No obstante es posible afirmar que el modelo podría subestimar un poco los picos de concentración máxima. En la zona interior el modelo presenta debilidad en la representación de ciertas fluctuaciones respecto a la señal de marea. Los errores calculados a partir de la representación de los perfiles verticales en la zona interior e intermedia muestran valores razonables con un promedio de 15 mg/l, mientras que el error obtenido en la representación de la serie continua de Torre Oyarvide es igual a 26 mg/l. En la zona exterior ocurre que la dinámica de sedimentos finos es distinta a la descrita en la zona interior e intermedia, y el modelo lo representa. La comparación de las series continuas medidas en la Boya muestra que el modelo reproduce correctamente los valores bajos de concentración en términos de calma y el incremento de concentración y la duración de los eventos de resuspensión generados por las tormentas. La comparación de los perfiles verticales muestra a su vez que el modelo en general representa estratificación como las medidas, siendo el error promedio en la zona exterior igual a 30 mg/l.

Por último, es posible afirmar que el modelo representa correctamente la distribución espacial de la composición del sedimento de fondo en todo el Río de la Plata que muestran los datos. Se representa correctamente el incremento gradual del porcentaje del material fino arcilla en relación al material tipo limo que se observa a medida que las estaciones de control se ubican hacia el exterior del Río de la Plata. Esto demuestra por un lado la importancia de considerar información inicial apropiada y real en el modelo, y por otro certifica indirectamente la correcta parametrización del modelo de los procesos de transporte y velocidad de caída por ejemplo.

4.8. SÍNTESIS DEL CAPÍTULO

En este capítulo se ha presentado todo lo concerniente al trabajo con el modelo de sedimentos finos MARS implementado en el Río de la Plata (rank1) en términos de su implementación, testeo, ajuste y validación. El ajuste del modelo, y la posterior confianza en los resultados del mismo, se considera una parte esencial de este trabajo y los análisis posteriores estarán condicionados totalmente por los resultados obtenidos durante la misma. Debido a esto, se realizó un gran esfuerzo en el ajuste del modelo, a través del análisis y exploración de diversas opciones para mejorar los resultados, y a través de la comparación con la mayor cantidad posible de medidas de campo de variables vinculadas.

A pesar de la complejidad de la dinámica de sedimentos finos en general, se utilizó la estrategia de simplificar lo más posible los procesos para resolver las cuestiones básicas del sistema. En este sentido se decide por ejemplo no incluir el proceso de consolidación del sedimento de fondo en el modelo, a pesar de los avances que se realizaron en el estudio de dicho proceso en laboratorio. En igual sentido, no se representa directamente la dependencia de la velocidad de caída del material tipo arcilla con la salinidad (vinculadas por el incremento de la floculación), sino que se utiliza una formulación que incluye solamente las variaciones con la concentración y representa los procesos de floculación. Por otra parte, se considera que la erosión del material de fondo, representada en el modelo por la tensión crítica de erosión y la tasa de resuspensión, no depende del tipo de material de fondo y por tanto es uniforme en todo el dominio de cálculo. De esta manera no se contemplan posibles efectos de acorazamiento que pueden generar los materiales finos al mezclarse con materiales más gruesos.

A pesar de las simplificaciones realizadas se considera el modelo ajustado logra representar las principales características de la dinámica de sedimentos finos en la zona de estudio. El modelo reproduce correctamente los valores de base de concentración de

sedimento en suspensión en la zona interior e intermedia durante los períodos de calma, así como también los incrementos y posteriores descensos de concentración que ocurren en dichas zonas durante las tormentas. En la zona exterior el modelo representa en general la estratificación vertical dominada por la estratificación salina, así como también los eventos de altas concentraciones en suspensión generados por tormentas. Se optó por seleccionar una parametrización final que no exceda los picos de sedimento en suspensión representados durante los eventos máximos para no generar mayor cantidad de sedimento en suspensión. Esto significa el modelo debe tomarse como una herramienta conservadora en cuanto a la cantidad de sedimento en suspensión.

Se considera que hay varios elementos que han sido clave para obtener resultados de buena calidad con el modelo MARS implementado. En primer lugar diferenciar las fracciones de material limo y arcilla como variables del modelo ha sido esencial para poder diferenciar los comportamientos de las mismas y poder así representar correctamente ambas dinámicas. Además, luego de haber realizado los diversos análisis de sensibilidad y ajustes, se considera que utilizar leyes de velocidad de caída variables con la concentración del sedimento para ambas fracciones de finos es muy importante para obtener buenos resultados. Es relevante diferenciar las velocidades mínimas de caída en la ley de cada material para representar las dinámicas del material arcilloso y del material limoso. De esta manera en el modelo se incluye la aglomeración de las partículas y por tanto el incremento de velocidad de caída también para la fracción limo. En las leyes consideradas finalmente se utiliza el mismo valor máximo de velocidad de caída y concentración máxima para ambos materiales, lo que aproxima los valores de caída de ambos a medida que las concentraciones son mayores. De esta manera en las zonas donde hay mayor concentración de limos, que coincide con la zona exterior y donde se encuentra una fuerte proporción de material arcilloso, se supone ambas fracciones se comportan como un único material y tienen una misma dinámica.

Otro factor importante para lograr buenos resultados es la inclusión de información real del sedimento de fondo en el modelo. Esto se realizó imponiendo como condición inicial la carta histórica de composición de material de fondo de Laborde que incluye 8 tipos de materiales en función de diversas combinaciones de los porcentajes de arena, limo y arcilla. El modelo a partir de dicha condición inicial y de la dinámica que resuelve determina la evolución del sedimento de fondo, tanto en espesor como en composición. Esta componente del modelo se controló con datos de composición de sedimento de fondo medidos en el Proyecto FREPLATA-FFEM, los cuales muestran que hacia el exterior del Río de la Plata se incrementa el porcentaje de arcilla. La comparación mostró que el modelo representa correctamente la variación espacial del sedimento de fondo, lo que a su vez es un chequeo indirecto positivo de la representación de la dinámica de sedimentos en la columna de agua.

Por otra parte, se ha verificado con el modelo el predominio que tienen los procesos de intercambio con el sedimento de fondo, erosión y deposición, en la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata. Ha sido entonces relevante la incorporación en el modelo de sedimentos de las tensiones de corte generadas tanto por el forzante de marea como las generadas por el oleaje en la zona, determinantes en el proceso de erosión. No se ha incluido la afectación del flujo oscilatorio en el perfil vertical de flujo y por tanto en la componente del transporte de sedimentos, lo que sin duda es una simplificación. No obstante el flujo en el Río de la Plata está dominado por los forzantes ingresados en el modelo hidrodinámico MARS implementado, es decir, las mareas astronómicas y meteorológicas, el caudal fluvial y las corrientes por densidad generadas por el gradiente de salinidad en la zona exterior.

También en relación a la dinámica de intercambio con el fondo mencionada se han obtenido resultados favorables simplificando la dinámica dada por los procesos de

erosión y deposición tradicionalmente considerados. Es habitual simplificar la compleja dinámica de intercambio con el fondo en base a la separación del proceso de erosión (remoción de material del fondo y resuspensión del mismo en la columna de agua) del proceso de deposición (decantación de las partículas en suspensión con posterior deposición sobre el fondo), en función de las tensiones de corte de fondo. Tensiones de corte de fondo altas potencian la resuspensión y tensiones de corte de fondo bajas potencian la deposición. Considerando en el modelo MARS ambos procesos por separado (para la resolución espacial considerada) no fue posible representar a la vez los incrementos de concentración en suspensión durante eventos de fuerte resuspensión junto con la posterior caída post evento. Esto significa el modelo no fue capaz de reproducir la erosión y la deposición posterior simultáneamente; si se ajustaba la erosión entonces posteriormente quedaba mucho sedimento en suspensión sin depositar, y para representar los valores bajos post evento no se lograba erosionar lo suficiente durante el evento. Ambos procesos pudieron representarse cuando se impuso una alta tensión de corte de deposición, lo que indirectamente elimina la diferenciación de ambas etapas en las escalas temporales consideradas, y solamente considera un balance global en el cual hay erosión de material de fondo siempre y cuando se supere cierto umbral de tensión de corte, y siempre y cuando se supere el flujo de deposición existente dado por la velocidad de caída y la concentración. De esta manera si la concentración en las capas de fondo de la columna de agua es elevada ocurrirá erosión de material de fondo siempre y cuando se supere esa cantidad de material que está depositando en dicho instante.

Luego de este trabajo de ajuste del modelo se cuenta con una herramienta testeada y validada que puede utilizarse para caracterizar los aspectos principales de la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata.

Capítulo 5

5. ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DE SEDIMENTOS FINOS

5.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es determinar las principales características de la dinámica de sedimentos finos cohesivos en todo el Río de la Plata, lo que se realiza en base al análisis de los resultados obtenidos con el modelo. El correcto desarrollo de las etapas anteriores, análisis de datos, implementación y ajuste del modelo hidrodinámico (en las componentes de marea y de oleaje), y la implementación y ajuste del modelo de sedimentos finos, permiten utilizar el modelo como herramienta de generación de información. En particular, se trabaja con los forzantes del período 2009-2010 por la disponibilidad de los mismos. De esta manera es posible contar con información detallada de cómo es la dinámica de los sedimentos finos (limos y arcillas) en el Río de la Plata con una resolución adecuada en la columna de agua (10 capas). Además, el modelo representa la interacción con el sedimento de fondo y por tanto se genera información relativa a cómo es la evolución del mismo. Teniendo en cuenta la variabilidad de los procesos hidrodinámicos (mareas, oleaje y salinidad) un período de tiempo de 2 años se considera aceptable para obtener una caracterización global de la dinámica de sedimentos finos, incluyendo todas las estaciones climáticas, una diversidad de tormentas, períodos dominados por marea, períodos de eventos fuertes de marea meteorológica y los ciclos estacionales de las descargas continentales. No obstante, contando con la herramienta desarrollada, será posible en el futuro extender el período de tiempo simulado para mejorar aún más el conocimiento de la dinámica de los sedimentos finos en la zona.

Se realiza un análisis exhaustivo de la dinámica de sedimentos finos durante los dos años simulados determinando la evolución del sedimento en suspensión y del sedimento de fondo. En particular se analizan las series temporales y los patrones espaciales tanto del sedimento en suspensión en la columna de agua como del sedimento de fondo. Los resultados obtenidos muestran una gran variabilidad de la dinámica en función de la zona del Río de la Plata, donde los forzantes corrientes y tormentas presentan diversas características. Además, en la zona exterior el campo salino es determinante en la dinámica de sedimento cohesivo. De esta manera es posible determinar zonas de dinámica de sedimentos cohesivos diferente en el Río de la Plata.

A partir de los resultados de las simulaciones se realiza también una zonificación del fondo del Río de la Plata según la tendencia a la erosión o a la deposición. Se obtiene una estabilidad de dicha zonificación en los dos años simulados. Con el objetivo de analizar si las mismas varían con el tiempo se continúa la simulación realizada

repetiendo los forzantes del período 2009-2010 pero utilizando como condición inicial del sedimento de fondo las características (espesor y composición en el dominio de cálculo) obtenidas luego de los dos años de simulación. Los resultados obtenidos muestran que la zonificación establecida permanece a lo largo del tiempo.

Por último, se utiliza el modelo para evaluar hacia dónde se dirige el sedimento de fondo del Río de la Plata, y para determinar de dónde proviene el sedimento en suspensión que se observa en las diversas áreas del mismo. Esto se realizó dividiendo el fondo del Río de la Plata en 10 zonas diferentes, definidas según los principales aspectos de la dinámica determinados en los análisis anteriores. Para cada zona se definieron dos variables del modelo, el sedimento tipo limo y el sedimento tipo arcilla, y se realizó una simulación de 10 meses de duración. Analizando la evolución temporal del sedimento originario de cada zona se determinan nuevos elementos sobre el transporte de sedimento fino en la zona de estudio.

5.2. SIMULACIÓN PERÍODO 2009-2010

5.2.1. Características generales

La simulación del período de tiempo 2009-2010 con el modelo MARS ajustado, descripta hacia finales del Capítulo 4, se utiliza para determinar las principales características de la dinámica de sedimentos finos en todo el Río de la Plata. Por un lado se cuenta con la dinámica determinada en las 10 capas de la columna de agua durante los 2 años simulados, y por otro la evolución temporal del sedimento de fondo. El sedimento de fondo se caracteriza por el espesor del depósito generado durante la simulación (positivo o negativo) y la concentración de los tipos de sedimento, limo y arcilla, provenientes del fondo inicialmente (SILTfond y CLAYfond) ó de la descarga fluvial (MESSilt y MESclay).

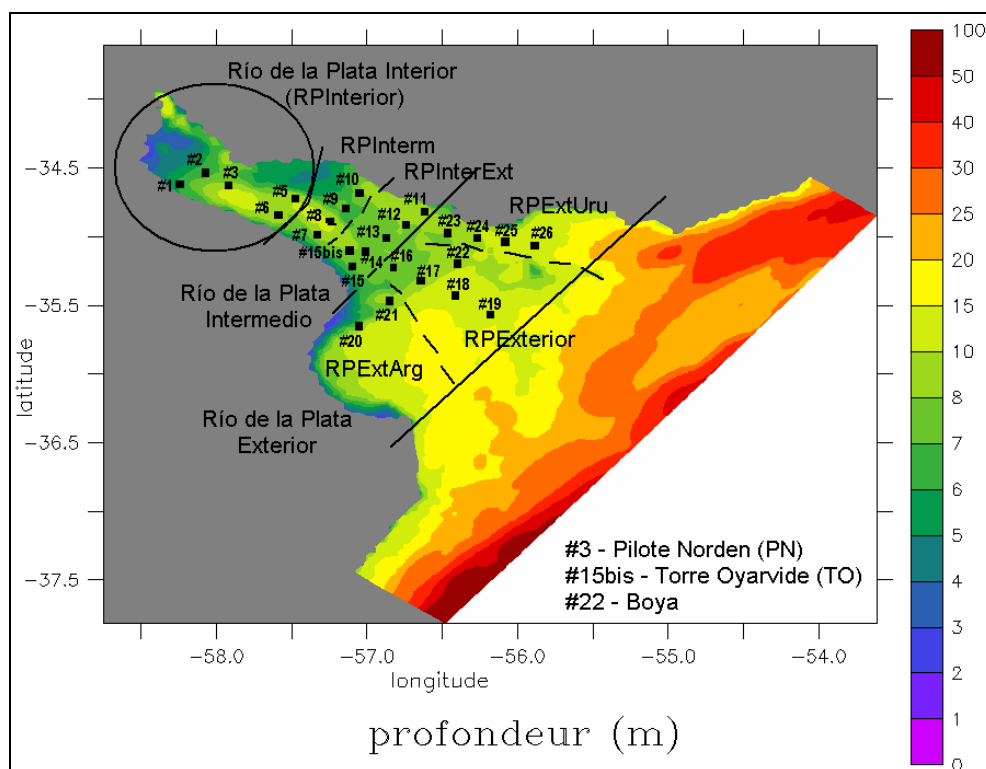


Figura 5.1: Estaciones de monitoreo definidas en el Río de la Plata (#1 a #26) y definición de las zonas del mismo. Batimetría en metros.

Se analizan por un lado las series temporales de las diversas variables en las 26 estaciones de control distribuidas en todo el Río de la Plata presentadas en la Figura 5.1. Por otra parte se determinan ciertos campos espaciales estadísticos de interés que permiten analizar simultáneamente la información en todo el dominio. Como se mencionó se estudia la dinámica a nivel de columna de agua y la dinámica (evolución) del sedimento de fondo.

5.2.2. Variación temporal diaria

A partir de los resultados del modelo se analiza la evolución temporal de las variables de interés y se identifican comportamientos principales de la dinámica. Se selecciona el mes de enero de 2010 para analizar en detalle la evolución temporal diaria de las variables sedimentológicas en las estaciones de control. No obstante los comportamientos generales descritos se identifican durante los dos años simulados. Los resultados muestran comportamientos muy diferentes según la ubicación de la estación de control determinados por la importancia relativa de los forzantes de marea y de oleaje. Para cada estación se analiza en simultáneo la variación de la superficie libre, las tensiones de corte de marea y de oleaje, la concentración del sedimento en suspensión en las capas de fondo, profundidad media y superficie, salinidad en las mismas capas, y evolución del espesor de fondo.

En las Figuras 5.2 y 5.3 se presentan los resultados obtenidos para las estaciones de control #1, #2, #3, #5 y #6 ubicadas en el Río de la Plata interior. En las estaciones #1 y #2 se observa un comportamiento similar donde la concentración de sedimento está determinada principalmente por la variación de la marea, lo que genera pequeñas fluctuaciones de la misma alrededor de un valor de base. Superpuesto a dicho comportamiento se observa el efecto puntual durante los eventos de oleaje, que generan tensiones de corte mayores a las de marea, y producen fuertes resuspensiones del sedimento de fondo incrementando la concentración de sedimento en suspensión respecto al valor de base. El espesor de fondo muestra leves variaciones durante todo el mes según el ciclo de marea y eventos de gran descenso generados por el oleaje, con una posterior recuperación generada por la deposición del material en suspensión luego de la tormenta. Analizando la situación final e inicial del espesor de fondo no se observan grandes cambios durante el mes. En la estación #3 las tensiones de corte durante las tormentas son de magnitud similar a las tensiones de corte de marea, esto genera se observe menor variabilidad de la concentración del sedimento en suspensión en relación al valor de base determinado por el ciclo de erosión deposición semi-permanente regulado por la marea. El espesor del sedimento de fondo presenta una variabilidad de corta escala asociada a la marea con eventos de mayor descenso durante las tormentas (con posterior deposición), pero se observa cierta estabilidad de escala mensual. Finalmente en las estaciones #5 y #6 se observa las tensiones generadas por la marea superan a las tensiones generadas por el oleaje en magnitud, lo que genera los picos de concentración en sedimento en suspensión sean leves en relación a los valores de base impuestos por el ciclo de erosión y deposición por la marea. Se observa en estas estaciones cierta asimetría en los dos picos de marea diarios, lo que genera fluctuaciones asociadas en la variación de sedimento en suspensión. En relación a la evolución del espesor de fondo en ambas estaciones se observan las variaciones asociadas a la erosión y deposición rápida de marea superpuesta con los ciclos más intensos generados por el oleaje, no obstante en el comportamiento neto en el mes en la estación #5 se observa un incremento y en la estación #6 una disminución del espesor de sedimento de fondo. En relación a la variación vertical de concentración de sedimento en suspensión en las 5 estaciones de control de la zona interior se observan leves variaciones y prácticamente los perfiles son cuasi homogéneos.

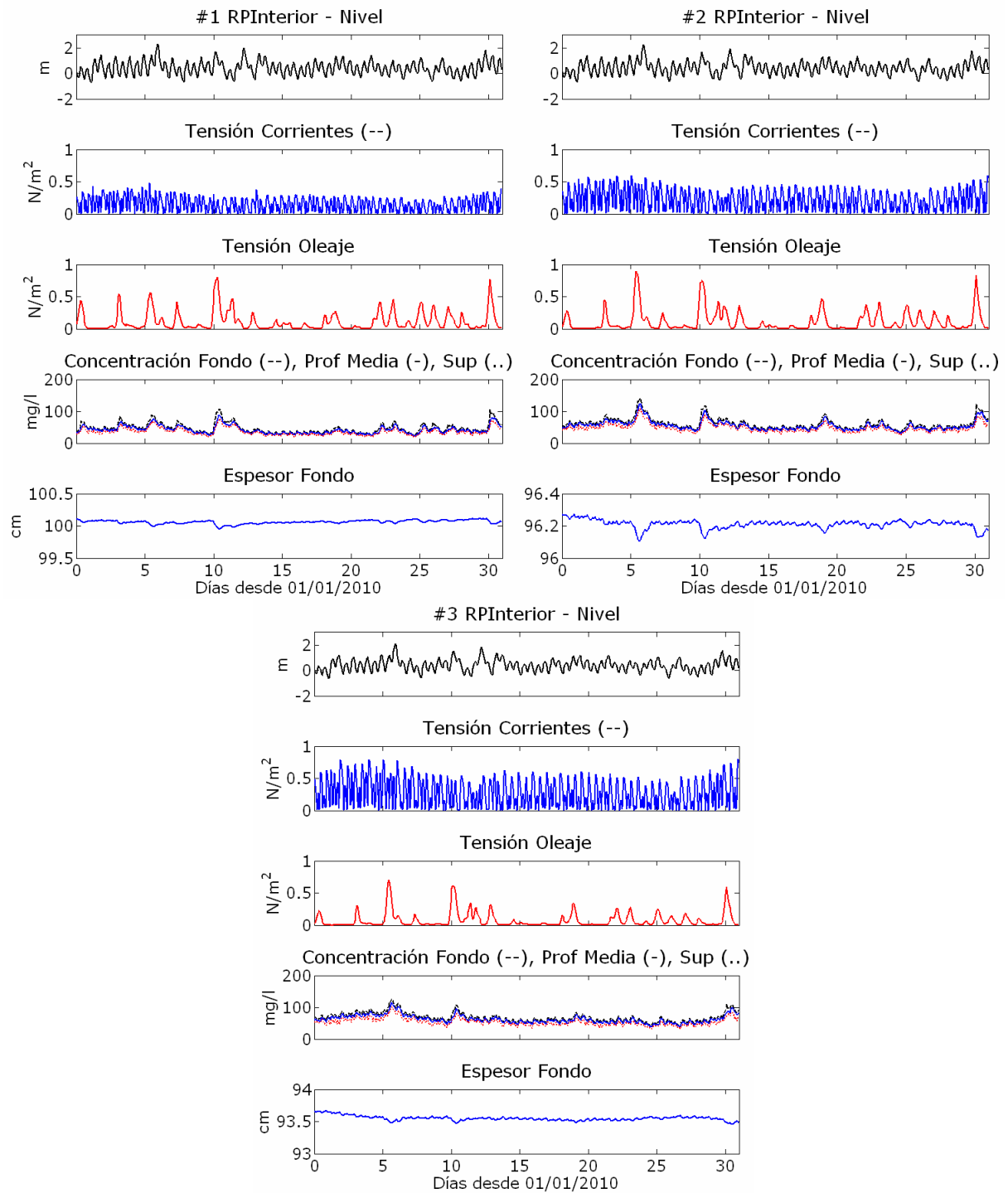


Figura 5.2: Variación temporal durante enero 2010 de la elevación de la superficie libre, tensiones de corte de corrientes y de oleaje, concentración del sedimento en suspensión en fondo, profundidad media y superficie, y del espesor de fondo en las estaciones de control #1 (panel superior izquierdo), #2 (panel superior derecho) y #3 (panel inferior).

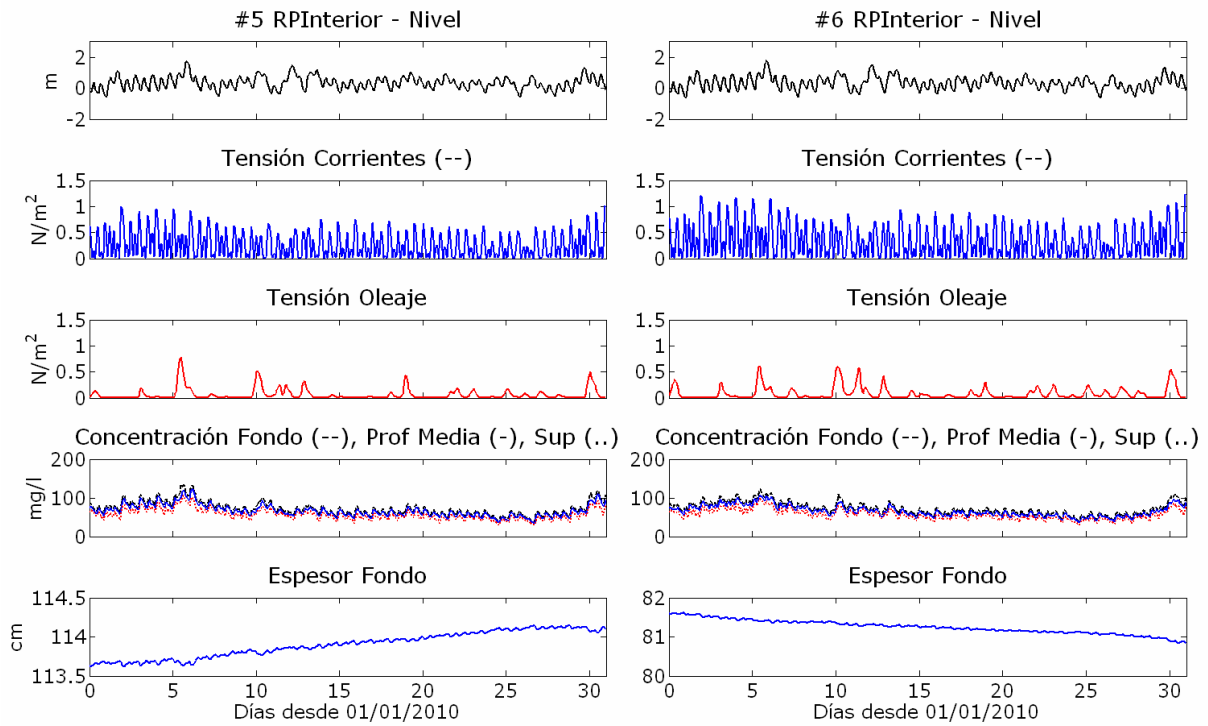


Figura 5.3: Variación temporal durante enero 2010 de la elevación de la superficie libre, tensiones de corte de corrientes y de oleaje, concentración del sedimento en suspensión en fondo, profundidad media y superficie, y del espesor de fondo en las estaciones de control #5 (paneles izquierdo) y #6 (paneles derechos).

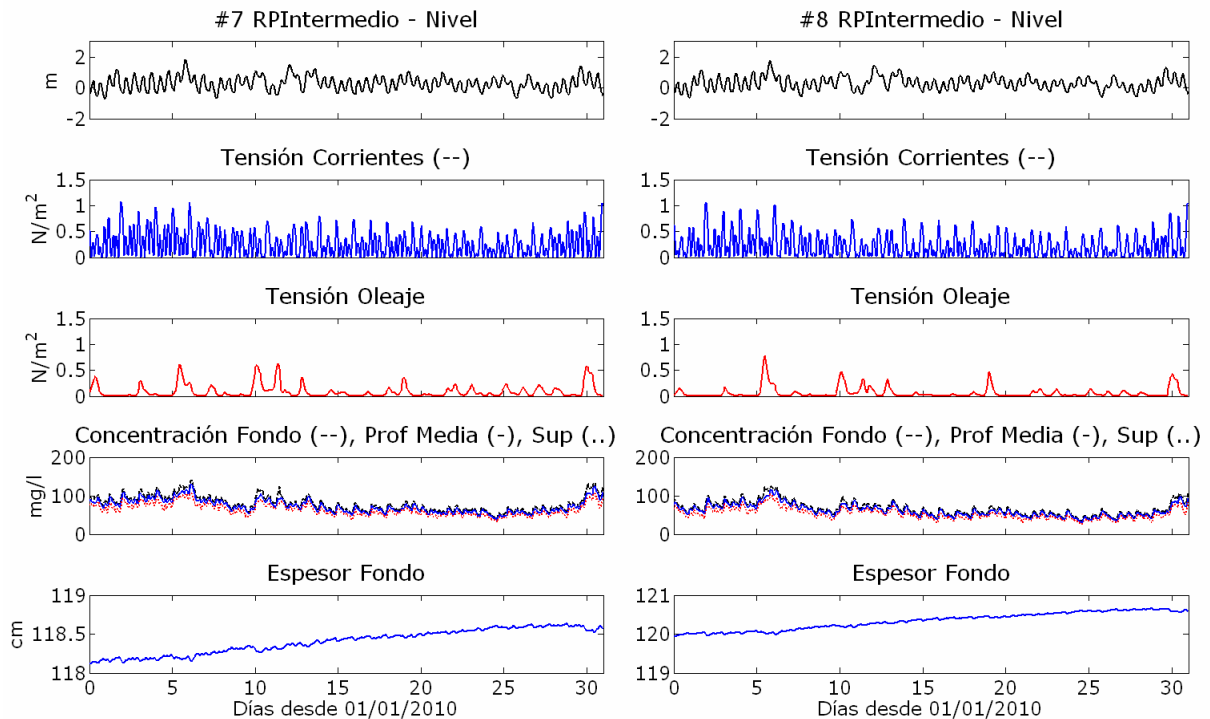


Figura 5.4: Variación temporal durante enero 2010 de la elevación de la superficie libre, tensiones de corte de corrientes y de oleaje, concentración del sedimento en suspensión en fondo, profundidad media y superficie, y del espesor de fondo en las estaciones de control #7 (paneles izquierdo) y #8 (paneles derechos).

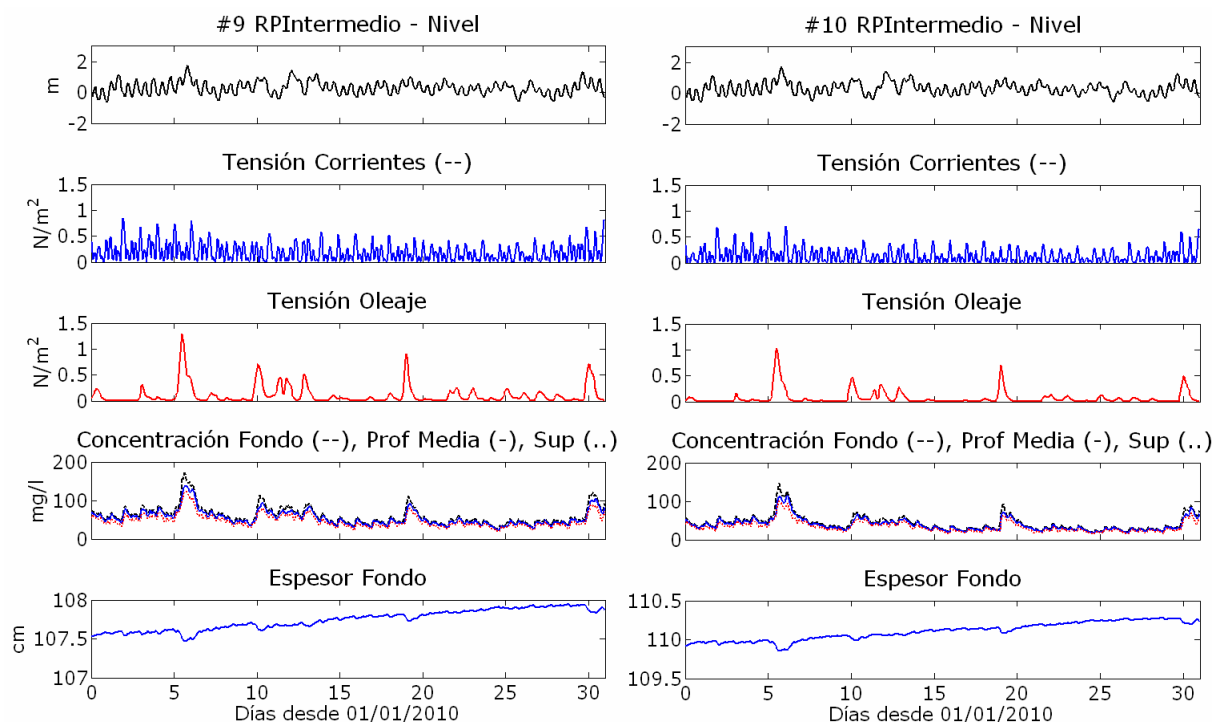


Figura 5.5: Variación temporal durante enero 2010 de la elevación de la superficie libre, tensiones de corte de corrientes y de oleaje, concentración del sedimento en suspensión en fondo, profundidad media y superficie, y del espesor de fondo en las estaciones de control #9 (paneles izquierdo) y #10 (paneles derechos).

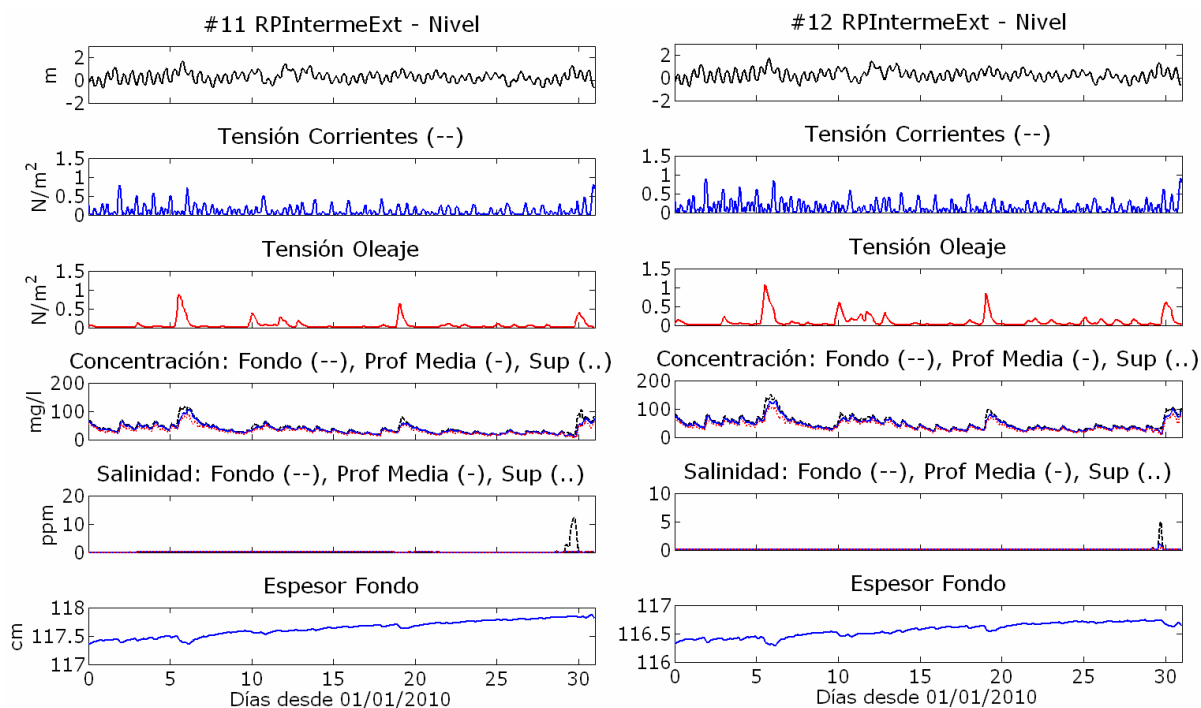


Figura 5.6: Variación temporal durante enero 2010 de la elevación de la superficie libre, tensiones de corte de corrientes y de oleaje, concentración del sedimento en suspensión y salinidad en fondo, profundidad media y superficie, y del espesor de fondo en las estaciones de control #11 (paneles izquierdo) y #12 (paneles derechos).

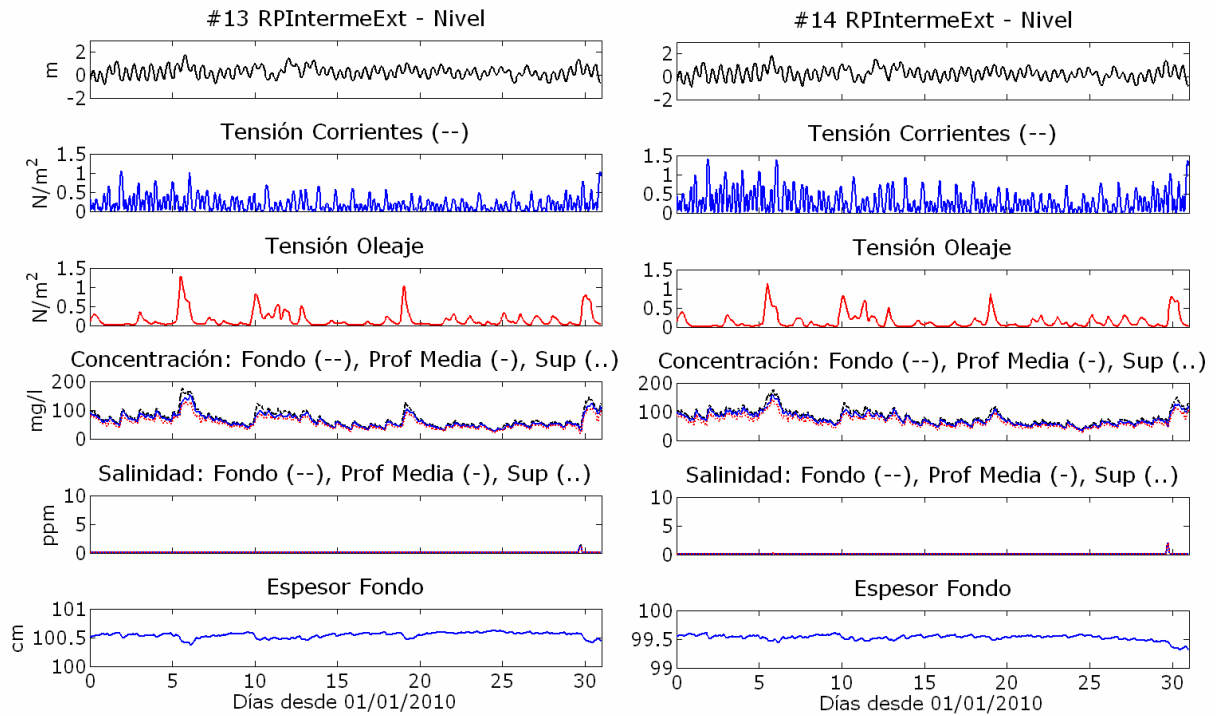


Figura 5.7: Variación temporal durante enero 2010 de la elevación de la superficie libre, tensiones de corte de corrientes y de oleaje, concentración del sedimento en suspensión y salinidad en fondo, profundidad media y superficie, y del espesor de fondo en las estaciones de control #13 (paneles izquierdo) y #14 (paneles derechos).

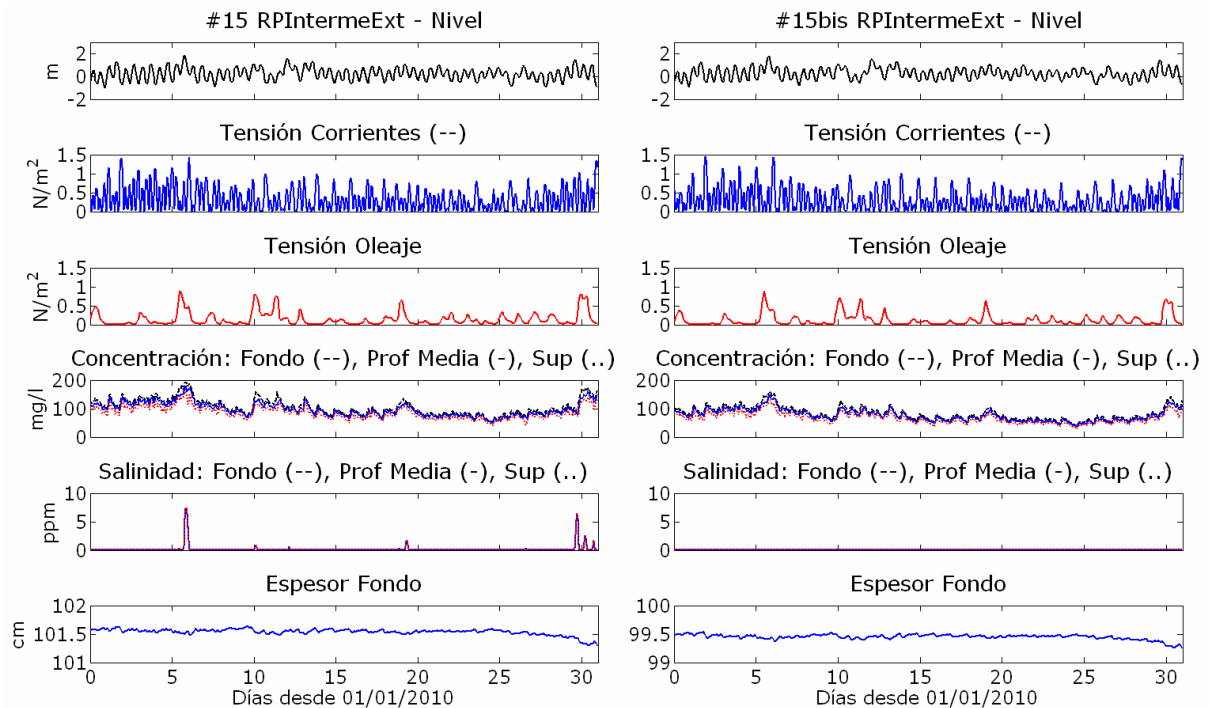


Figura 5.8: Variación temporal durante enero 2010 de la elevación de la superficie libre, tensiones de corte de corrientes y de oleaje, concentración del sedimento en suspensión y salinidad en fondo, profundidad media y superficie, y del espesor de fondo en las estaciones de control #15 (paneles izquierdo) y #15bis (paneles derechos).

En la Figura 5.4 se presenta el comportamiento obtenido para las estaciones #7 y #8 ubicadas en el Río de la Plata intermedio hacia la costa argentina. El comportamiento observado es similar al descrito para las estaciones cercanas #5 y #6. Las fluctuaciones de la marea dominan sobre la dinámica de sedimentos finos generando un ciclo permanente de resuspensión de material de fondo y posterior deposición, lo que responde en variaciones con la marea de la concentración de sedimento en suspensión en todo el perfil, y también del espesor del sedimento de fondo. Las tensiones que genera el oleaje en la zona no superan en magnitud a las tensiones de marea pero la mayor duración de las mismas genera incrementos de concentración leves respecto al valor de base y mayores fluctuaciones en el espesor de fondo. En ambas estaciones la tendencia neta en el mes es una leve acumulación de sedimento en el fondo. El comportamiento obtenido para las estaciones #9 y #10, ubicadas en la misma sección transversal al eje del Río de la Plata que las estaciones mencionadas anteriormente, se presenta en la Figura 5.5. Se observa en las mismas la magnitud de las tensiones de corte de oleaje excede a las tensiones generadas por marea lo que genera mayores fluctuaciones durante las tormentas de la concentración de sedimento en suspensión en relación a lo observado en las estaciones ubicadas hacia la costa argentina. El efecto de la marea continúa siendo cuasi permanente pero es menor en relación a lo observado en la costa argentina, y en cambio el efecto del oleaje se incrementa en magnitud. Esto genera que haya mayor fluctuación de la concentración de sedimento en suspensión en relación a lo que ocurre en las otras estaciones. En el espesor del sedimento de fondo también se observa el efecto de la intensidad del oleaje, con mayores fluctuaciones del espesor de fondo, aunque el comportamiento neto en el mes continúa siendo un leve incremento del mismo.

Los resultados obtenidos en las estaciones #11 y #12 ubicadas en la zona intermedia del Río de la Plata hacia la zona exterior y sobre la costa uruguaya se presentan en la Figura 5.6. La marea presenta en las mismas una asimetría importante entre los dos picos diarios lo que genera alternancia entre tensiones de corte altas y bajas que producen picos diarios en la variación de concentración de sedimento en suspensión. Además, la magnitud de las tensiones de marea es baja en relación a la magnitud de las tensiones generadas por el oleaje, y esta diferencia produce que durante las tormentas los picos en concentración de sedimento en suspensión sean elevados. En consecuencia se observa una alta variabilidad temporal durante el mes de la concentración de sedimento en suspensión pero con homogeneidad en la columna de agua. El sedimento de fondo responde también a la dinámica de los diversos ciclos de resuspensión y deposición con una tendencia neta de leve acumulación. En esta zona en situaciones esporádicas (dadas principalmente por vientos del sector Sur y Suroeste exteriores asociados a tormentas) se observan valores no nulos de salinidad. Los resultados obtenidos en las estaciones #13 y #14 ubicadas en la zona intermedia del Río de la Plata sobre la costa argentina y hacia la zona exterior se presentan en la Figura 5.7. Se observa la fuerza de la marea es grande sobre esta zona y genera fluctuaciones importantes de la concentración de sedimento en suspensión debido a la resuspensión de material de fondo a una escala diaria, a las cuales durante las tormentas se superpone el fuerte efecto de las tensiones del oleaje. En consecuencia hay una alta variabilidad de la concentración de sedimento en suspensión en respuesta a los eventos de marea y a los eventos de oleaje. El fondo presenta una variabilidad asociada a los eventos de resuspensión y deposición con una tendencia neta al equilibrio (estación #13) o leve erosión (#14). Se observa en general la salinidad es nula en las estaciones pues el frente salino no alcanza la zona intermedia habitualmente salvo durante ciertos eventos de fuertes tormentas. En la Figura 5.8 se presentan los resultados obtenidos para las estaciones #15 y #15bis (Torre Oyarvide) ubicadas también en la zona intermedia del Río de la Plata hacia el exterior, más cercanas a la costa argentina que la estación #14. En las mismas se observa un comportamiento similar, entre ellas y respecto al observado en la estación #14 con un incremento en las

diferencias de intensidad de la marea en relación al oleaje. La marea en esta zona domina con fuertes tensiones y menor asimetría del ciclo diario lo que genera una gran variabilidad de la concentración de sedimento en suspensión en dicha escala. El efecto del oleaje también se siente durante las tormentas lo que genera picos más intensos de aumento y disminución posterior de la concentración. Esto genera variaciones del espesor del sedimento de fondo con una leve tendencia neta a la erosión del mismo.

El comportamiento observado en la estación #16 (Figura 5.9) ubicada en la zona exterior contra el límite de la zona intermedia, es totalmente diferente al observado en todas las estaciones analizadas anteriormente. A pesar de la cercanía con las estaciones intermedias, principalmente la estación #14, la dinámica diferente de la zona exterior en cuanto a los forzantes hidrodinámicos genera un gran cambio en la dinámica de sedimentos finos en suspensión. La marea continúa siendo relevante y dominante en magnitud (tensiones de corte de fondo) durante gran parte del mes analizado, pero el oleaje genera eventos de altas tensiones. En consecuencia durante los períodos sin oleaje la marea genera un valor basal de concentración de sedimento en suspensión con fluctuaciones diarias asociadas a la misma, y durante las tormentas se observan grandes incrementos de concentración. Además, la salinidad en esta zona presenta en general valores un nulos con grandes fluctuaciones asociadas a la variabilidad del frente salino. Se observa en general que cuando la salinidad aumenta (ingresa el campo salino) hay una disminución de la concentración (salvo que coincida con una tormenta donde ambas aumentan), y mayores diferencias entre la concentración de sedimento en suspensión de fondo y de superficie. No obstante en esta estación no se observa una estratificación vertical dominante. En relación al espesor de fondo se observa una variabilidad asociada a las diversas tensiones y resuspensiones, con una tendencia neta a la acumulación de material. La estación #17 se encuentra ubicada en la misma transecta longitudinal respecto a la estación #16 pero hacia el exterior del Río de la Plata. Los resultados obtenidos (Figura 5.9) muestran una dinámica donde los elementos identificados en la estación #16 se incrementan, y que en consecuencia se diferencia todavía más en relación a la dinámica observada en la zona intermedia. El forzante de marea en esta zona exterior es leve en cuanto a magnitud y prácticamente no genera una resuspensión del material de fondo. Se observa que cuando no ocurren tormentas el fondo permanece prácticamente estable o tendiente a la deposición. El material depositado durante dichos períodos es el material transportado desde la zona intermedia principalmente o erosionado en eventos previos de tormenta. Durante las tormentas en cambio se observan fuertes incrementos de la concentración en suspensión y variaciones en el espesor de fondo. Se observan además los perfiles de salinidad y de sedimento en suspensión no son homogéneos en la zona. En el fondo la salinidad permanece cuasi estable y la salinidad de superficie varía, lo que genera una estratificación variable a lo largo del mes. La concentración de sedimento en suspensión en la vertical responde a dicha dinámica. En el fondo las concentraciones en general son mayores dominadas por la resuspensión de material de fondo principalmente durante las tormentas, y a profundidad media y superficie la concentración está dominada por el transporte de material desde las zonas aledañas. Alrededor del día 20 del mes presentado se observa ocurrió una gran tormenta que genera una resuspensión fuerte de material de fondo pero la estratificación vertical de la densidad impide la mezcla vertical y la concentración en la columna de agua no presenta grandes variaciones respecto a los valores previos ni responde al evento mencionado.

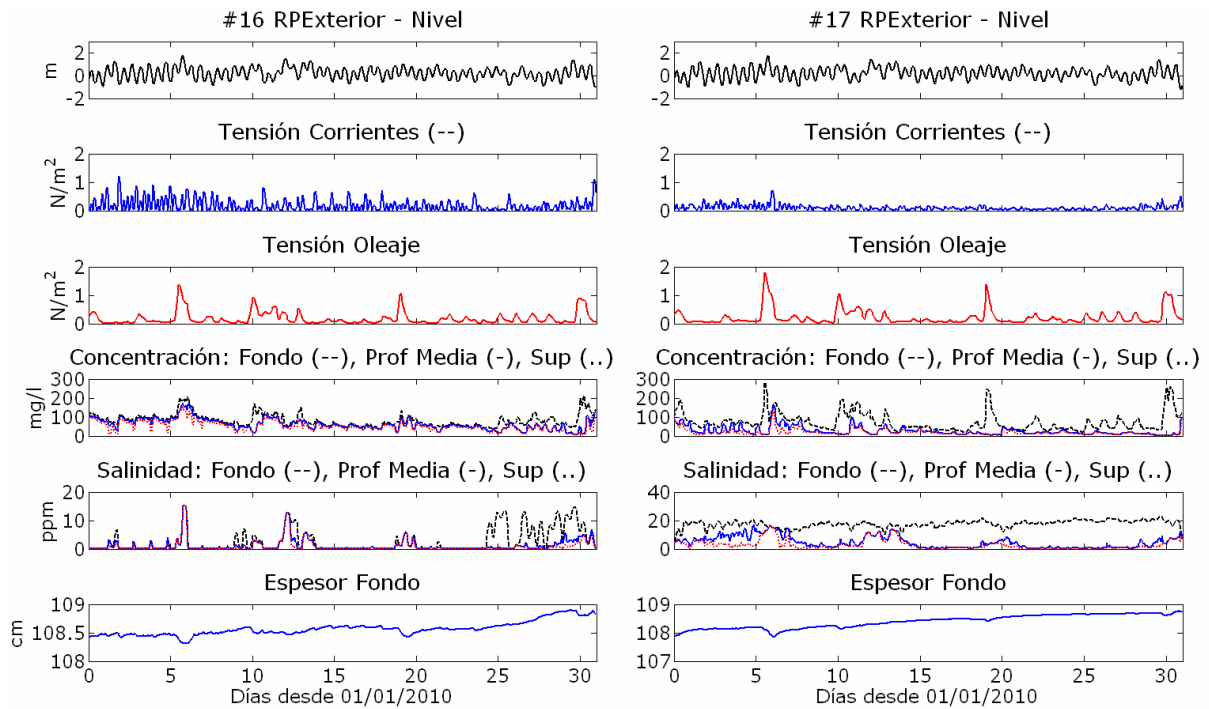


Figura 5.9: Variación temporal durante enero 2010 de la elevación de la superficie libre, tensiones de corte de corrientes y de oleaje, concentración del sedimento en suspensión y salinidad en fondo, profundidad media y superficie, y del espesor de fondo en las estaciones de control #16 (paneles izquierdo) y #17 (paneles derechos).

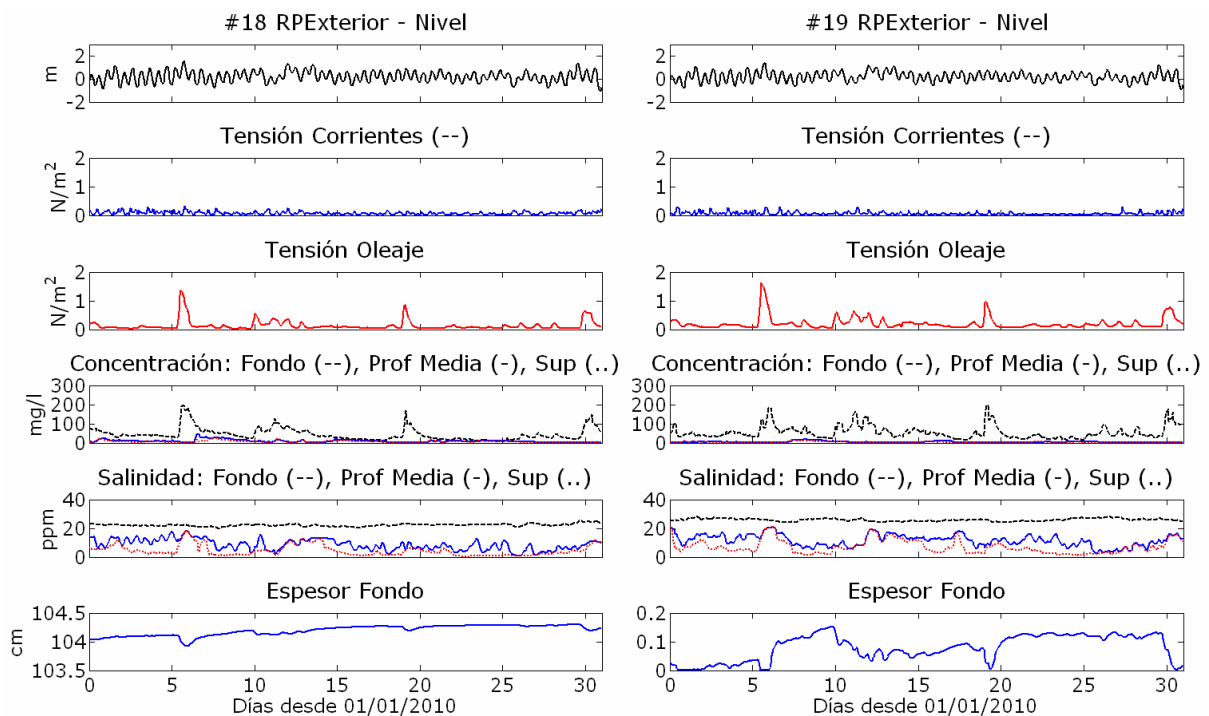


Figura 5.10: Variación temporal durante enero 2010 de la elevación de la superficie libre, tensiones de corte de corrientes y de oleaje, concentración del sedimento en suspensión y salinidad en fondo, profundidad media y superficie, y del espesor de fondo en las estaciones de control #18 (paneles izquierdo) y #19 (paneles derechos).

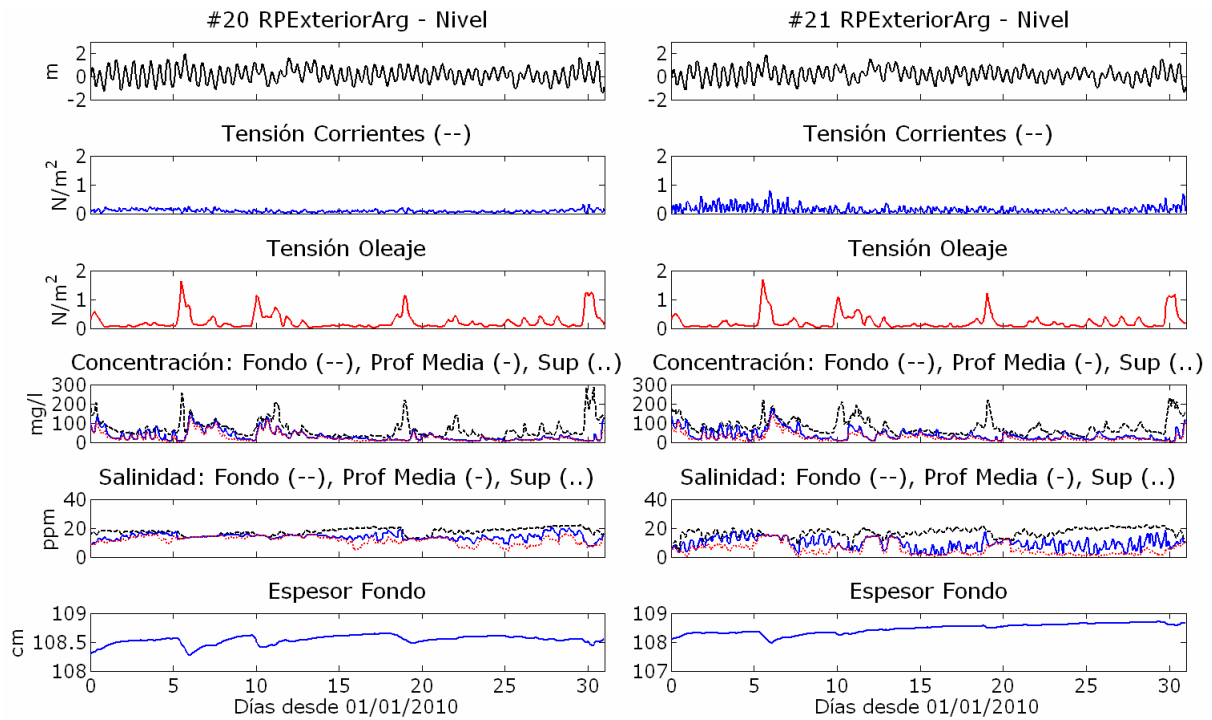


Figura 5.11: Variación temporal durante enero 2010 de la elevación de la superficie libre, tensiones de corte de corrientes y de oleaje, concentración del sedimento en suspensión y salinidad en fondo, profundidad media y superficie, y del espesor de fondo en las estaciones de control #20 (paneles izquierdo) y #21 (paneles derechos).

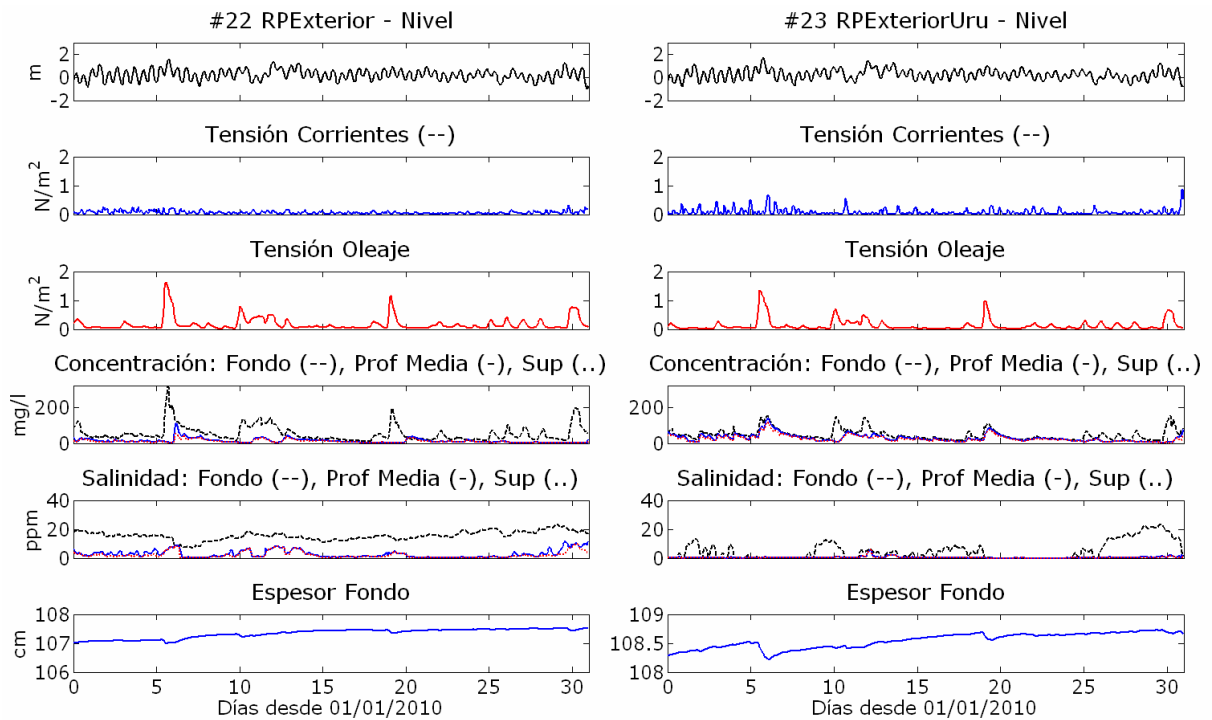


Figura 5.12: Variación temporal durante enero 2010 de la elevación de la superficie libre, tensiones de corte de corrientes y de oleaje, concentración del sedimento en suspensión y salinidad en fondo, profundidad media y superficie, y del espesor de fondo en las estaciones de control #22 (paneles izquierdo) y #23 (paneles derechos).

En la Figura 5.10 se presentan los resultados obtenidos en las estaciones #18 y #19 exteriores ubicadas en la misma transecta longitudinal que las estaciones anteriormente mencionadas #16 y #17. Se observa en las mismas una muy baja influencia de la marea sobre la dinámica de sedimentos finos en suspensión. La misma está dominada en el fondo por la resuspensión de material de fondo generada durante los eventos de oleaje (dominantes en la zona). La cuasi permanente estratificación de salinidad en la vertical impide la mezcla del material resuspendido en el fondo y en consecuencia a profundidad media y en superficie los valores son prácticamente nulos durante todo el mes. El fondo en la estación #18 presenta una tendencia neta a la acumulación, con variaciones durante el mes dadas por los eventos de oleaje. En la estación #19 (la estación analizada más exterior) el fondo presenta ciclos de deposición y erosión durante las tormentas con una tendencia neta de muy leve variabilidad. Es importante recordar en la misma el espesor de sedimento fino inicial considerado en el modelo es nulo, y por tanto no es posible identificar si existe a largo plazo una tendencia a la erosión.

En la Figura 5.11 se presentan los resultados obtenidos para las estaciones #20 y #21 ubicadas en la zona sur exterior del Río de la Plata. El comportamiento observado de la dinámica de sedimentos finos es similar al identificado en la estación exterior #17 ubicada en la misma transecta transversal. En la estación #20 (la ubicada más hacia el sur) se observan las tensiones de marea son muy leves y dominan las tensiones generadas por el oleaje durante las tormentas, lo que genera resuspensión del material de fondo durante los eventos y una fluctuación asociada de la concentración de sedimento en suspensión en la capa de fondo. A profundidad media y sobre la superficie se observan en general valores bajos de concentración asociados al transporte de sedimento desde zonas aledañas con ciertos incrementos durante los eventos de oleaje producto de la mezcla vertical coincidentes con perfiles de salinidad homogéneos. El fondo presenta fluctuaciones principalmente durante los eventos de erosión por oleaje con una tendencia neta de leve acumulación. En la estación #21 el comportamiento es similar pero la marea presenta magnitudes un poco mayores y por tanto durante períodos de calma se observa una respuesta del sedimento en suspensión a la misma. En esta estación el fondo presenta una leve tendencia a la acumulación de material.

Los resultados obtenidos en la estación exterior #22 (Boya Oceanografica), presentados en la Figura 5.12, son similares a los obtenidos en la estación cercana #17 descritos anteriormente. La fuerza de la marea en la zona es muy baja y la dinámica de sedimentos finos está gobernada por la resuspensión de material de fondo durante los eventos de tormenta. La predominante estratificación del campo salino en la zona genera sea muy leve la mezcla vertical del sedimento en suspensión de las capas del fondo y por tanto a profundidad media y en superficie los valores son bajos y dominados por el transporte de material desde zonas aledañas. El fondo presenta leves fluctuaciones con una tendencia a la acumulación del material que arriba a la zona y deposita durante los períodos sin tormenta.

En la Figura 5.12 también se presentan los resultados obtenidos en la estación #23 ubicada en la zona exterior hacia la zona intermedia sobre la costa uruguaya. El comportamiento observado en esta estación corresponde a la transición entre la dinámica de la zona intermedia y de la zona exterior, similar al observado en la estación #16. La marea presenta magnitudes bajas y prácticamente no genera resuspensión de material de fondo pero el transporte del material permanentemente erosionado en la zona intermedia cercana determina valores bajos basales de concentración de sedimento en suspensión. Durante las tormentas la erosión se incrementa fuertemente y se producen picos de concentración de sedimento en suspensión. No se observa casi estratificación vertical en la dinámica de sedimentos finos salvo algunas ocasiones donde la salinidad se

incrementa, asociada principalmente al ingreso de la pluma salina sobre el fondo. Respecto al fondo se observa una variabilidad dominada por los eventos de tormenta y una tendencia a la acumulación.

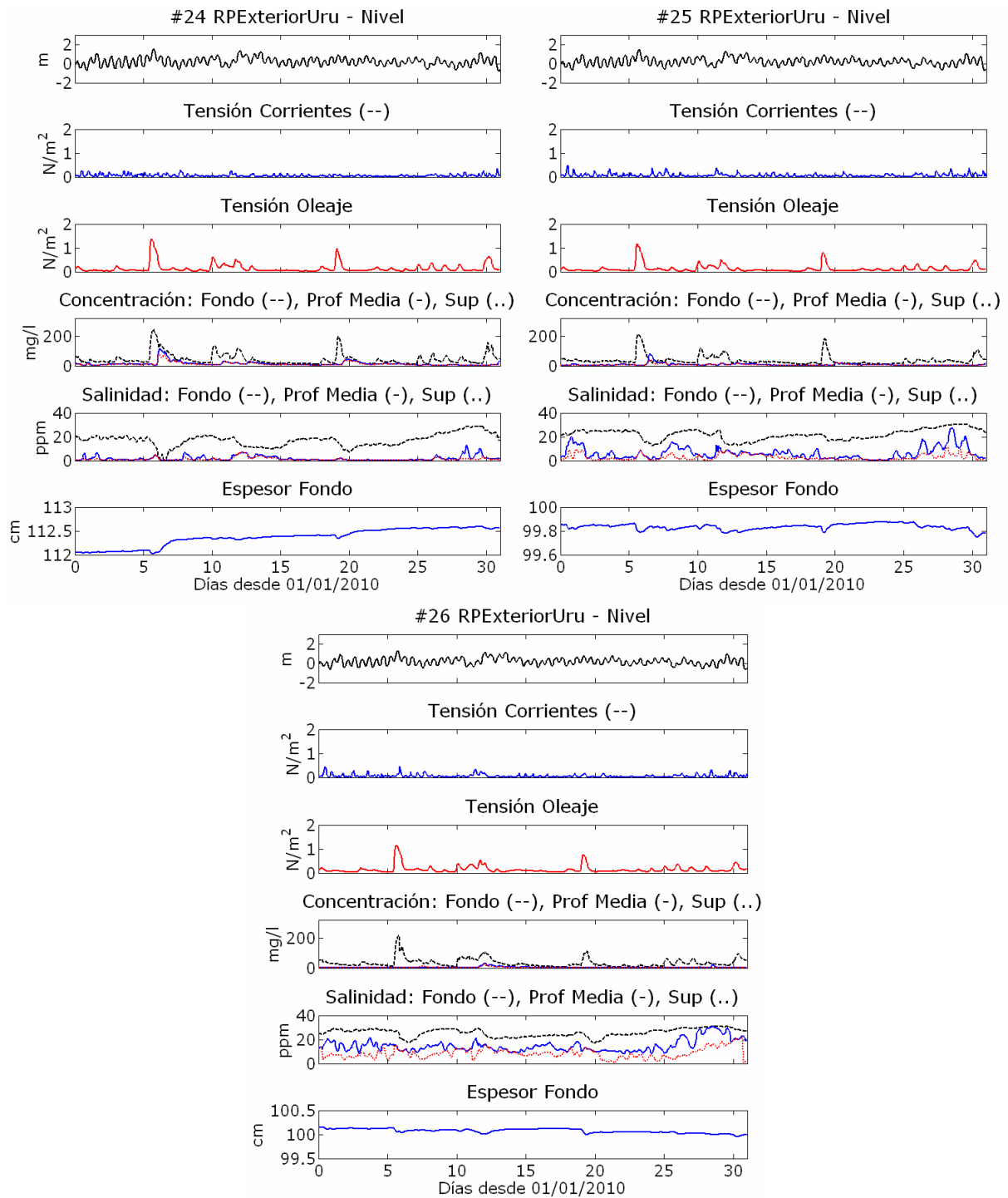


Figura 5.13: Variación temporal durante enero 2010 de la elevación de la superficie libre, tensiones de corte de corrientes y de oleaje, concentración del sedimento en suspensión y salinidad en fondo, profundidad media y superficie, y del espesor de fondo en las estaciones de control #24 (paneles superiores izquierdos), #25 (paneles superiores derechos) y #26 (paneles inferiores).

Por ultimo en la Figura 5.13 se presentan los resultados obtenidos en las estaciones #24, #25 y #26 ubicadas en la zona exterior del Río de la Plata hacia la costa uruguaya. Se observa básicamente los resultados son similares en las tres estaciones de control. La marea presenta tensiones bajas en la zona y por tanto la resuspensión de material de fondo ocurre principalmente durante los fuertes eventos de tormenta. Esto genera grandes incrementos de concentración de sedimento sobre las capas de fondo. A profundidad media y en superficie las concentraciones habitualmente son nulas con leves incrementos durante las tormentas coincidentes con menor estratificación del campo salino o producto del transporte de material proveniente de zonas aledañas (principalmente en la estación #24). Respecto al fondo se observa en la estación #24 una leve tendencia a la acumulación producto del material depositado (similar a lo observado en las estaciones #22 y #17), mientras que en las estaciones #25 y #26 se observa una tendencia neta al equilibrio.

El análisis preliminar de la dinámica temporal a escala diaria realizado permite identificar ciertos elementos principales de la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata. Se observa una gran variabilidad temporal con una escala rápida en respuesta a los forzantes hidrodinámicos y a la interacción con el fondo. Es posible diferenciar zonas con diversas dinámicas que surgen por la influencia relativa de diversos factores, las tensiones de marea en relación a las tensiones del oleaje (calma vs tormenta), la asimetría de la marea en los dos picos diarios, y la salinidad del agua. A grandes rasgos es posible afirmar en la zona intermedia la dinámica de sedimento en suspensión está regulada por constantes ciclos de erosión y deposición de material, en escalas cortas por las corrientes de marea (principalmente sobre la costa argentina), intensificados por ciclos de mayor intensidad durante las tormentas (principalmente sobre la costa uruguaya). En el exterior durante los eventos de oleaje mucho material de fondo es puesto en resuspensión y transportado por las corrientes tridimensionales principalmente sobre el fondo debido a la predominante estratificación del campo salino. La magnitud de las fluctuaciones de concentración de sedimento en suspensión está regulada principalmente por la fuerza relativa de las tensiones de marea y de oleaje en cada lugar del Río de la Plata, con el efecto del campo salino en la zona exterior. Con el objetivo de conocer como es la variabilidad temporal de la concentración de sedimento en suspensión en la zona de estudio se analizan las series obtenidas con el modelo durante los dos años simulados determinando ciertos parámetros estadísticos.

5.2.3. Análisis de la concentración de sedimento en suspensión

5.2.3.1. Variación temporal anual

Con el objetivo de conocer cómo es la variabilidad temporal de la concentración de sedimento en suspensión se analizan las series obtenidas con el modelo durante los dos años simulados determinando ciertos parámetros estadísticos.

Para las 26 estaciones de control se extrajeron las series temporales de concentración de sedimento en suspensión en todas las capas del modelo y para cada una se determinan los boxplots. Estos permiten visualizar de forma compacta varias características de las series temporales, como ser mediana, primer y tercer cuartil, y los valores máximos y mínimos; además de los valores extremales que se separan del comportamiento medio de la serie. Los resultados se presentan de forma gráfica complementando los valores estadísticos con las series temporales obtenidas con el modelo en cada estación de control.

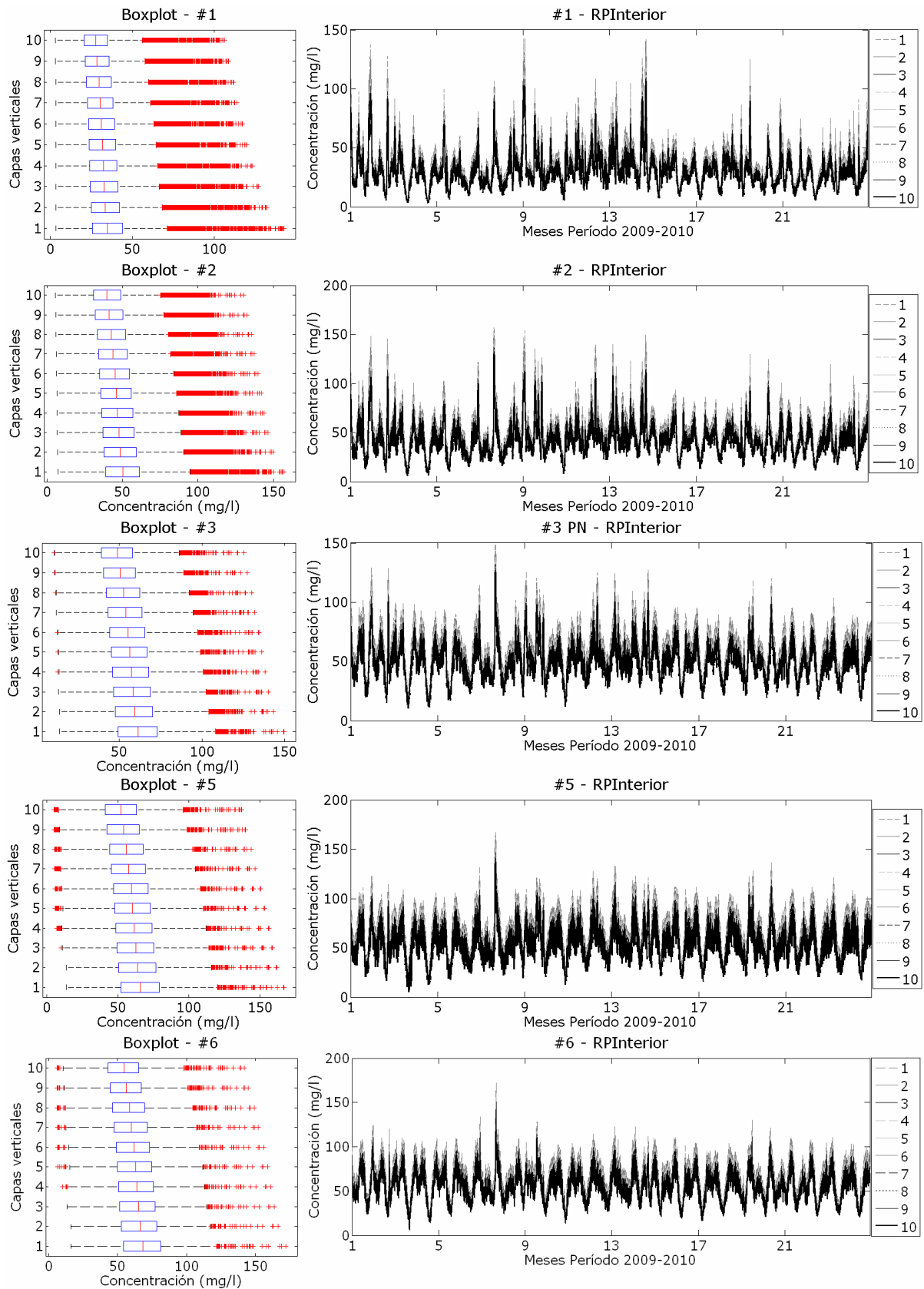


Figura 5.14: Variables estadísticas representadas en boxplots (paneles izquierdos) y series temporales (paneles derechos) del perfil vertical de concentración de sedimento en suspensión del período 2009-2010 en las estaciones de control ubicadas en el Río de la Plata interior (#1, #2, #3, #5 y #6).

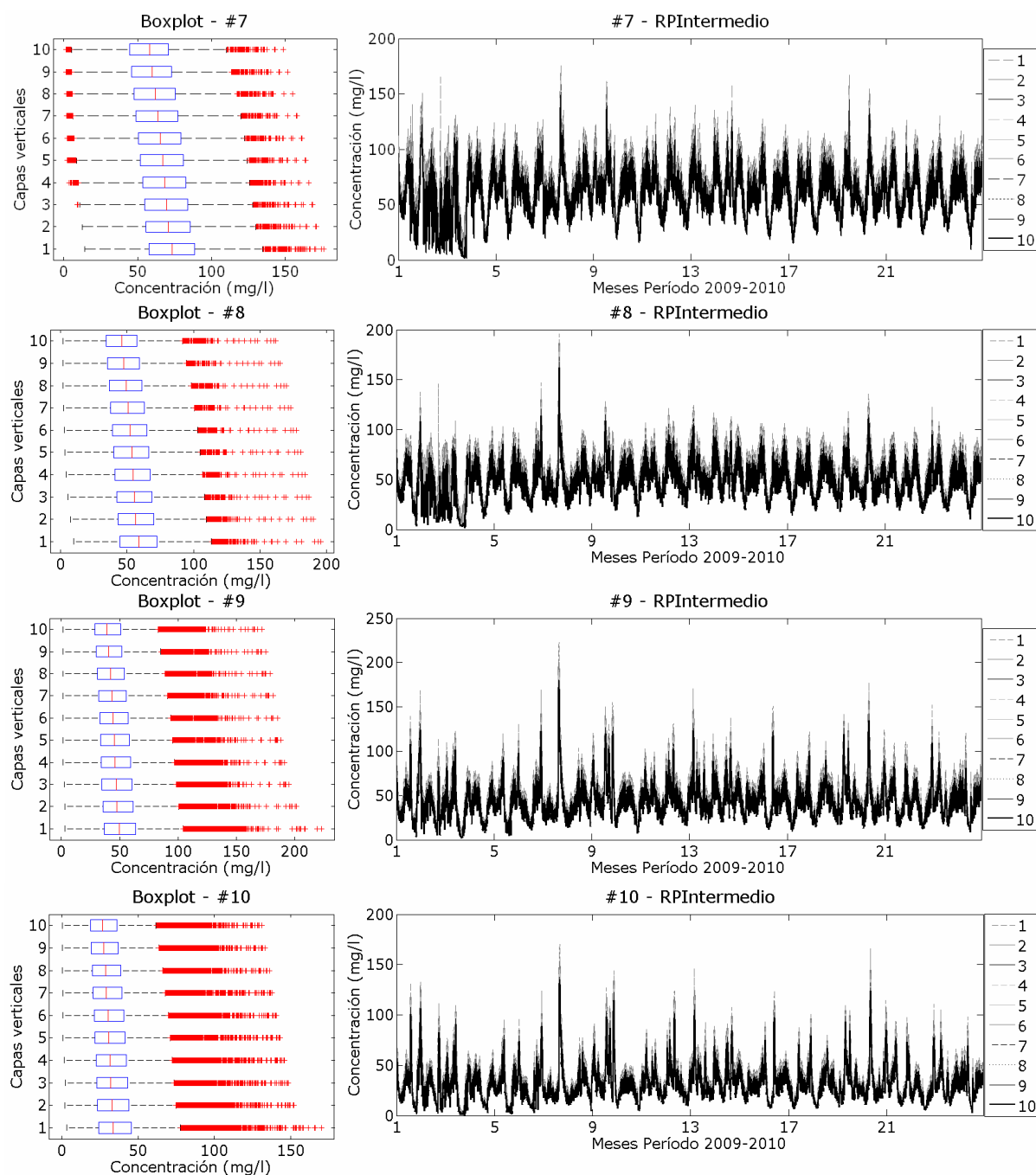


Figura 5.15: Variables estadísticas representadas en boxplots (paneles izquierdos) y series temporales (paneles derechos) del perfil vertical de concentración de sedimento en suspensión del período 2009-2010 en las estaciones de control ubicadas en el Río de la Plata intermedio (#7, #8, #9 y #10).

En las estaciones del Río de la Plata interior (Figura 5.14) los resultados muestran la concentración de sedimento en suspensión es no nula durante todo el período con fuertes oscilaciones dominadas por la variabilidad de marea principalmente y valores extremos altos durante las tormentas. Se observa un incremento de las concentraciones a medida que la estación de control se ubica más cercana a la zona intermedia. Se observa además una leve variación de las concentraciones en el perfil vertical con menores valores en las capas superiores de la columna de agua. Para las estaciones intermedias #7, #8, #9 y #10 el comportamiento observado es similar (Figura 5.15), siendo mayores los valores de concentración en las estaciones ubicadas entre el eje

del Río de la Plata y la costa argentina, para las cuales el forzante de marea es más intenso. En las estaciones ubicadas en la zona intermedia hacia el exterior y costa uruguaya (#11, #12 y #13) se observa también una alta variabilidad de la concentración con valores de base más bajos que en las estaciones mencionadas y sin una clara señal asociada a la marea (Figura 5.16). Además, se incrementa la diferencia de las mismas en la dirección vertical. En las restantes estaciones de la zona intermedia pero ubicadas hacia la costa argentina (Figura 5.17), se observan concentraciones en suspensión mayores debido al incremento de la marea en la zona, manteniendo la alta fluctuación de los mismos y los valores levemente inferiores en la zona superior de la columna de agua.

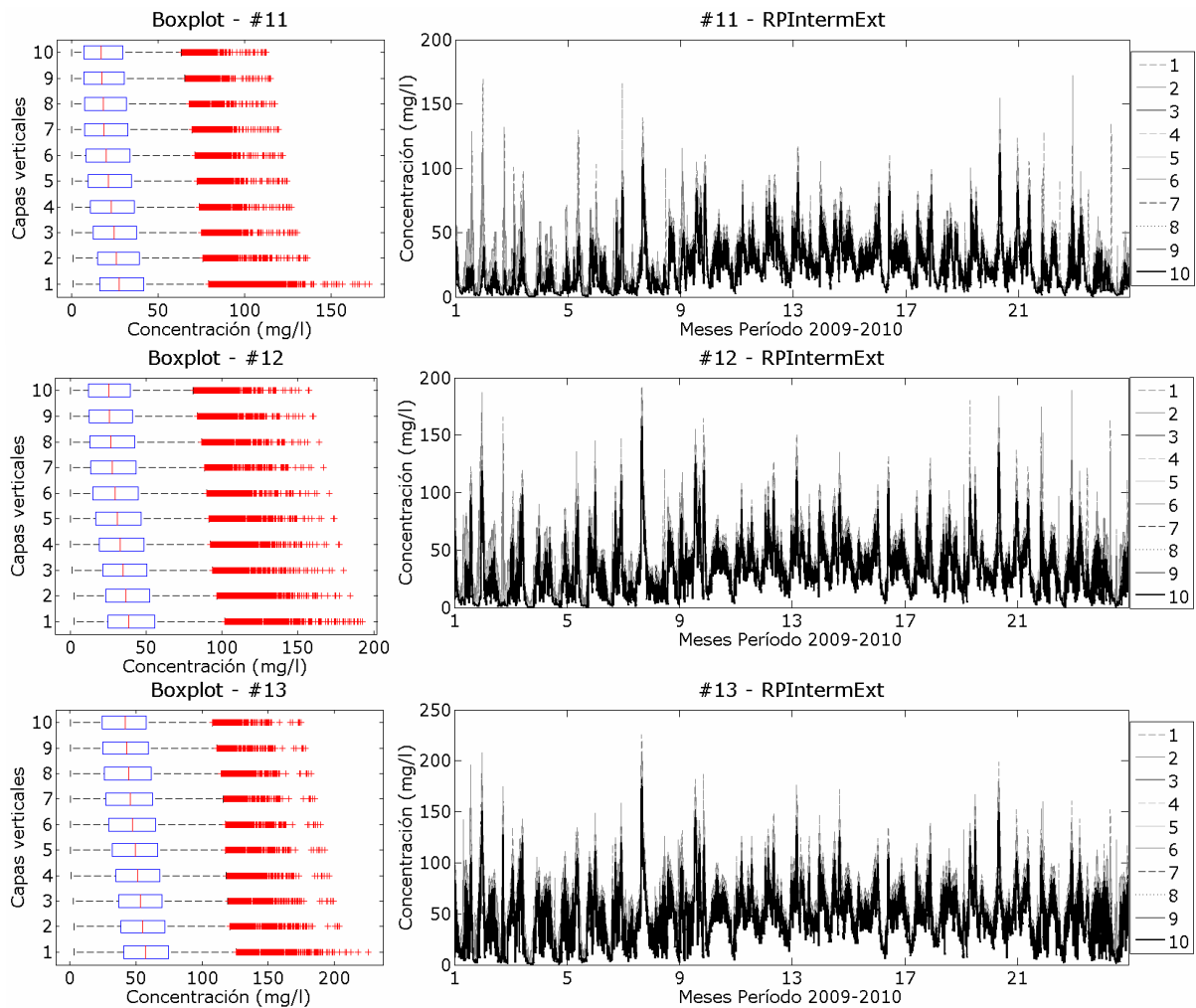


Figura 5.16: Variables estadísticas representadas en boxplots (paneles izquierdos) y series temporales (paneles derechos) del perfil vertical de concentración de sedimento en suspensión del período 2009-2010 en las estaciones de control ubicadas sobre la zona Norte y exterior del Río de la Plata intermedio (#11, #12 y #13).

Los resultados obtenidos para la estación #16 (Figura 5.17) muestran valores de concentración con una alta variabilidad temporal con leve estratificación vertical y valores un poco menores a las obtenidas en las estaciones intermedias. En la estación #17 exterior (Figura 5.18) esta tendencia se intensifica aumentando la estratificación vertical con valores bajos en la columna de agua y mayores hacia el fondo pero con valores extremos altos de concentración durante las tormentas que alcanzan los 200 mg/l. En las estaciones #18 y #19 (Figura 5.18) las concentraciones en general son bajas en la columna de agua salvo en el fondo donde se observan concentraciones basales de 30

mg/l. No obstante se continúan observando valores extremos altos asociados a las tormentas. En las estaciones exteriores ubicadas hacia la costa argentina #20 y #21 (Figura 5.18) se observan en general concentraciones no nulas permanentemente con picos asociados a tormentas con una leve estratificación vertical.

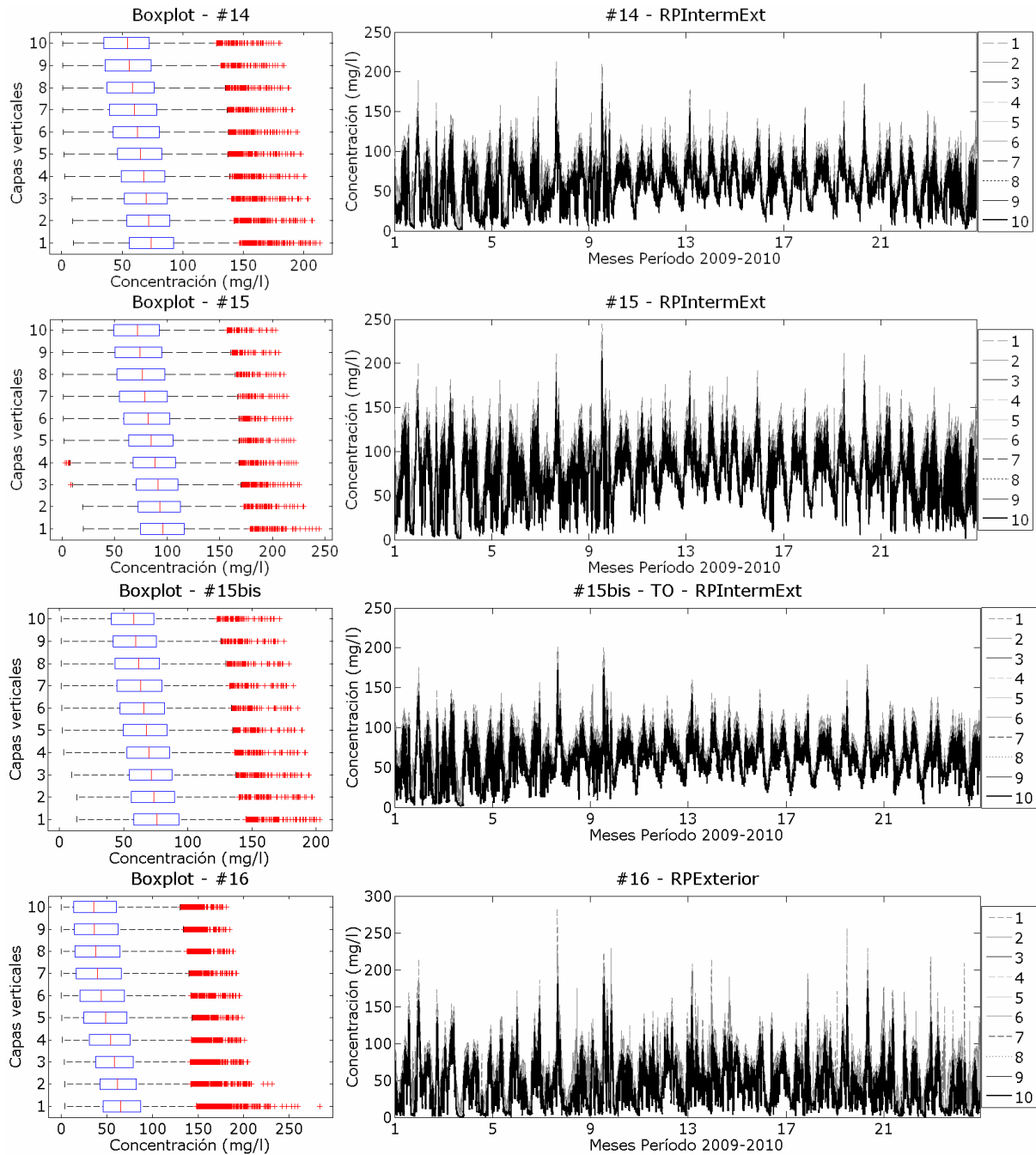


Figura 5.17: Variables estadísticas representadas en boxplots (paneles izquierdos) y series temporales (paneles derechos) del perfil vertical de concentración de sedimento en suspensión del período 2009-2010 en las estaciones de control ubicadas sobre la zona Sur y exterior del Río de la Plata intermedio (#14, #15 y #15bis), y sobre la zona exterior (#16).

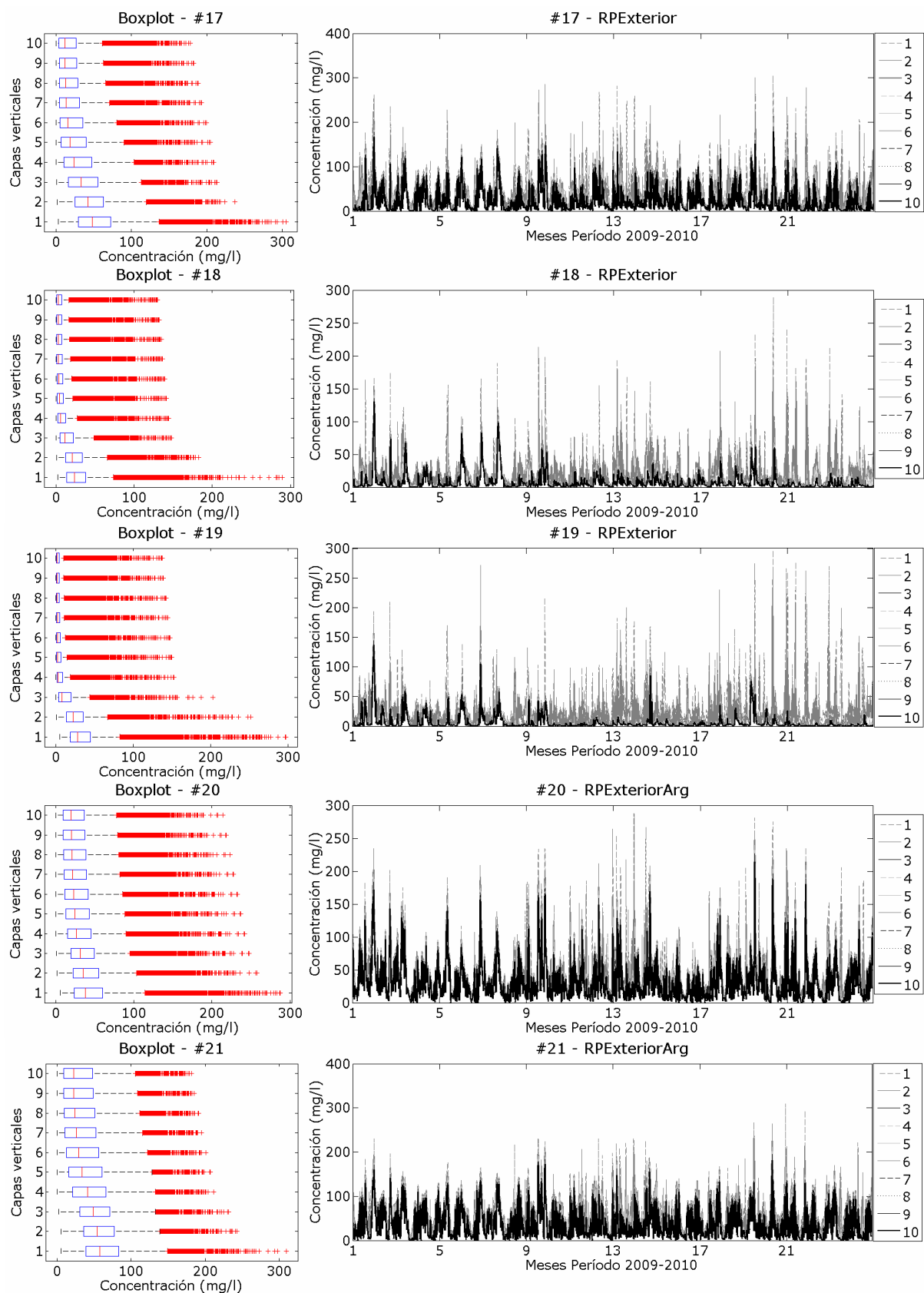


Figura 5.18: Variables estadísticas representadas en boxplots (paneles izquierdos) y series temporales (paneles derechos) del perfil vertical de concentración de sedimento en suspensión del período 2009-2010 en las estaciones de control ubicadas en el exterior (#17, #18 y #19) y sobre la costa argentina (#20 y #21).

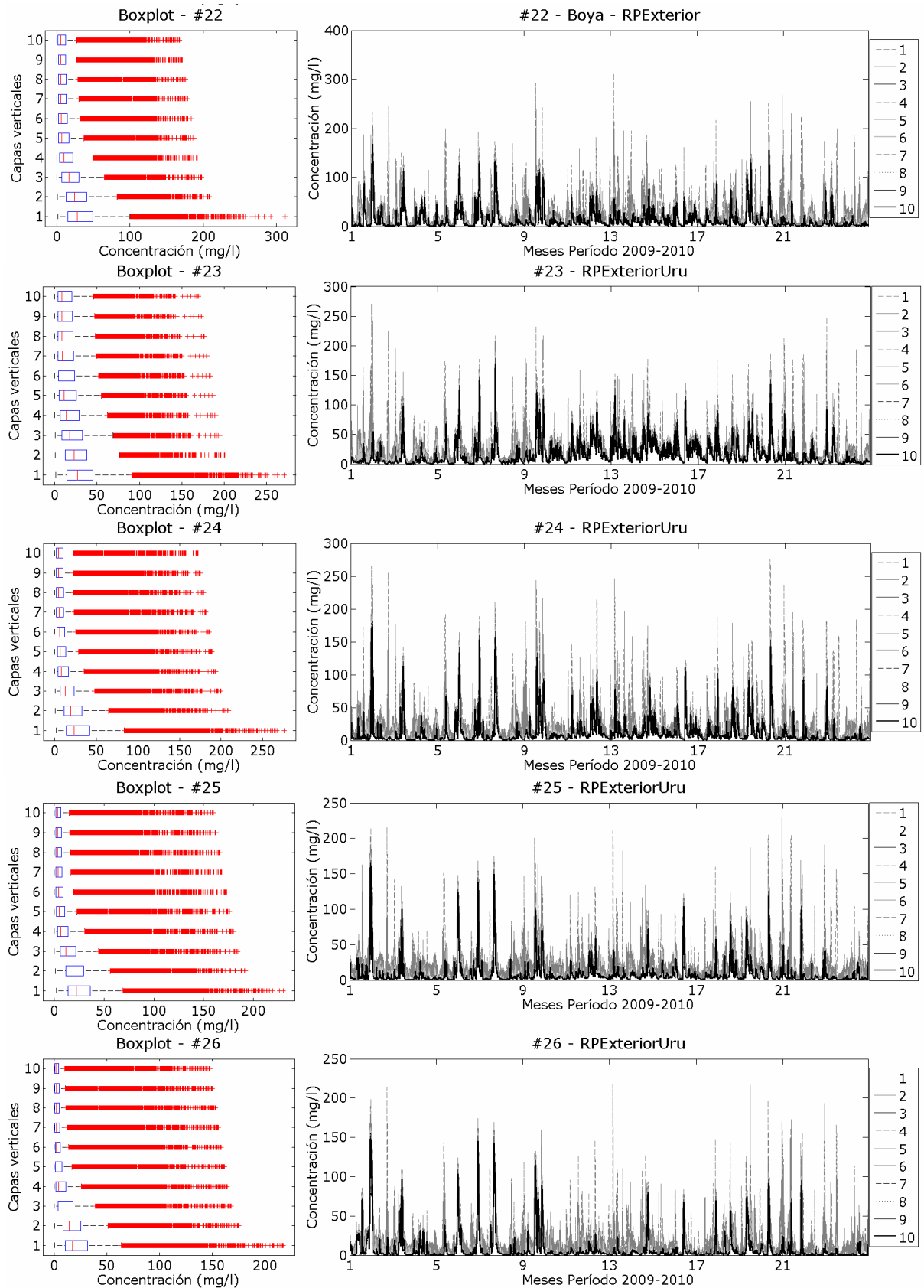


Figura 5.19: Variables estadísticas representadas en boxplots (paneles izquierdos) y series temporales (paneles derechos) del perfil vertical de concentración de sedimento en suspensión del periodo 2009-2010 en las estaciones de control ubicadas en el Río de la Plata exterior (#22) y hacia la costa uruguaya (#23, #24, #25 y #26).

En la estación exterior #22 (Figura 5.19) los valores de concentración son menores a los observados en la zona central exterior (estación #17) y sur (estaciones #20 y #21), y predomina la estratificación vertical. En la estación #23 (Figura 5.19) se observa una estratificación leve con valores de base no nulos en toda la columna de agua. Por último en las estaciones #24, #25 y #26 (Figura 5.19) se observan valores bajos en general con picos de concentración asociados a las tormentas y una alta estratificación vertical.

A modo de resumen se presentan en la Figura 5.20 los valores promedio de la concentración de sedimento en suspensión calculados a partir de las series obtenidas con el modelo para la simulación 2009-2010 en las 26 estaciones de control, en la capa de fondo, a profundidad media y en la capa de superficie. Se observa los valores medios máximos se obtienen en la zona intermedia del Río de la Plata en las estaciones ubicadas sobre la costa argentina. Por otra parte se observa que en las estaciones de la zona exterior los valores medios en el fondo son mucho mayores a los valores medios del resto del perfil, principalmente en las estaciones centrales y las ubicadas sobre la costa uruguaya.

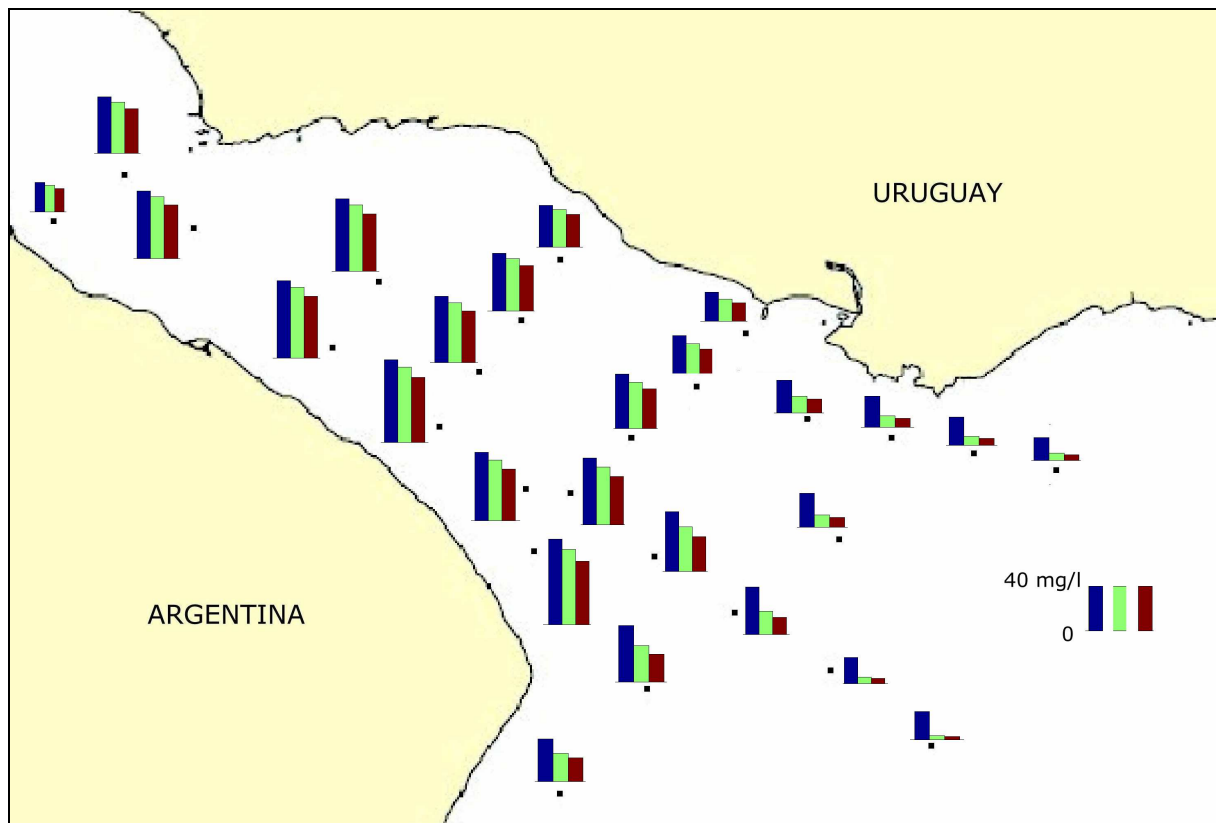


Figura 5.20: Concentración de sedimento en suspensión promedio obtenida con el modelo para el período 2009-2010 en las estaciones de control en la capa de fondo (azul), profundidad media (verde) y superficie (rojo).

5.2.3.2. Variación espacial mensual

La variabilidad espacial (horizontal y vertical) que se identificó en la sección anterior al comparar el comportamiento de la concentración de sedimento en suspensión en las diversas estaciones de monitoreo se complementa en esta sección determinando los valores medios y máximos mensuales en la capa de fondo y en la capa superficial de la columna de agua en todo el Río de la Plata. Es importante analizar ambos estadísticos debido a las altas fluctuaciones identificadas en las señales temporales de concentración de sedimento en suspensión en las estaciones. La distribución espacial de los valores

medios muestra la tendencia espacial de concentración más habitual de la zona, representativa de lo que sucede en períodos de marea (sin tormentas). La distribución espacial de las máximas concentraciones es representativa de lo que sucede durante los eventos más intensos asociados a tormentas y mareas meteorológicas extremas mensuales. Analizar dichos patrones máximos permite identificar cuáles son las zonas del Río de la Plata asociadas a mayores concentraciones de sedimento en suspensión, tanto en la capa de fondo como en la capa de superficie. Se realiza el cálculo para los 24 meses considerados en las simulaciones.

Los resultados obtenidos se presentan por mes en las Figuras 5.21 a 5.44. Básicamente se observa que los campos medios mensuales de superficie y fondo presentan cierta estabilidad en todos los meses, principalmente en la zona interior e intermedia del Río de la Plata. En la zona exterior hay leves variaciones entre los meses debido a las características fluctuantes de la marea meteorológica dependiente del forzante atmosférico, y también por efecto de las tormentas que aportan al valor medio. No obstante es posible afirmar se observan valores medios mensuales de concentración de sedimento en suspensión de aproximadamente 50 mg/l en la zona interior e intermedia del Río de la Plata sobre la costa uruguaya y valores mayores cercanos a 100 mg/l sobre la costa argentina en la zona intermedia. Este comportamiento se observa en toda la columna de agua salvo sobre la costa uruguaya donde los valores superficiales presentan mayores fluctuaciones mes a mes como en la zona exterior. En situaciones de calma la concentración de sedimento en suspensión en la zona exterior es prácticamente nula en las capas superficiales mientras que en el fondo se observan valores basales bajos, del orden de 20 mg/l.

Los valores máximos muestran una fuerte variabilidad mensual en la zona exterior principalmente. En la zona interior e intermedia se observan dos tipos de situaciones, tanto en la capa de fondo como en la capa superficial. En los meses que las tormentas no llegan a superar en intensidad a las tensiones de marea se observa que los valores máximos ocurren sobre la costa argentina, con una distribución espacial general similar a la observada en los patrones medios en la zona. En cambio cuando las tormentas del mes son muy intensas se observa que los valores máximos ocurren sobre la zona costera uruguaya en la zona intermedia.

En términos generales es posible afirmar que en la zona del frente (transición entre zona intermedia y exterior), sobre la capa de fondo, es donde ocurren las mayores concentraciones de sedimento en suspensión en todo el Río de la Plata. En la zona exterior sobre la capa de fondo se observan grandes concentraciones en los meses donde ocurren fuertes tormentas, con valores similares a los obtenidos en la zona de transición, y mayores a los obtenidos en la zona intermedia e interior. En general las concentraciones máximas en el fondo alcanzan los 300 mg/l con valores excepcionales cercanos a 400 mg/l.

Los patrones de los valores máximos en las capas superficiales presentan una gran variabilidad mes a mes producto también de la variabilidad en la intensidad de las tormentas y de la estratificación salina. Se observan algunos casos donde se obtienen concentraciones altas, de hasta 200 mg/l, en la zona central y costa uruguaya del Río de la Plata exterior. En otros casos se observan grandes concentraciones en la zona Sur exterior, sobre la Bahía de Samborombón con valores mayores, de hasta 300 mg/l. Estos dos patrones bien diferenciados de la distribución máxima de concentración de sedimento en suspensión en la capa superficial dependen directamente de las características de las tormentas.

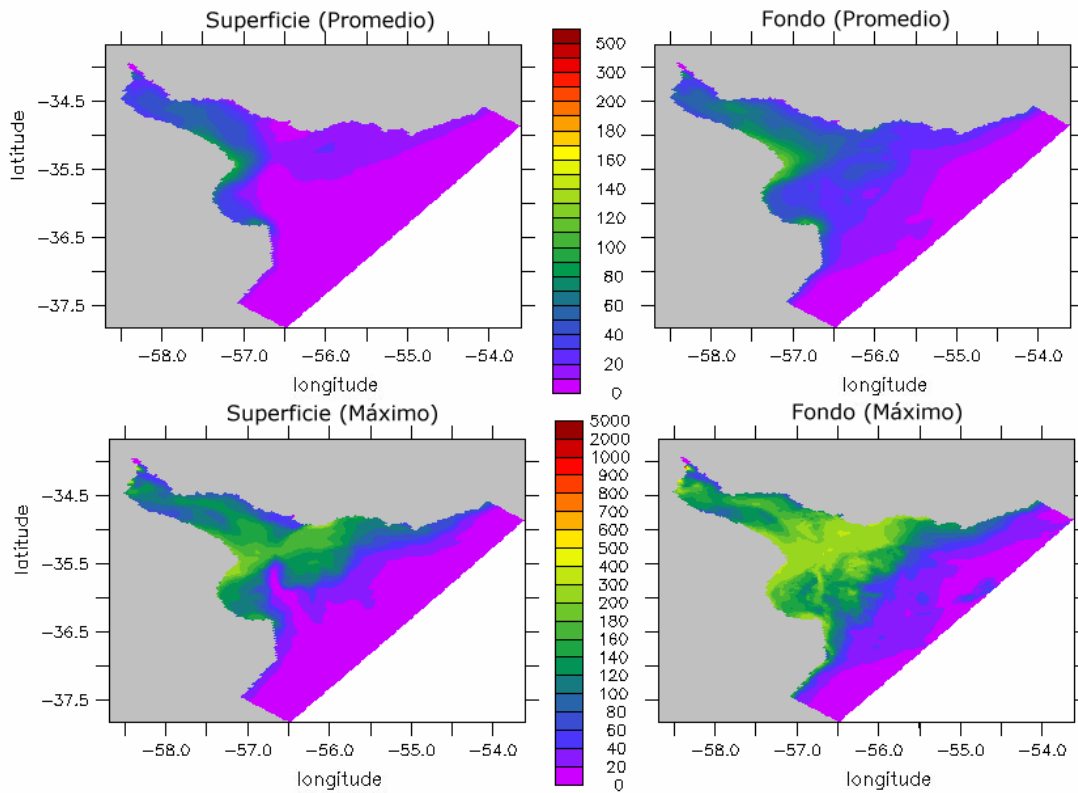


Figura 5.21: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); enero 2009.

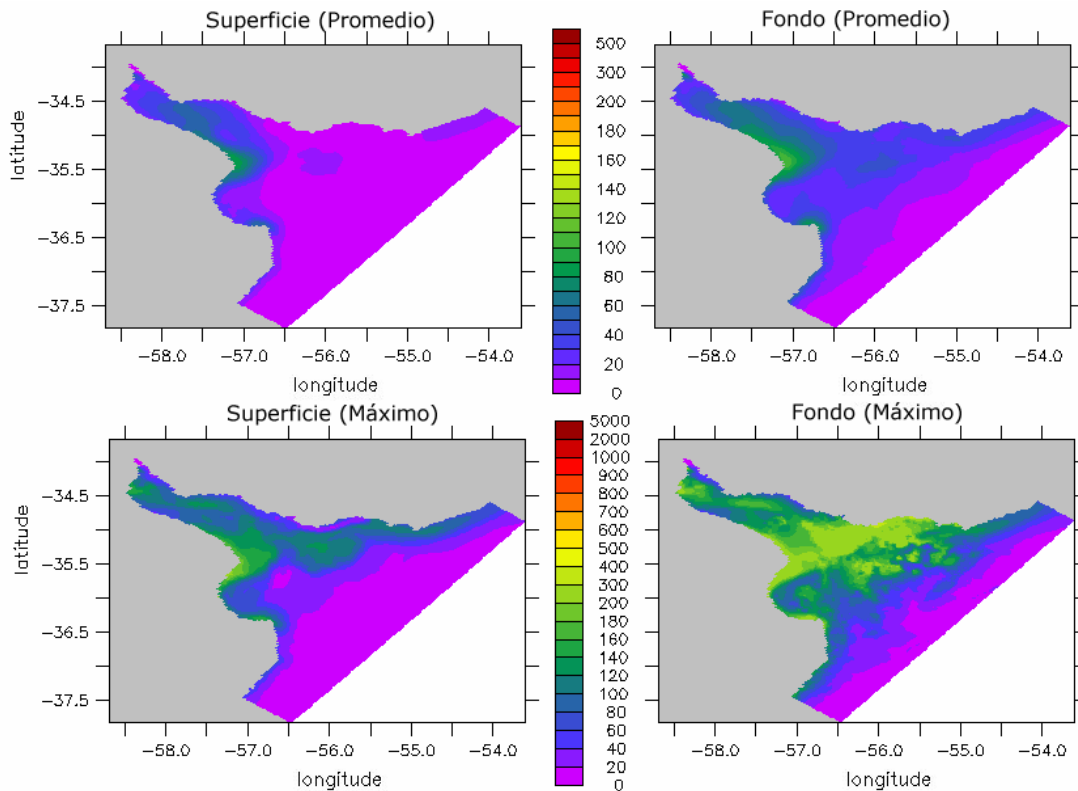


Figura 5.22: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); febrero 2009.

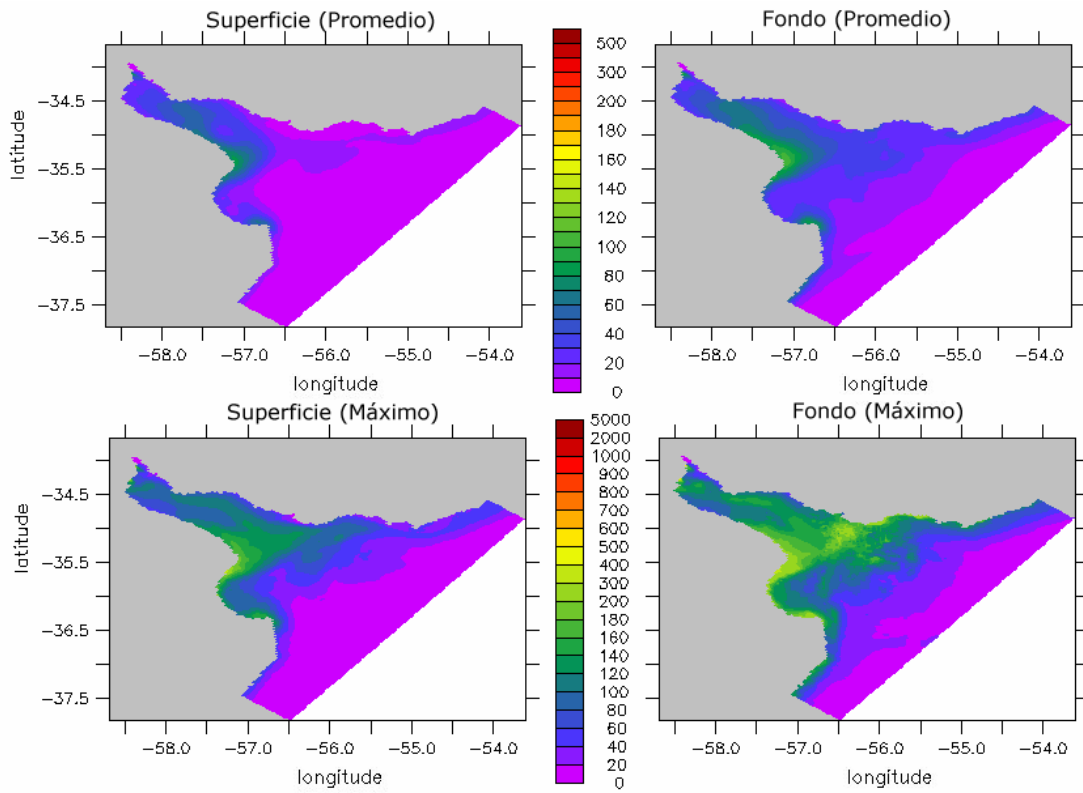


Figura 5.23: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); marzo 2009.

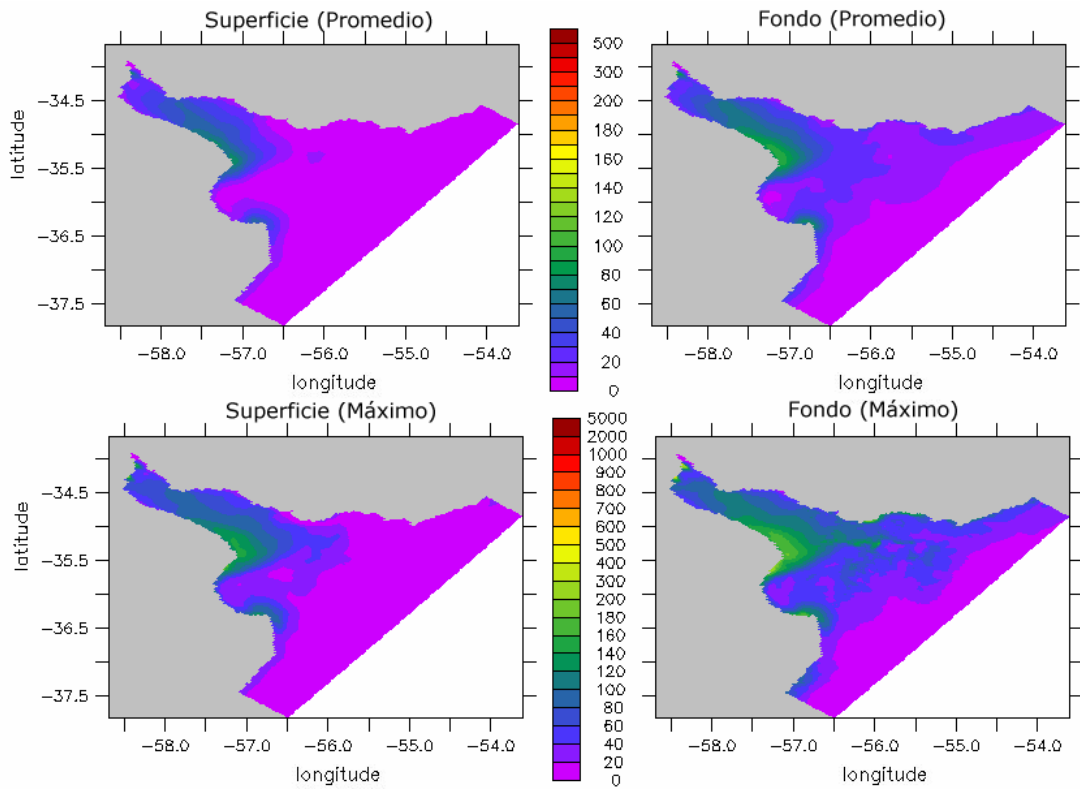


Figura 5.24: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); abril 2009.

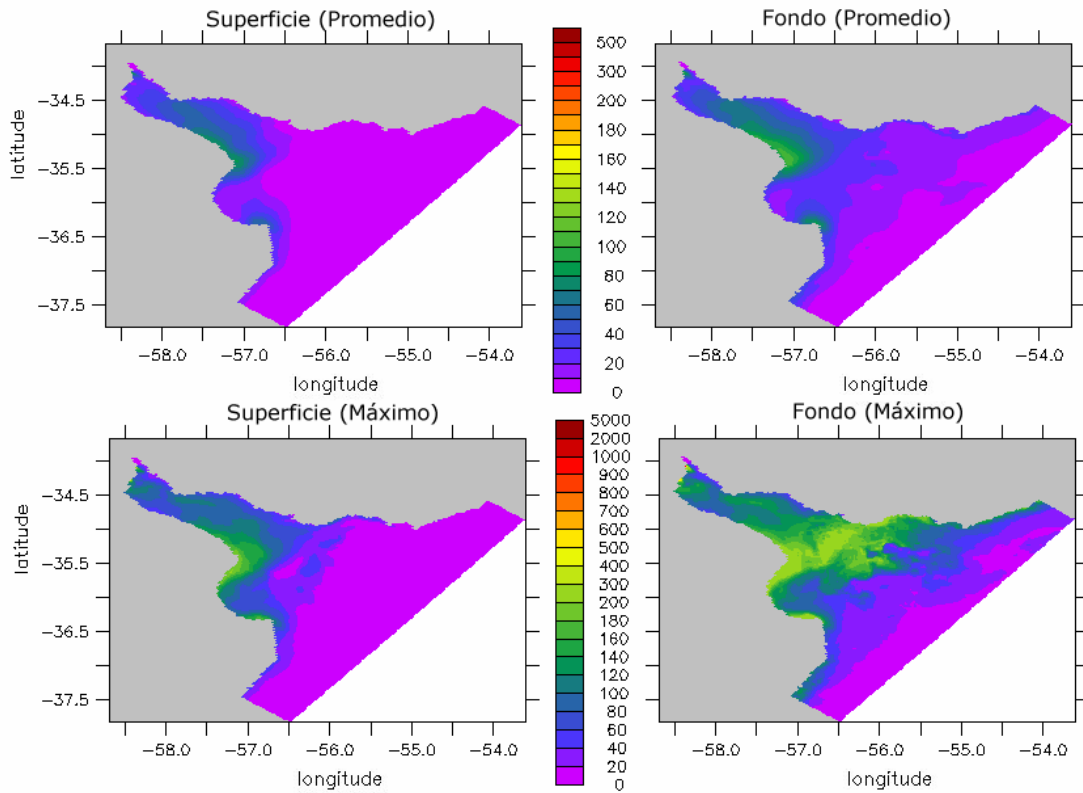


Figura 5.25: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); mayo 2009.

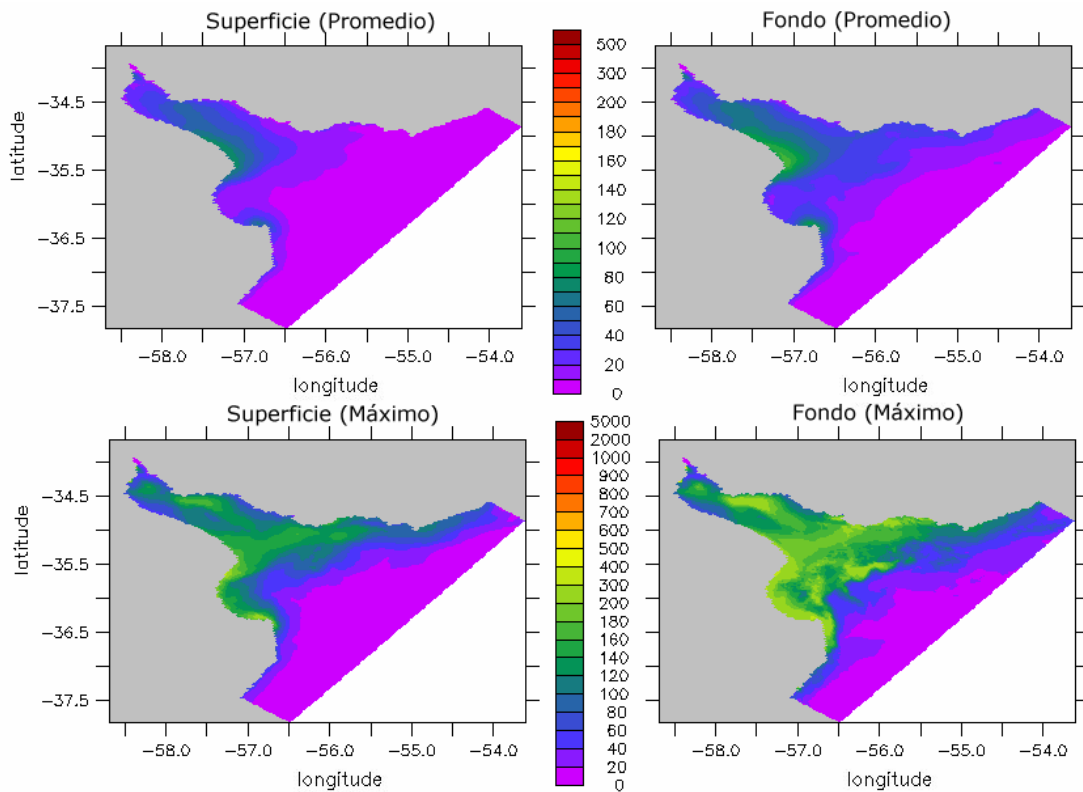


Figura 5.26: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); junio 2009.

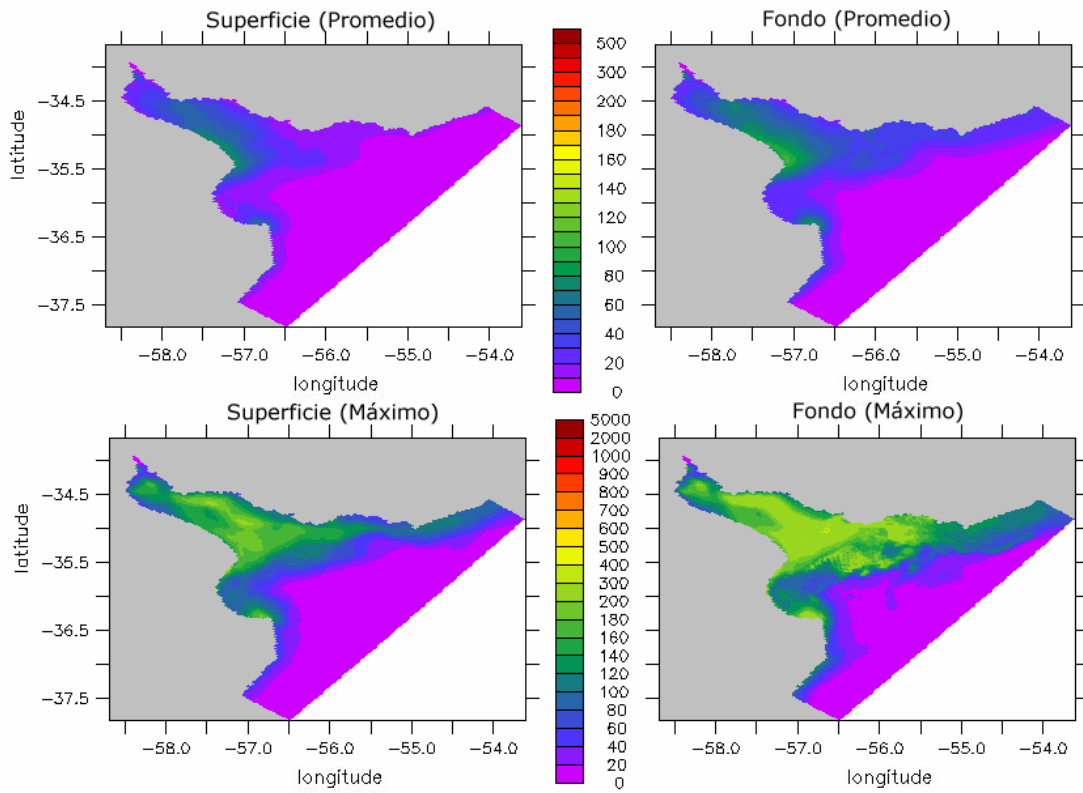


Figura 5.27: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); julio 2009.

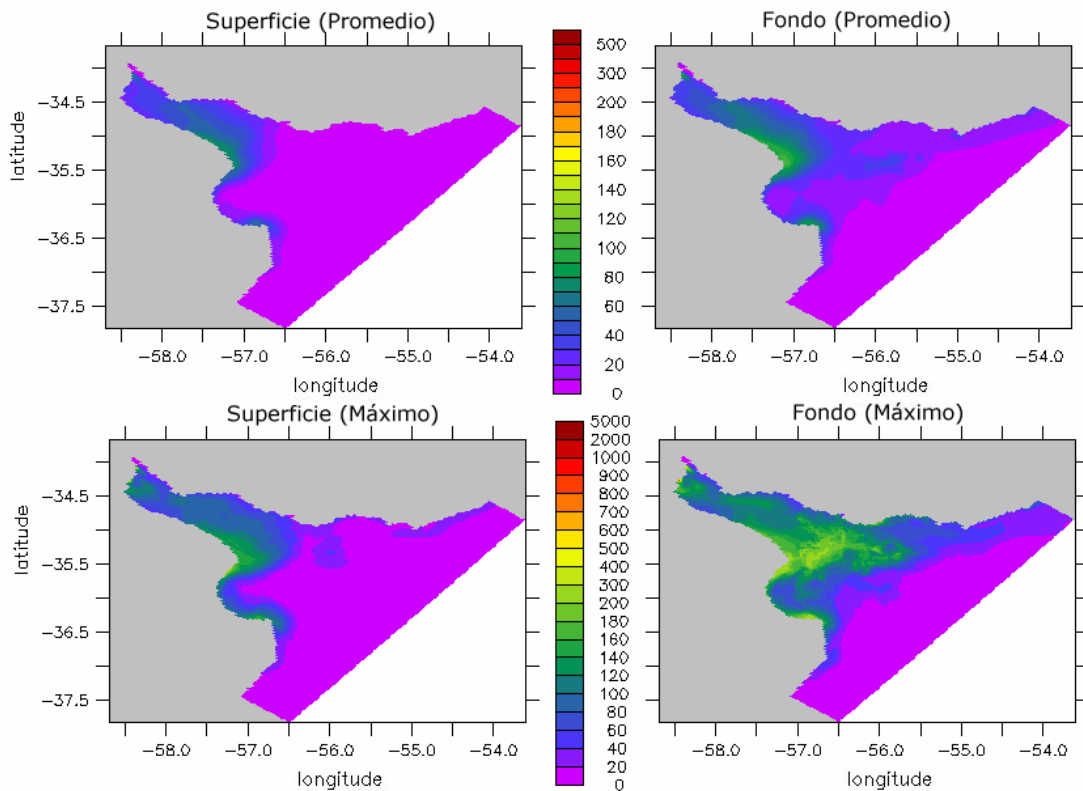


Figura 5.28: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); agosto 2009.

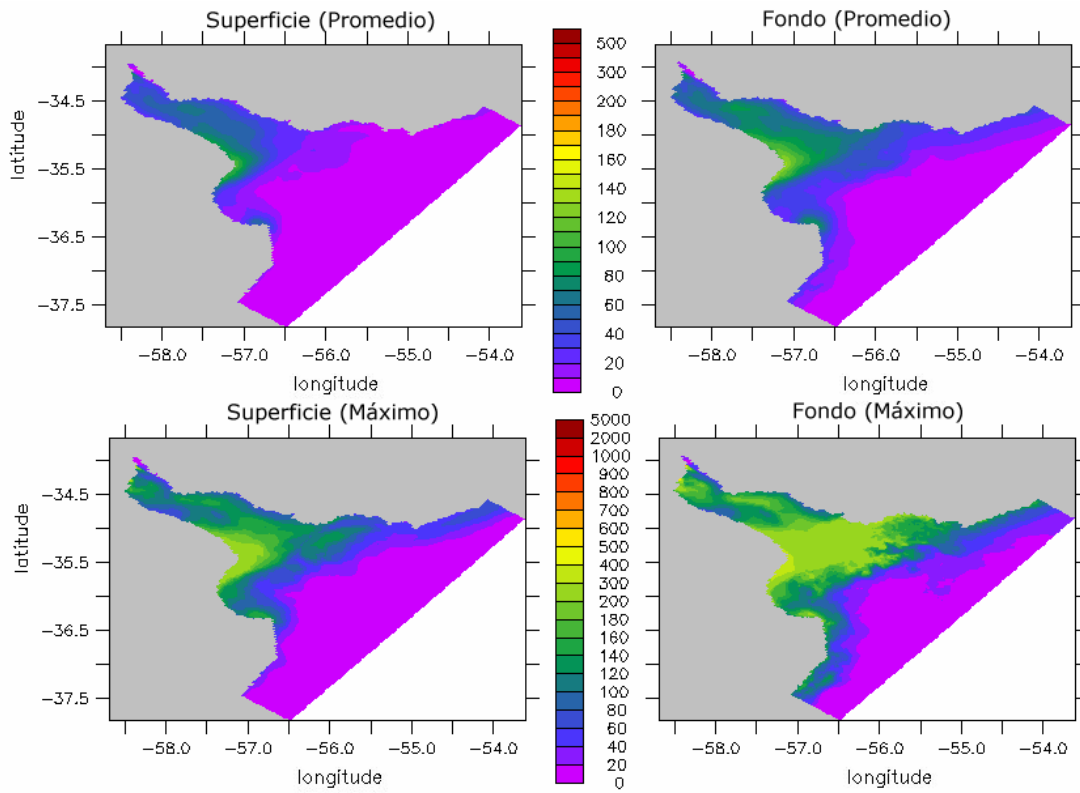


Figura 5.29: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); setiembre 2009.

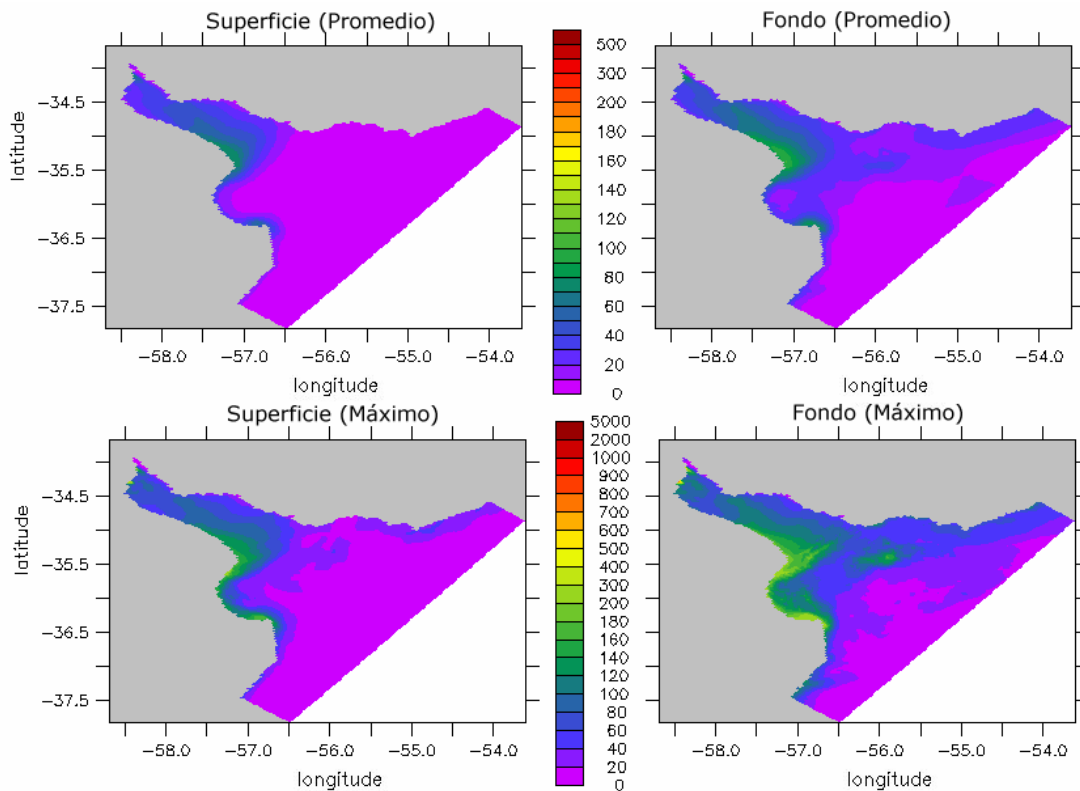


Figura 5.30: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); octubre 2009.

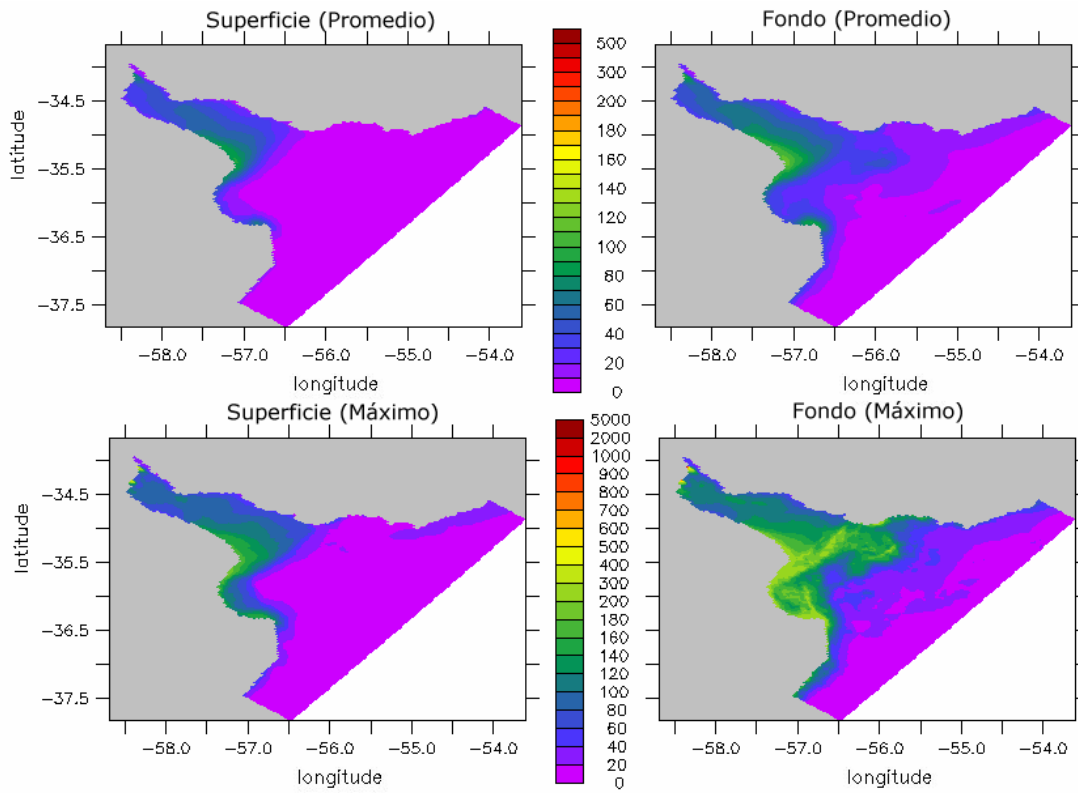


Figura 5.31: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); noviembre 2009.

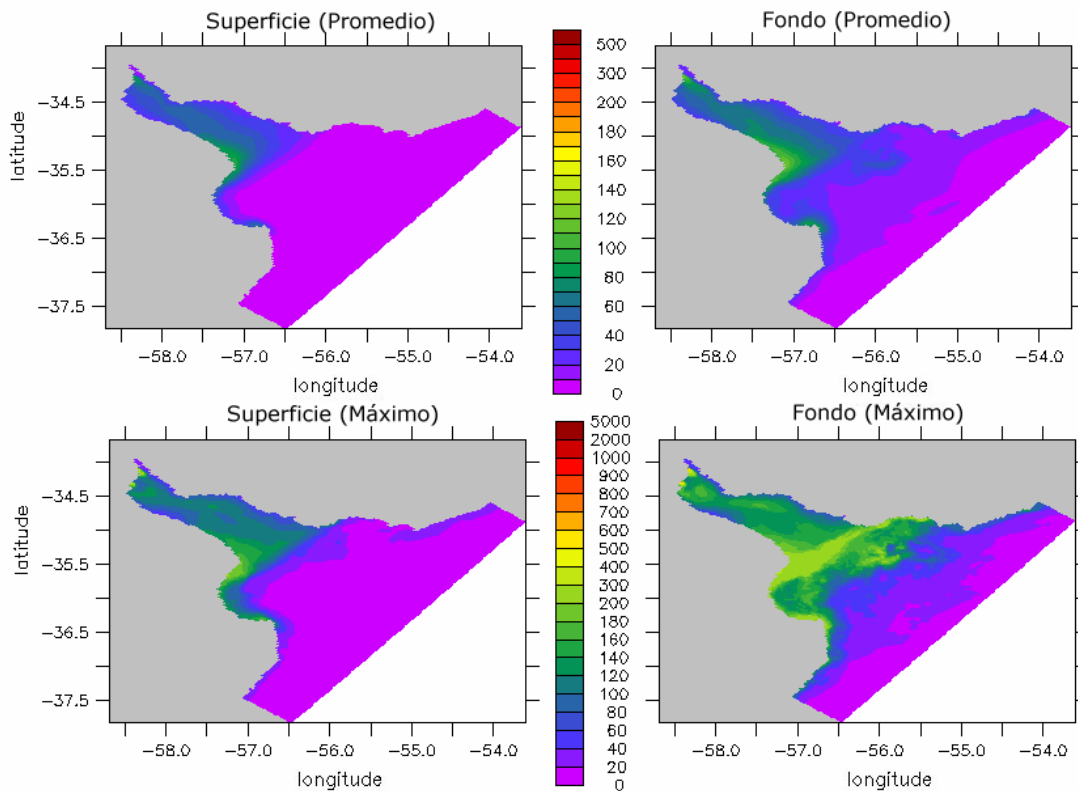


Figura 5.32: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); diciembre 2009.

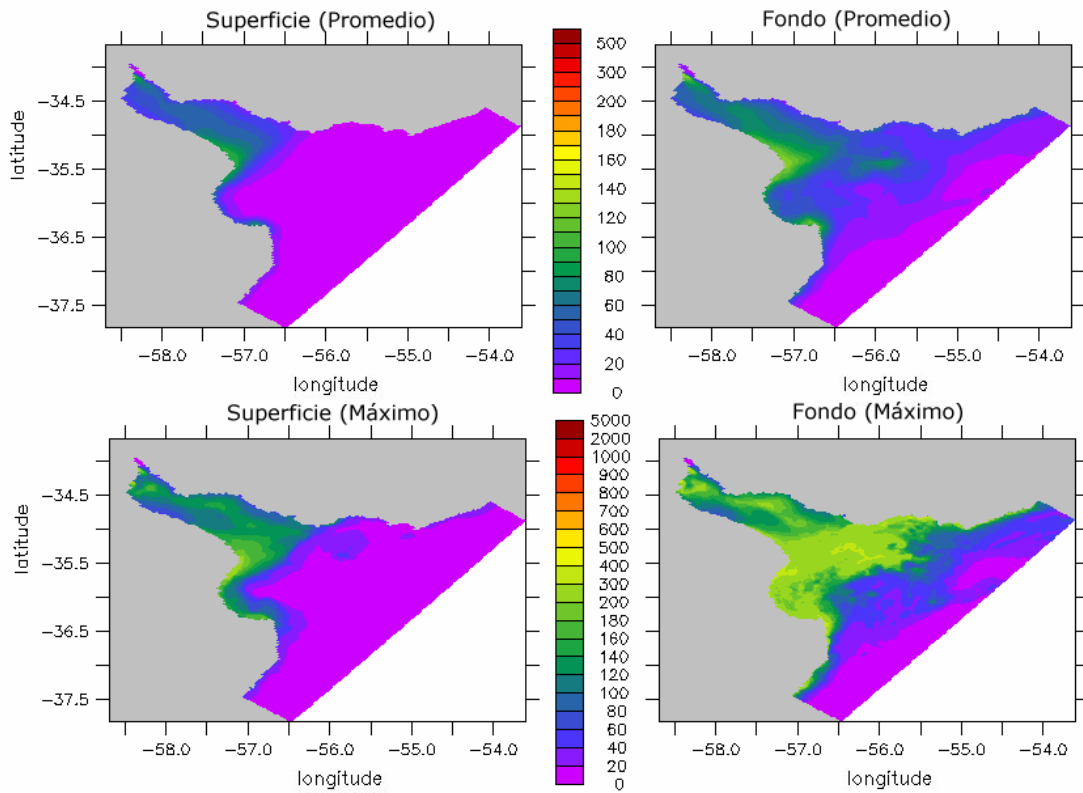


Figura 5.33: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); enero 2010.

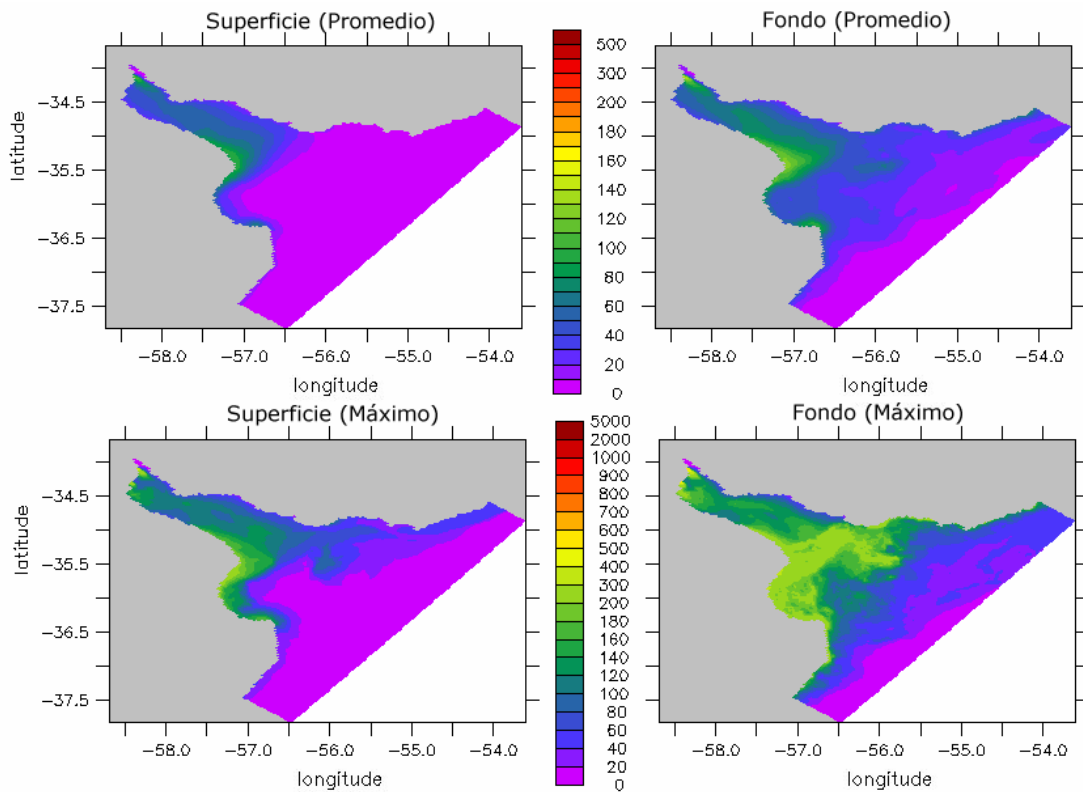


Figura 5.34: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); febrero 2010.

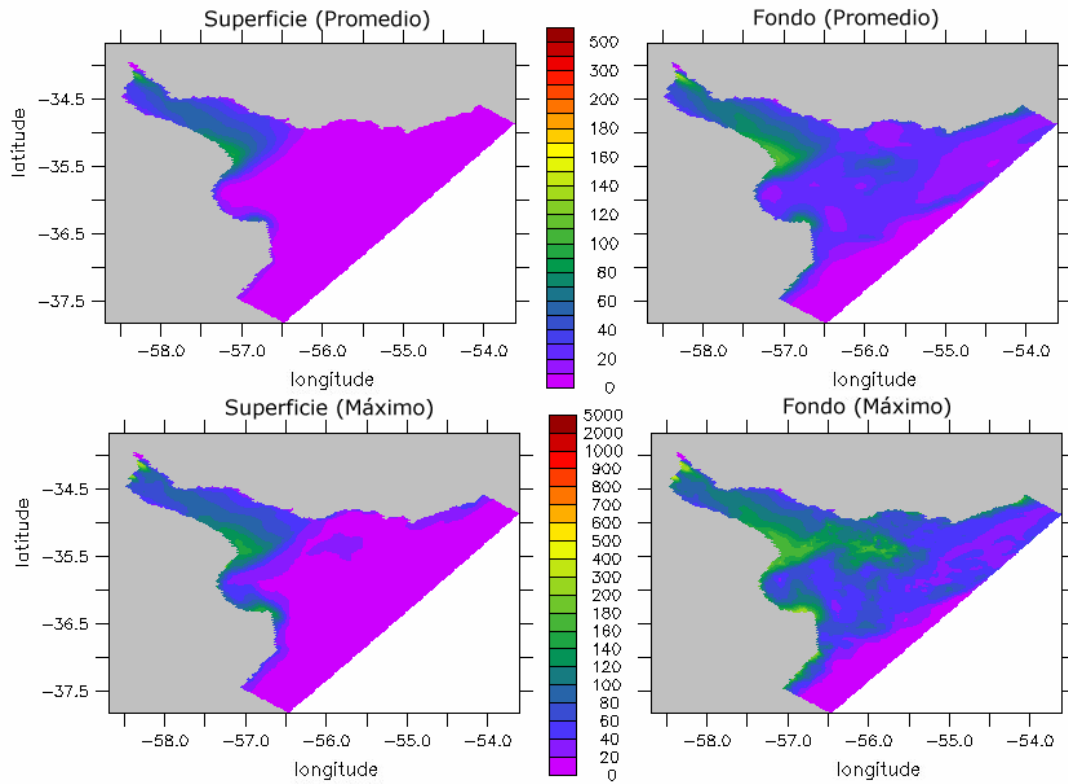


Figura 5.35: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); marzo 2010.

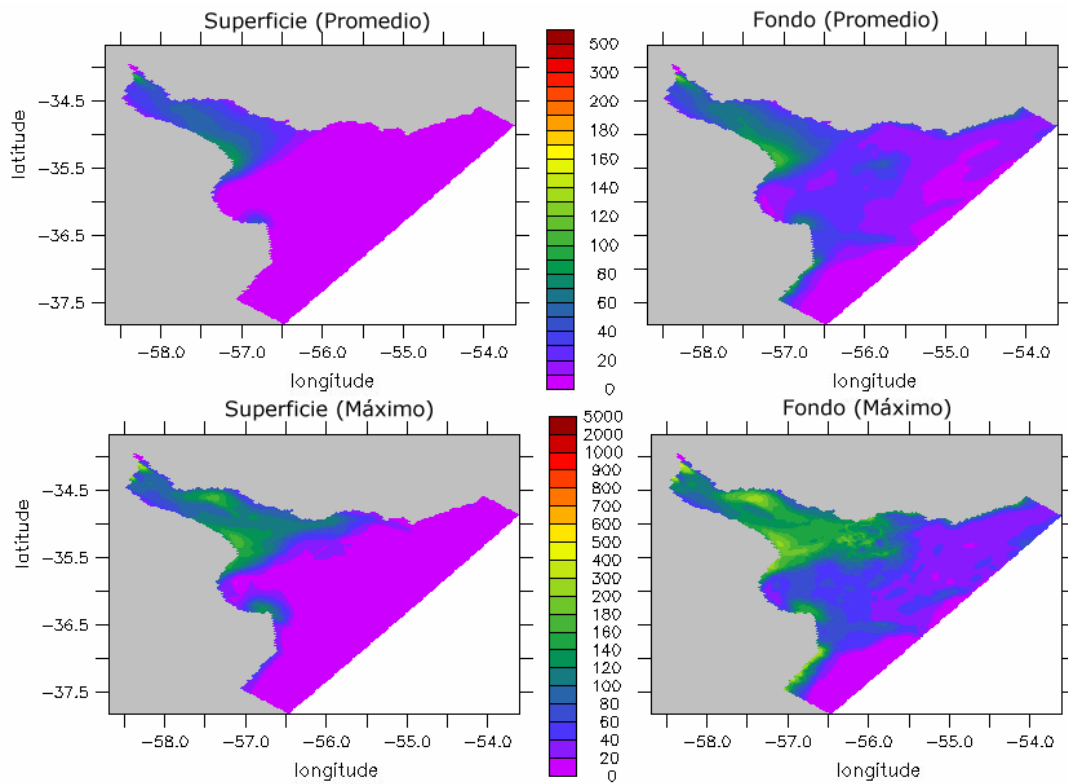


Figura 5.36: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); abril 2010.

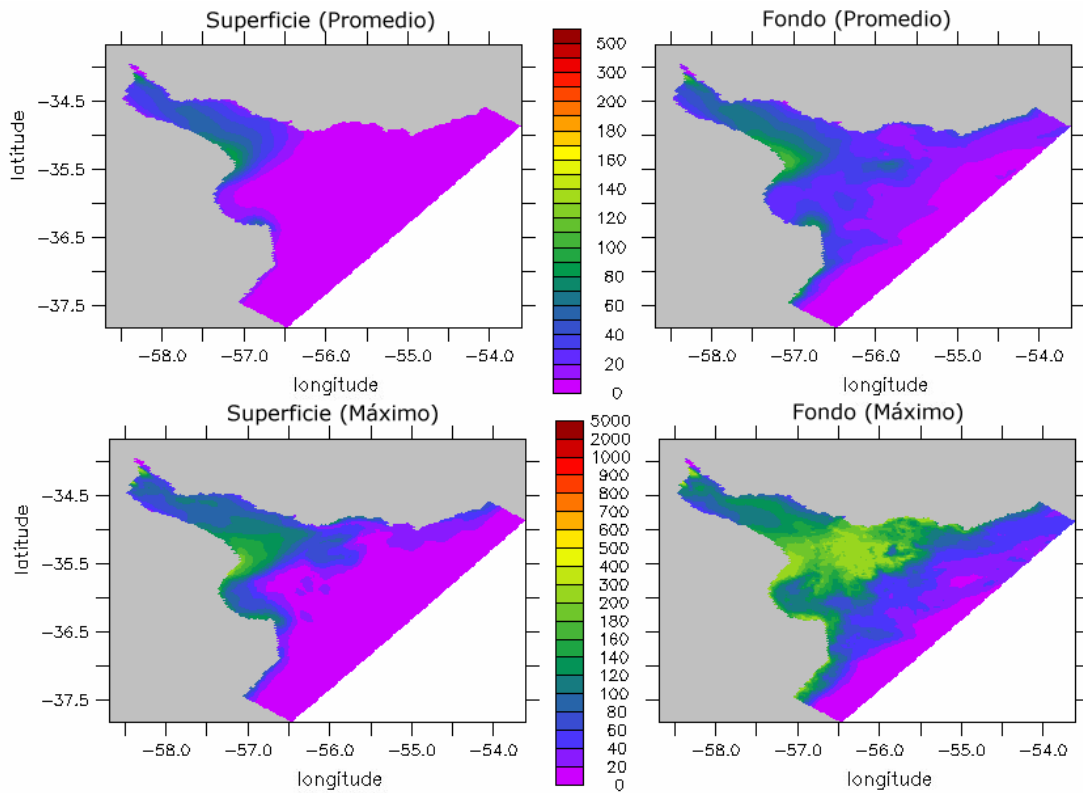


Figura 5.37: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); mayo 2010.

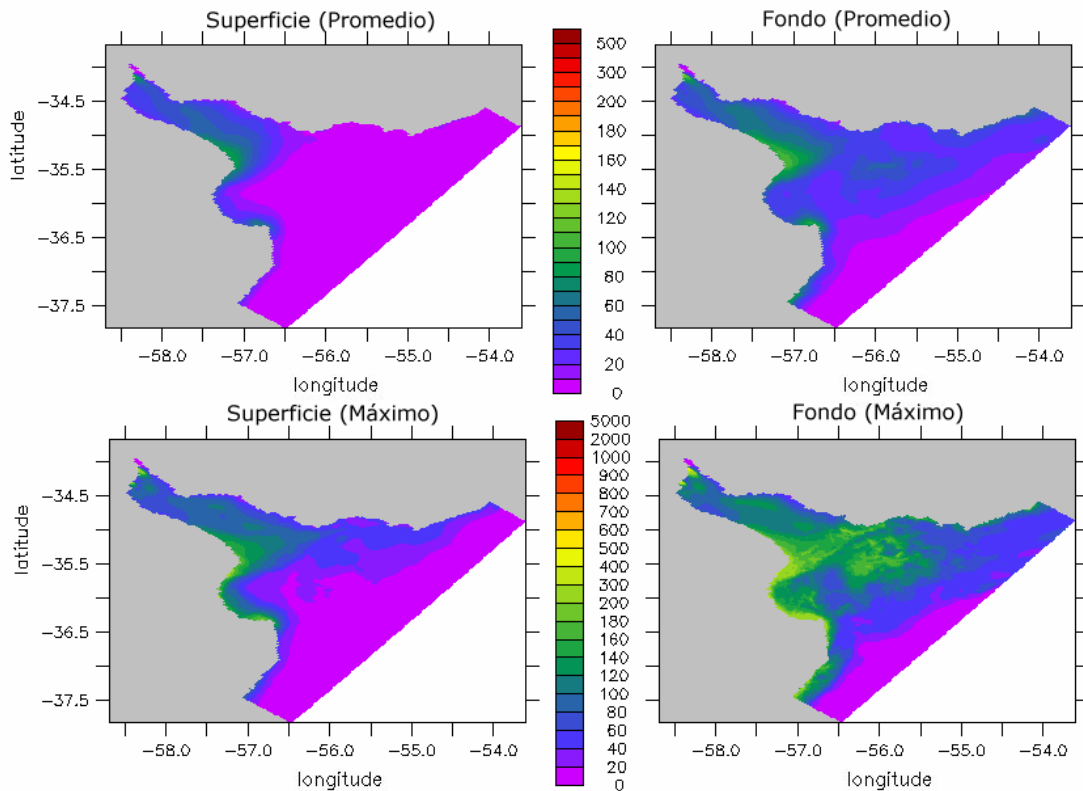


Figura 5.38: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); junio 2010.

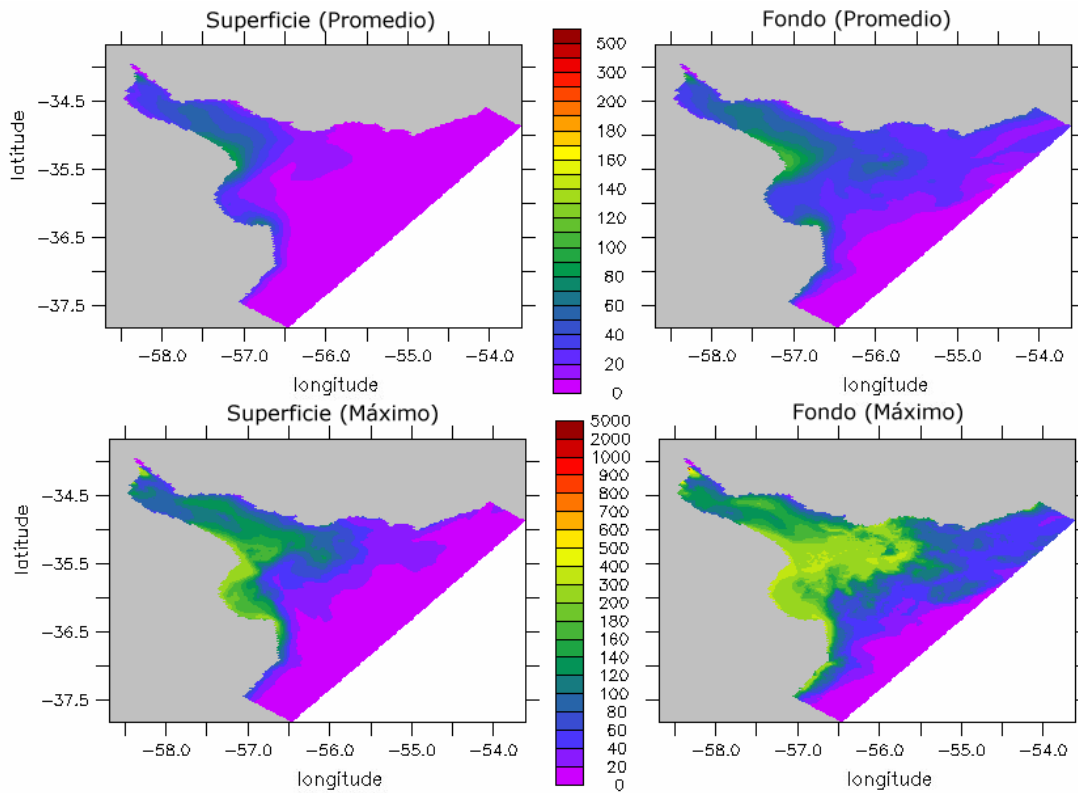


Figura 5.39: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); julio 2010.

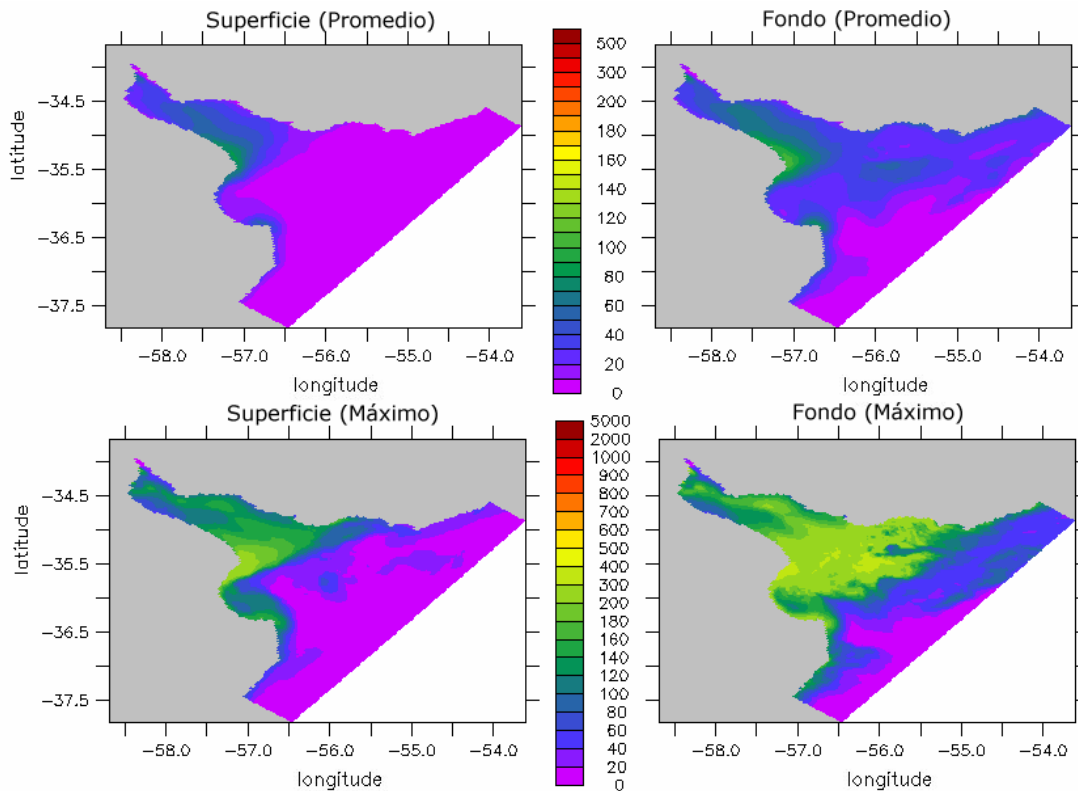


Figura 5.40: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); agosto 2010.

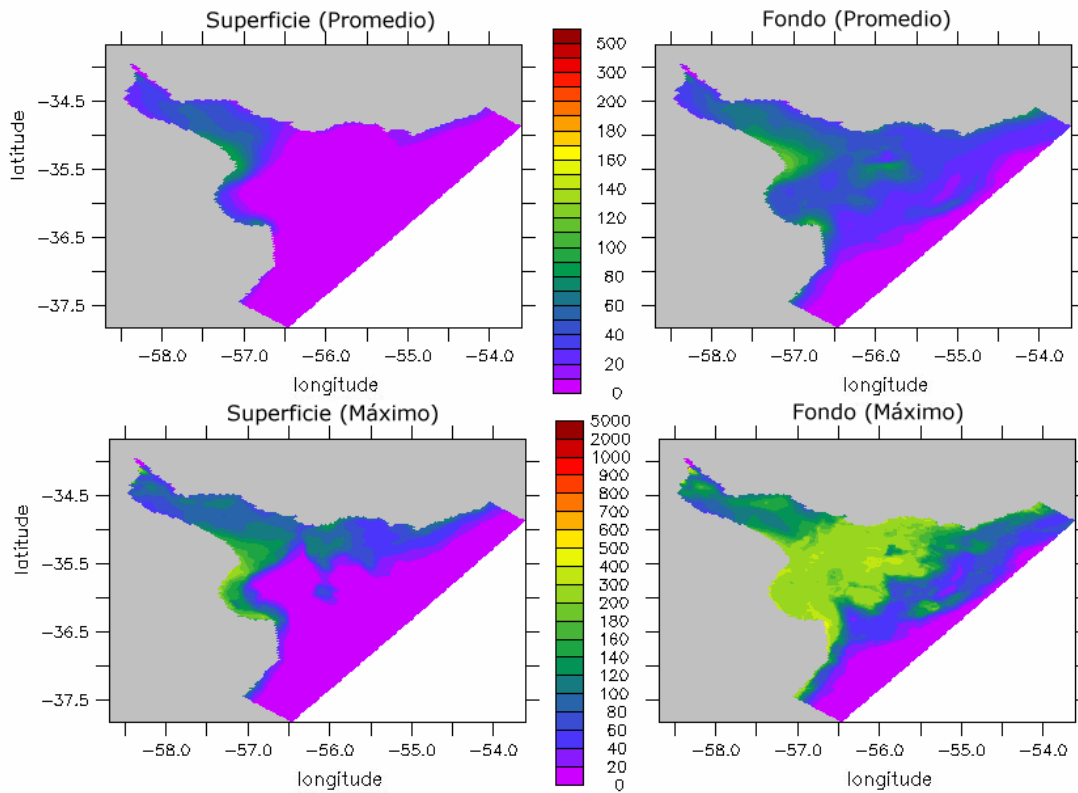


Figura 5.41: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); setiembre 2010.

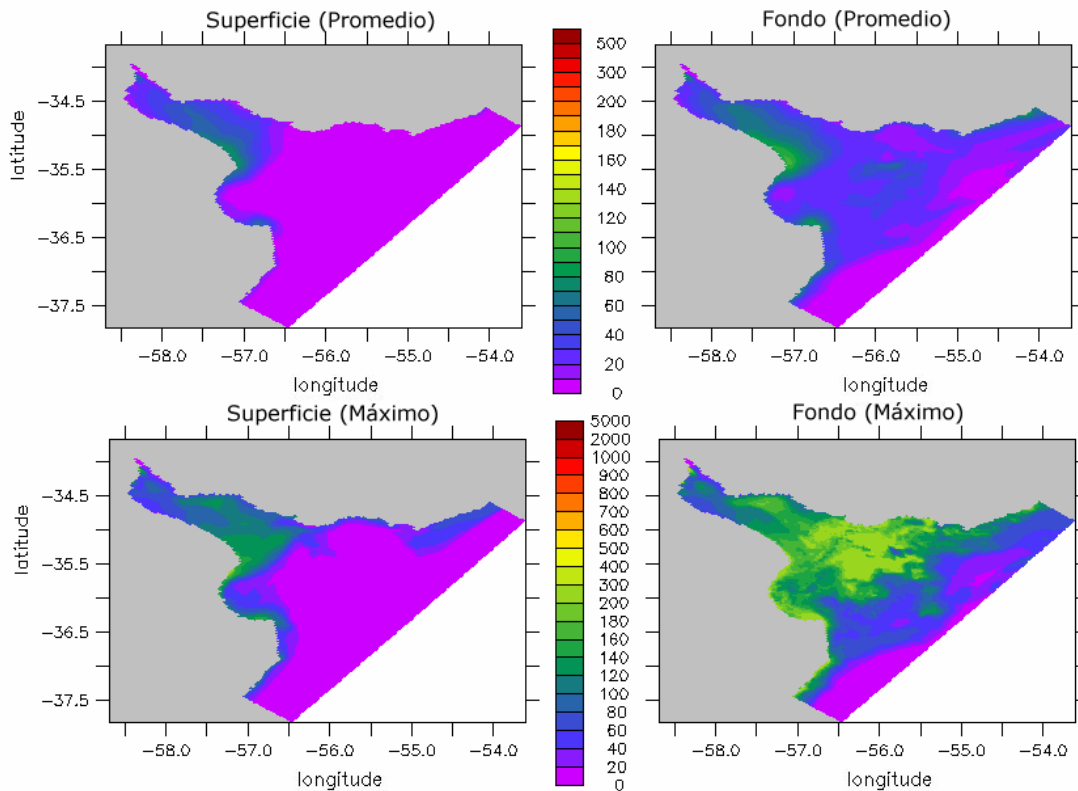


Figura 5.42: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); octubre 2010.

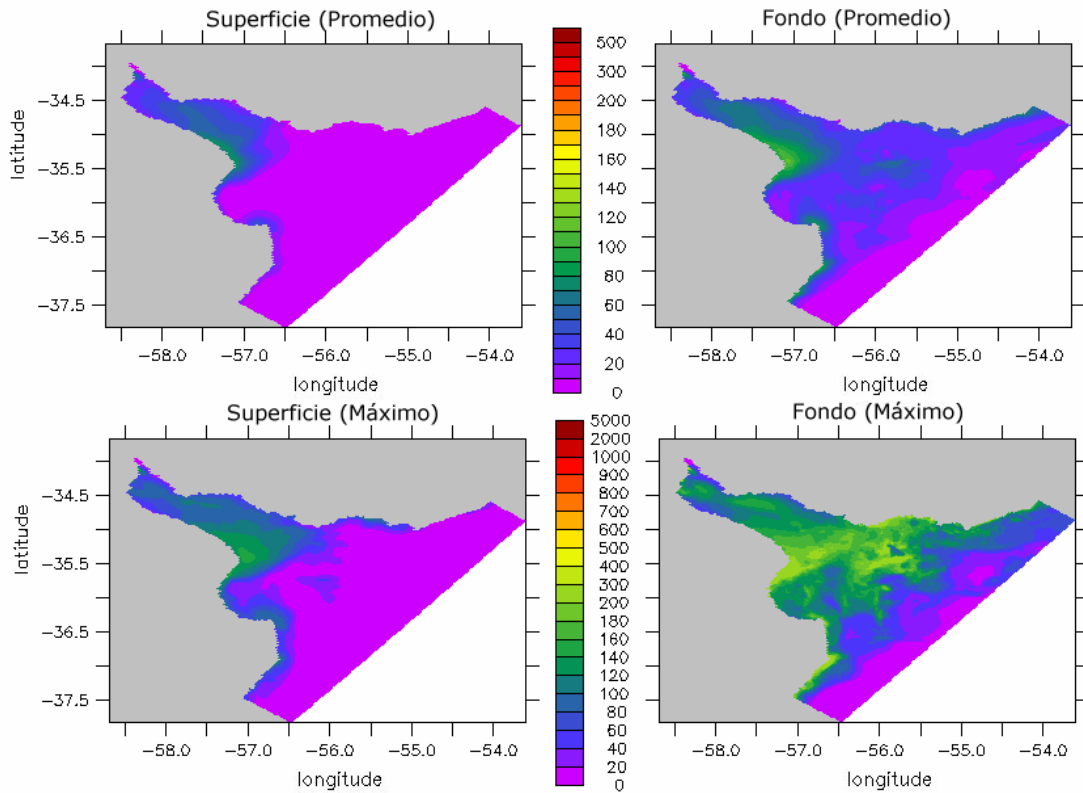


Figura 5.43: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); noviembre 2010.

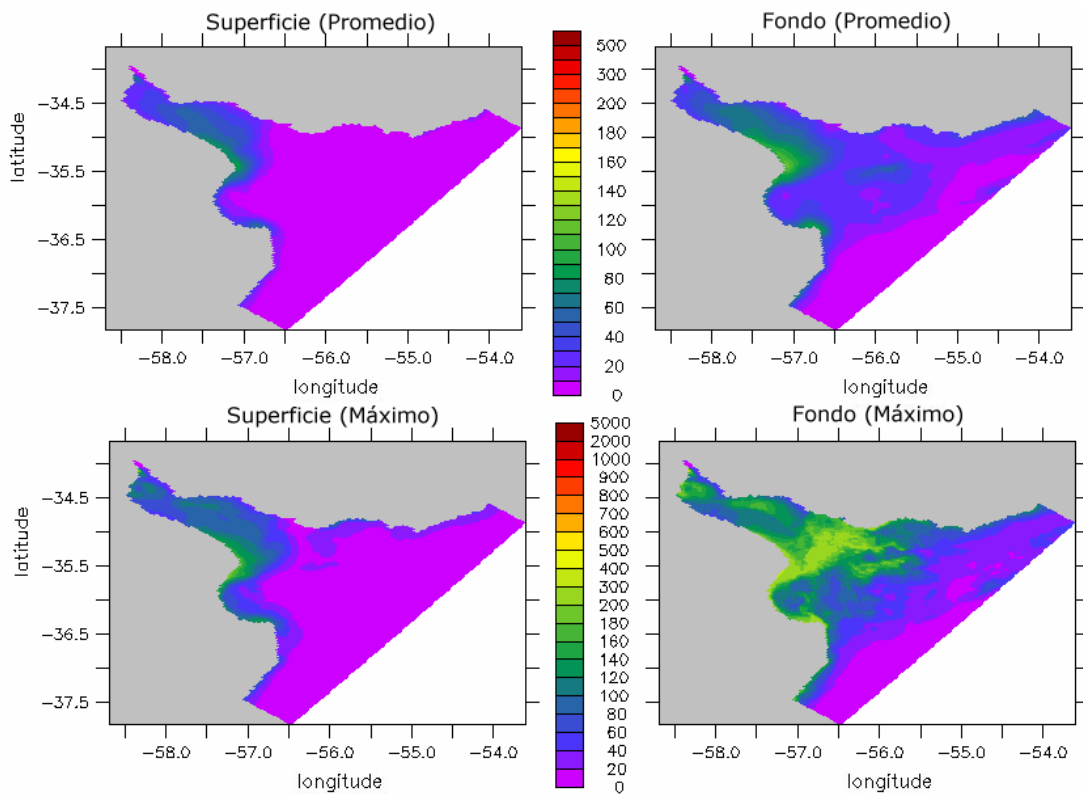


Figura 5.44: Concentración de sedimento en suspensión promedio mensual (paneles superiores) y máxima mensual (paneles inferiores) en superficie (paneles izquierdos) y en el fondo (paneles derechos); diciembre 2010.

5.2.4. Análisis del sedimento de fondo: espesor y composición

5.2.4.1. Variación temporal

Con el objetivo de determinar cómo es la evolución temporal del fondo a partir de la interacción con el sedimento en suspensión se extrajo la información sobre el espesor de fondo y composición en las 26 estaciones de control definidas durante los 2 años simulados.

Los resultados obtenidos en las estaciones de control ubicadas en el interior del Río de la Plata, #1, #2, #3, #5 y #6 se presentan en las Figuras 5.45 y 5.46. En la primera figura se observa la evolución temporal del espesor total de fondo (a partir de los 100 cm iniciales) durante los 2 años simulados. En la segunda figura se presenta la evolución temporal de la composición del depósito generado durante la simulación en las estaciones donde se registra el mismo. De las 5 estaciones presentadas esto ocurre solamente en las estaciones #1 y #5; en las restantes se observa la tendencia del fondo es a erosionarse, nunca superando el depósito inicial de 100 cm, y por tanto la composición corresponde básicamente a la ingresada en el modelo como composición inicial.

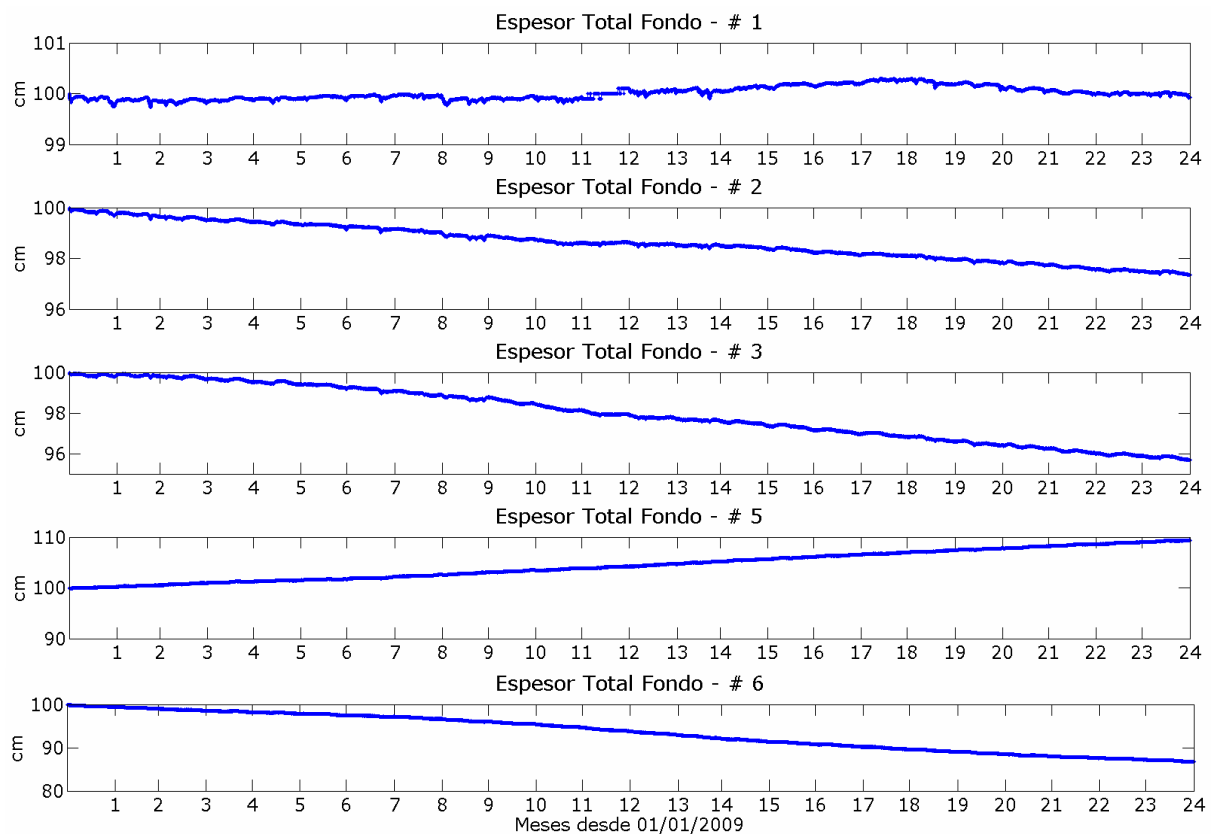


Figura 5.45: Variación temporal del espesor total de fondo en las estaciones de control de la zona interior del Río de la Plata #1, #2, #3, #5 y #6 durante la simulación 2009-2010.

Se observa en la estación #1 el incremento de depósito es muy leve, y básicamente no hay gran variación del espesor de fondo durante el periodo simulado. Estos resultados indican la mayor parte de la zona interior (exceptuando la zona hacia la zona intermedia hacia la costa uruguaya, estación #5) presenta características de poca acumulación de material de fondo. Respecto a la composición se observa en la estación #1, cuando ocurre la deposición, se compone básicamente de material arcilloso, proveniente de la descarga fluvial (MESsilt) y de material erosionado en zonas cercanas (SILTfond). En la estación #5 se observa predomina el material limoso en el depósito generado en la simulación,

proveniente de la erosión del material de fondo de zonas aledañas (SILTfond), siendo muy bajo el porcentaje de material proveniente de los tributarios depositado en la zona.

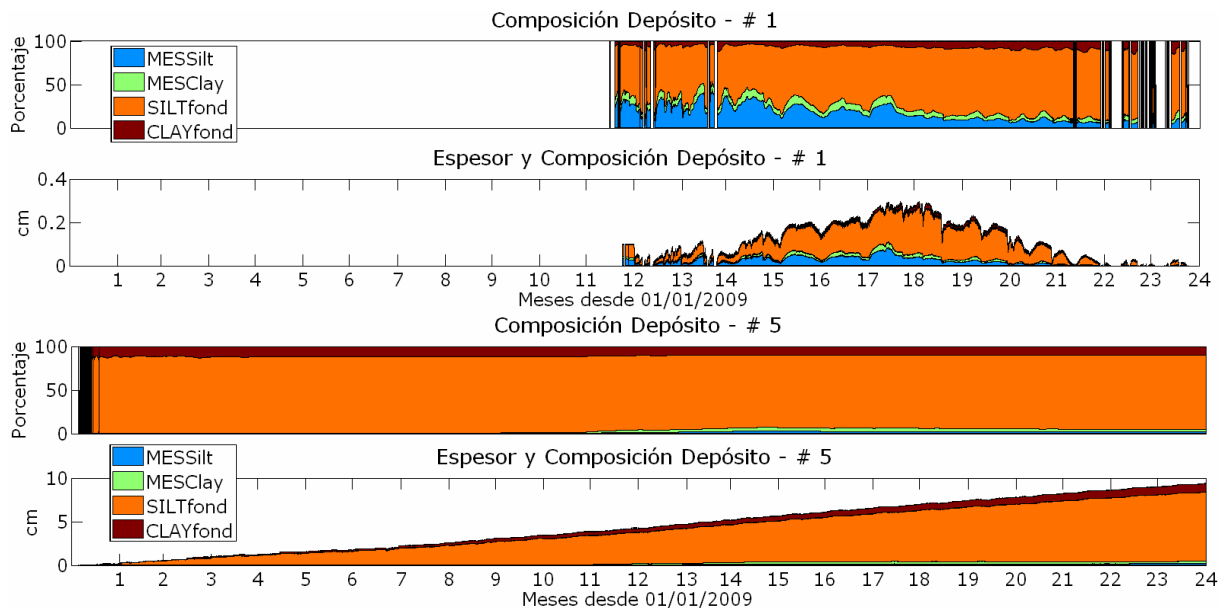


Figura 5.46: Variación temporal de la composición del depósito de fondo generado durante la simulación de 2009-2010 en las estaciones de control de la zona interior del Río de la Plata #1 y #5.

En las estaciones ubicadas en la zona intermedia #7, #8, #9 y #10 se observa una tendencia a la formación de un depósito de material de fondo durante los dos años simulados (Figura 5.47). Cuantitativamente se observa una mayor acumulación de material de fondo desde la costa uruguaya hacia la costa argentina, es decir, con mayor depósito en las estaciones #7 y #8 en relación a las estaciones #9 y #10. La evolución temporal de la composición del depósito generado en dichas estaciones se presenta en la Figura 5.48. Se observa que básicamente el fondo se forma por la deposición de material tipo limoso erosionado en zonas aledañas (SILTfond) y en menor proporción por material tipo arcilloso también proveniente de la erosión de material de fondo (CLAYfond). En las estaciones #9 y #10 se observa cierto porcentaje de material proveniente de los tributarios (MESSilt) en el depósito generado. Durante los primeros meses de la simulación se observa en todas las estaciones cierta variabilidad entre la proporción de ambos materiales en el depósito. En el segundo año de simulación básicamente se observa la proporcionalidad entre los mismos se mantiene, y no se observa prácticamente variación temporal en la composición del depósito de fondo.

Los resultados obtenidos en las restantes estaciones de la zona intermedia, #11, #12, #13, #14, #15 y #15bis, (ubicadas en una transecta transversal al eje del Río de la Plata hacia el exterior en relación a las mencionadas anteriormente) se presentan en las Figuras 5.47 y 5.49. Se observa por un lado un incremento acumulado del espesor de sedimento de fondo en las estaciones #11 y #12 ubicadas entre el eje y la zona costera uruguaya. En cuanto a la composición el depósito está formado mayormente por material limoso erosionado del fondo en zonas aledañas (SILTfond) pero también por un porcentaje importante de material arcilloso (CLAYfond). Se observa además el porcentaje de arcilla en el depósito es mayor durante el año 2009 (casi 50%) que durante el año 2010 (30% aproximadamente), en el cual se alcanza una situación estable.

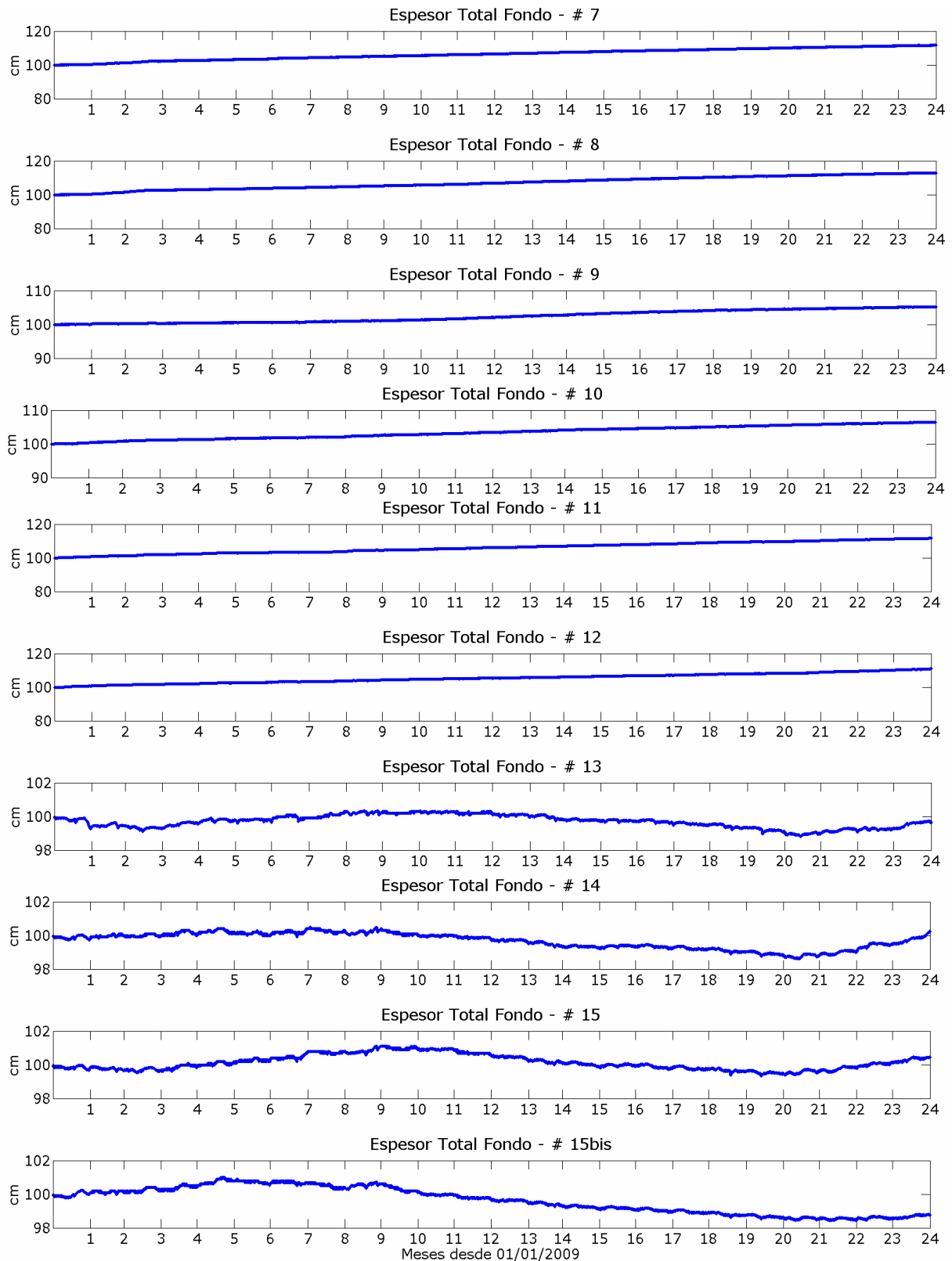


Figura 5.47: Variación temporal del espesor total de fondo en las estaciones de control de la zona intermedia del Río de la Plata #7, #8, #9, #10, #11, #12, #13, #14, #15 y #15bis durante la simulación 2009-2010.

En la estación #12 se observa un leve porcentaje de limo proveniente de los tributarios en el depósito de fondo generado, lo que indica los mismos arriban hasta la zona. Por otra parte en las restantes estaciones (#13, #14, #15 y #15bis) en cambio se

observa una gran variabilidad del espesor de sedimento de fondo, en la escala corta de marea pero también en la tendencia a largo plazo. Inicialmente se observa se genera un depósito por encima de la altura inicial (100 cm) pero hacia el segundo año de simulación se produce una erosión del mismo. Luego de los dos años de simulación el resultado es una disminución neta del sedimento de fondo. Durante los períodos en los cuales se genera un depósito se observa el mismo está compuesto por ambos materiales, limo y arcilla, con un leve predominio del limo. Se observa los materiales descargados durante la simulación por los tributarios (MESsilt y MESclay) no arriban a la zona y por tanto no forman parte del depósito que se observa en estas estaciones.

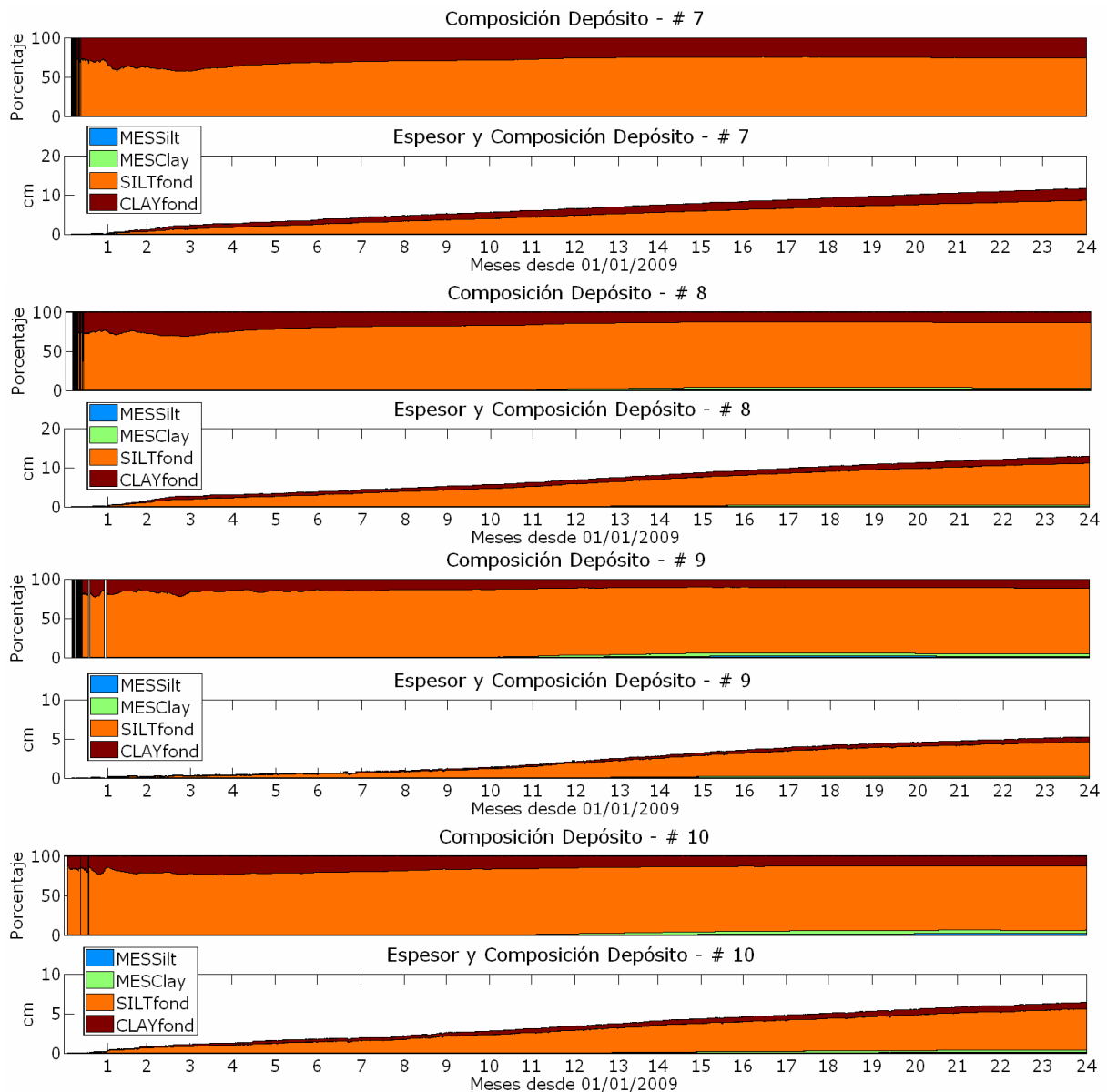


Figura 5.48: Variación temporal de la composición del depósito de fondo generado durante la simulación de 2009-2010 en las estaciones de control de la zona intermedia del Río de la Plata #7, #8, #9, #10 y #11.

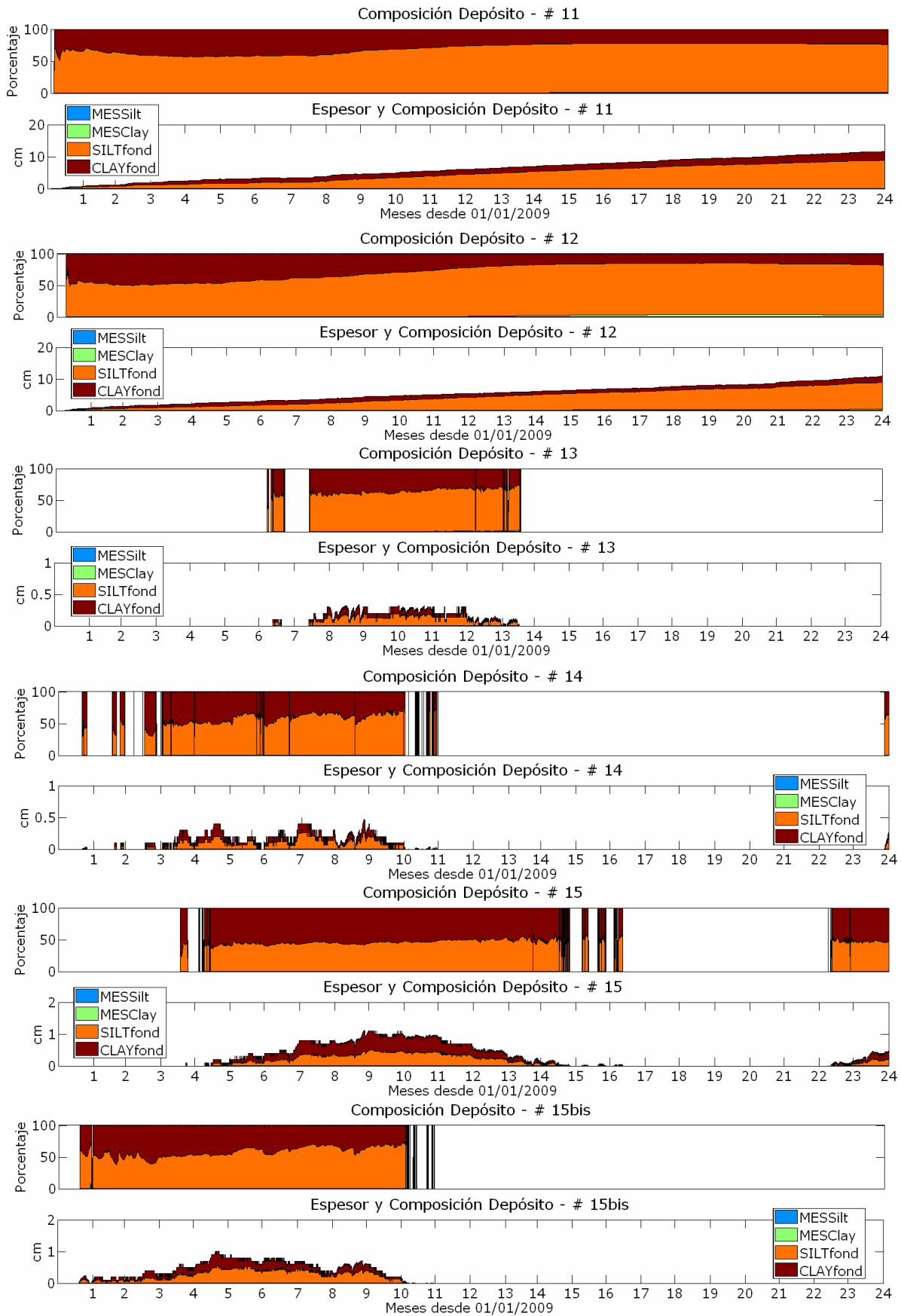


Figura 5.49: Variación temporal de la composición del depósito de fondo generado durante la simulación de 2009-2010 en las estaciones de control de la zona intermedia del Río de la Plata #11, #12, #13, #14, #15 y #15bis.

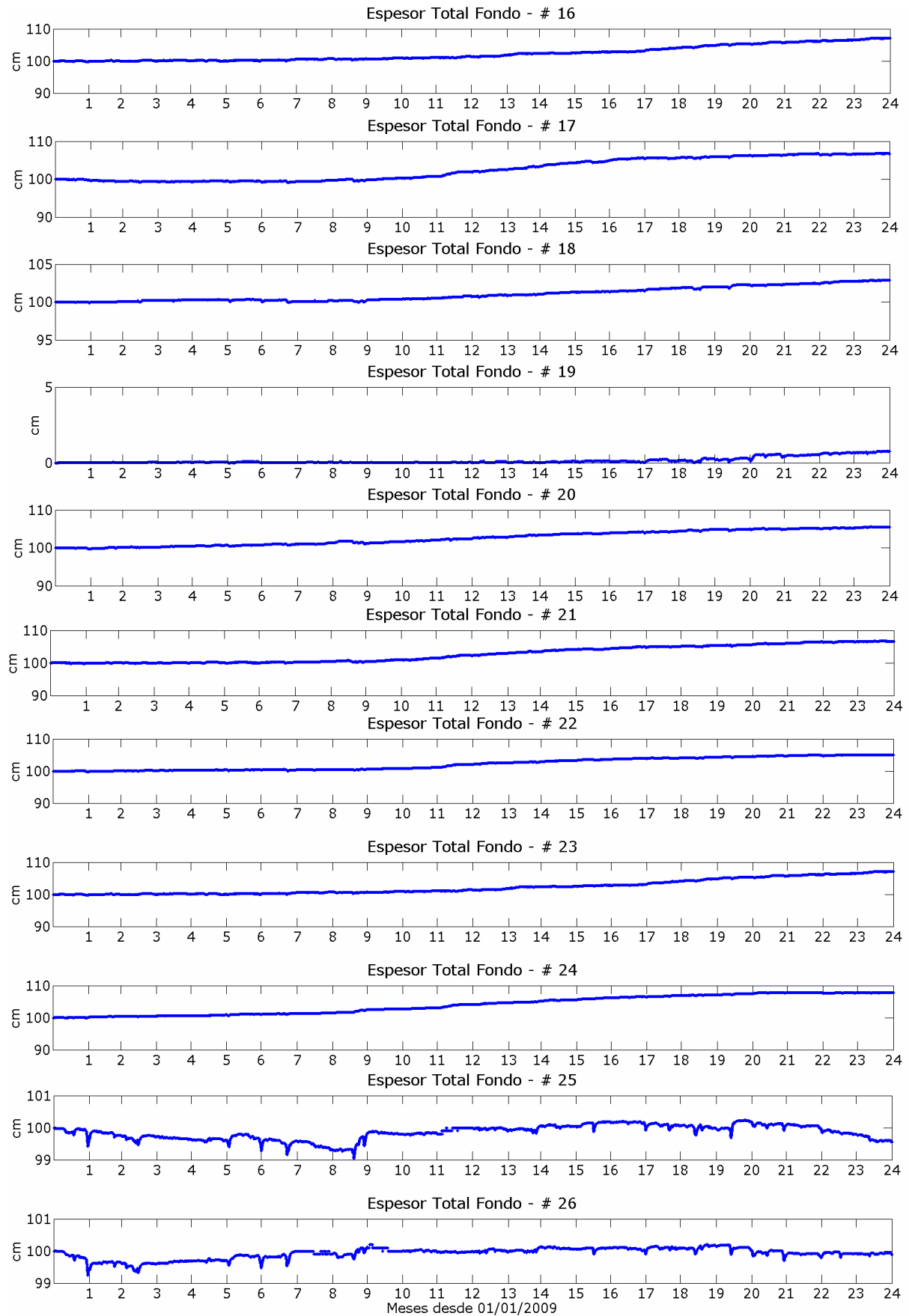


Figura 5.50: Variación temporal del espesor total de fondo en las estaciones de control de la zona exterior del Río de la Plata #16, #17, #18, #19, #20, #21, #22, #23, #24, #25 y #26 durante la simulación 2009-2010.

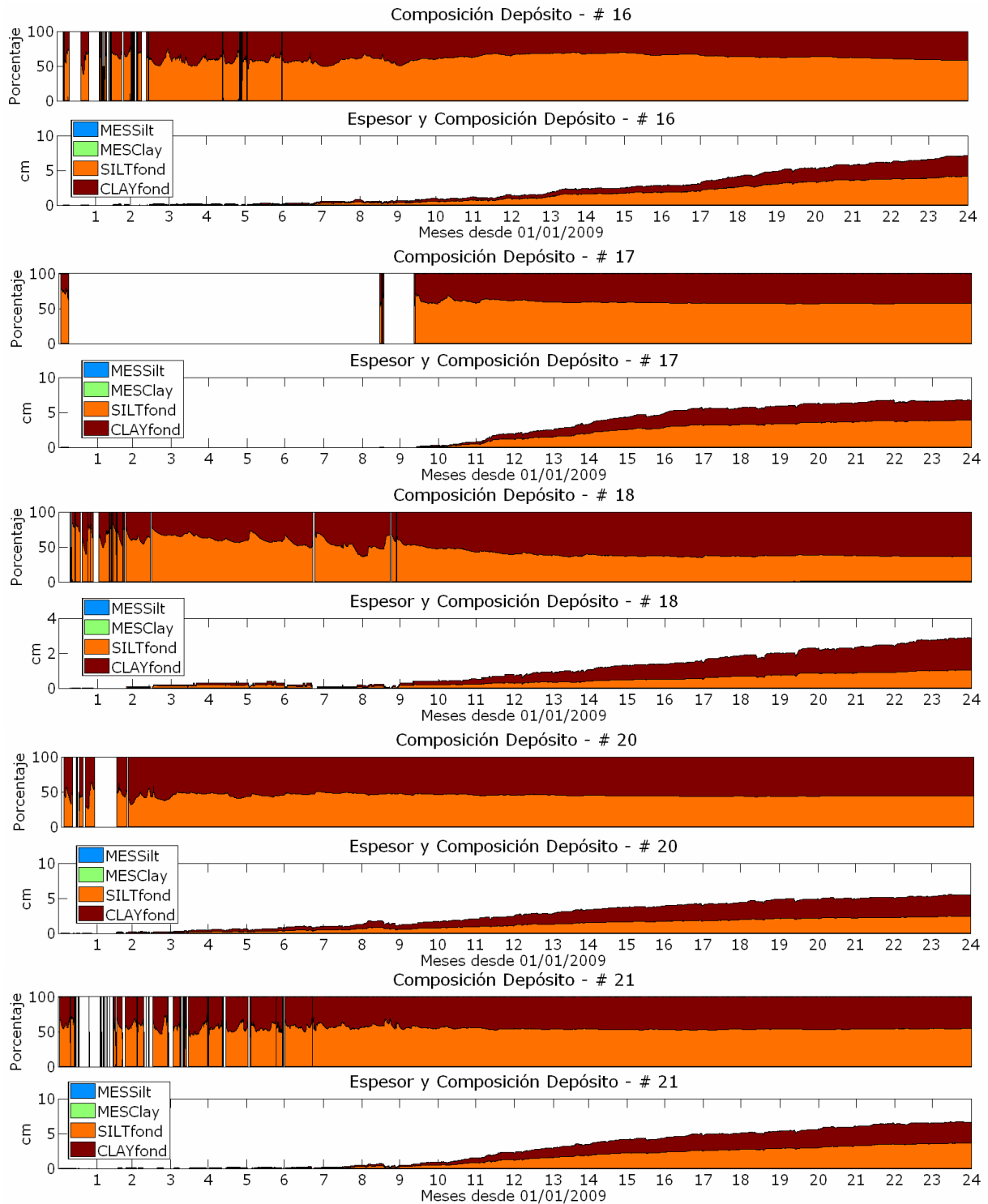


Figura 5.51: Variación temporal de la composición del depósito de fondo generado durante la simulación de 2009-2010 en las estaciones de control de la zona exterior del Río de la Plata #16, #17, #18, #19, #20 y #21.

La evolución temporal del espesor del sedimento de fondo en las estaciones ubicadas en el exterior del Río de la Plata #16 a #21 (Figura 5.50) muestra básicamente una etapa inicial de leve variación (durante la mayor parte del año 2009) y una segunda etapa donde se establece un incremento del espesor de sedimento de fondo indicando la generación de un depósito. Este depósito disminuye en espesor a medida que la estación se ubica más hacia el exterior; en la estación #19 se observa el mismo es muy leve.

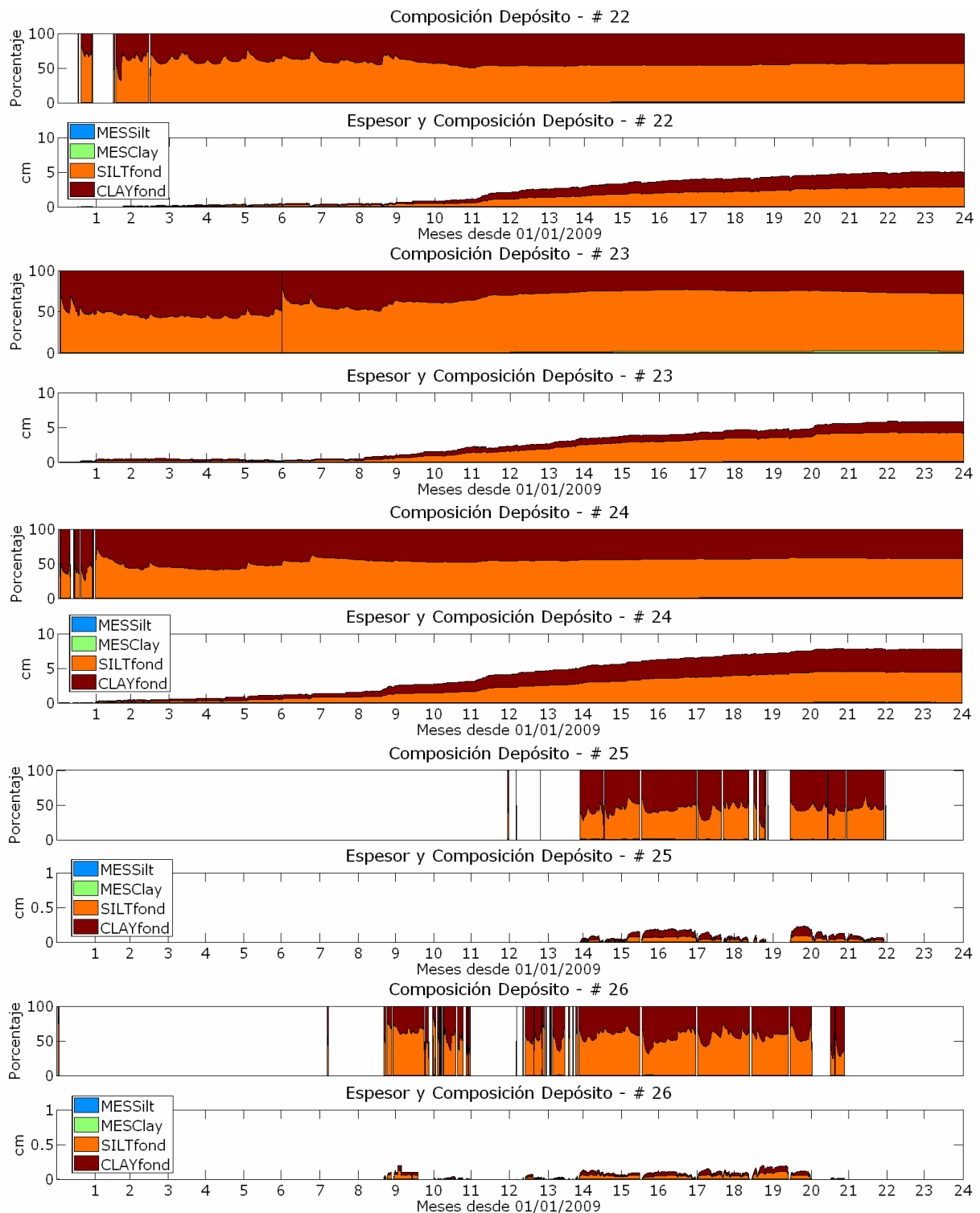


Figura 5.52: Variación temporal de la composición del depósito de fondo generado durante la simulación de 2009-2010 en las estaciones de control de la zona exterior del Río de la Plata hacia la costa uruguaya #22, #23, #24, #25 y #26.

La evolución temporal de la composición del depósito generado en las estaciones de control ubicadas en la zona exterior #16 a #21 se presenta en la Figura 5.51. Se observa en la misma el depósito que se forma en estas estaciones está compuesto por proporciones similares de limo y arcilla, ambos provenientes del material ingresado inicialmente como sedimento de fondo (SILTfond y CLAYfond). Se observa en las estaciones #18 y #20 el porcentaje de material arcilloso incluso supera al porcentaje de

limo, aunque los valores son muy similares. Por último en las Figuras 5.50 y 5.52 se presentan los resultados obtenidos para las estaciones exteriores ubicadas hacia la costa uruguaya #22, #23, #24, #25 y #26. Se observa en las tres primeras un comportamiento similar al descrito anteriormente para las restantes estaciones ubicadas en el exterior. Hacia el segundo año de simulación se observa la formación de un depósito de sedimento en el fondo, formado por limo y arcilla con un leve predominio de las primeras, proveniente de la erosión de sedimento de fondo de zonas aledañas. En cambio en las estaciones más exteriores #25 y #26 se observa una variabilidad del espesor de fondo con una tendencia neta a la erosión. En los períodos donde en las mismas se observa la formación de un depósito en el fondo la proporción de materiales tipo limo y arcilla es similar. Se observa que durante el período de dos años determinado por la extensión de la simulación el material ingresado por los tributarios no arriba a la zona exterior.

5.2.4.2. Variación espacial mensual

En esta sección se analiza la variación espacial de la evolución del sedimento de fondo. Los resultados obtenidos durante el análisis de la evolución temporal mostraron una variabilidad de corta escala asociada a los eventos de marea y a las tormentas, y por otro lado una tendencia a largo plazo en las diversas estaciones analizadas. El objetivo en este caso es obtener los diversos patrones de variación del sedimento de fondo a nivel mensual. Para los 24 meses simulados se calcula la diferencia entre el espesor de sedimento de fondo al final del mes y el espesor al inicio del mes. De esta manera se obtiene para cada mes cómo es la variación neta del sedimento de fondo a lo largo del mismo. Valores negativos de variación del espesor de fondo indican una erosión neta y valores positivos una deposición de material. No se consideran en este caso otros patrones de variaciones más cortas, de por ejemplo escala diaria o durante períodos de calma y tormentas. Estos patrones serán analizados en la siguiente sección. En términos generales los resultados obtenidos muestran que hay cierta variabilidad en los patrones mensuales de variación del sedimento de fondo y es posible identificar diversos patrones de deposición del material erosionado por mes.

En la Figura 5.53 se presentan los resultados obtenidos para los primeros 4 meses del año 2009 simulado. Se observa hay ciertos patrones que se mantienen en los meses analizados y otros que varían mes a mes. Por ejemplo en enero 2009 en la zona costera uruguaya exterior y en la zona del frente y costa argentina intermedia hacia el exterior se observa una tendencia a la erosión, mientras que en los restantes meses éste patrón se mantiene solamente en la zona de Punta Piedras y en la zona ubicada al norte del Banco Inglés. En la zona interior del Río de la Plata se mantiene en los 4 meses el mismo patrón de tendencia a la erosión. Durante el mes de febrero 2009 se observa básicamente un patrón de deposición en todo el Río de la Plata. Por último en marzo y abril 2009 se observan ciertas zonas de deposición combinados con zonas de leve erosión.

Los patrones espaciales de variación del sedimento de fondo obtenidos para el segundo cuatrimestre del año 2009 se presentan en la Figura 5.54. El mes de junio de 2009 presenta diferencias en relación a los restantes indicando una tendencia a la erosión principalmente en la mayor parte del Río de la Plata. El mes de julio en cambio muestra una tendencia general a la deposición de material, con mayores valores sobre la zona del frente y costa uruguaya. Los meses de mayo y agosto 2009 muestran patrones similares con zonas de tendencia a la erosión y zonas de tendencia a la deposición.

Los resultados obtenidos para el último cuatrimestre del año 2009 se presentan en la Figura 5.55. Se observa básicamente la diferencia en los resultados obtenidos en cada mes radica en el patrón espacial de deposición de material en la zona del frente y en la zona exterior. En setiembre 2009 se observa por ejemplo una mayor deposición sobre la costa uruguaya mientras que en noviembre y diciembre los resultados indican una

deposición de material preferencial en la zona del frente (línea Punta Piedras-Montevideo). El mes de octubre en cambio muestra un patrón de deposición leve en la mayor parte del Río de la Plata exterior.

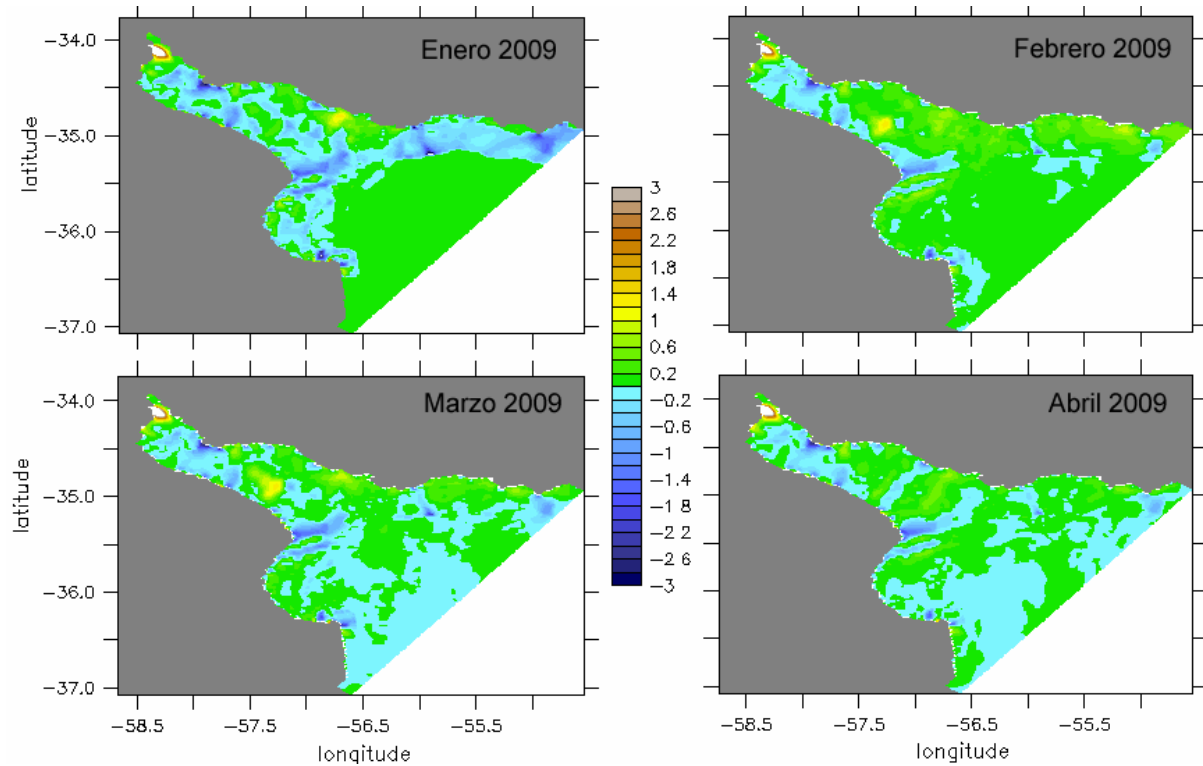


Figura 5.53: Distribución espacial de la variación mensual del espesor de sedimento de fondo (escala en cm) obtenida con el modelo para el primer cuatrimestre del año 2009.

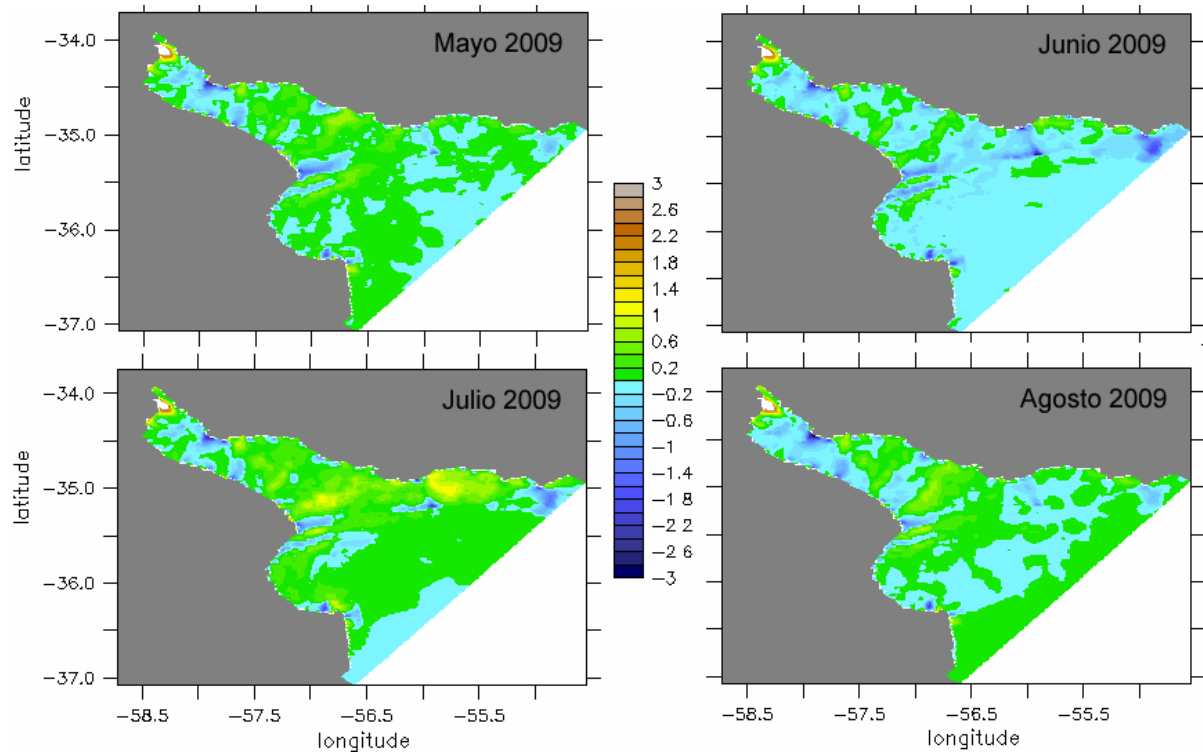


Figura 5.54: Distribución espacial de la variación mensual del espesor de sedimento de fondo (escala en cm) obtenida con el modelo para el segundo cuatrimestre del año 2009.

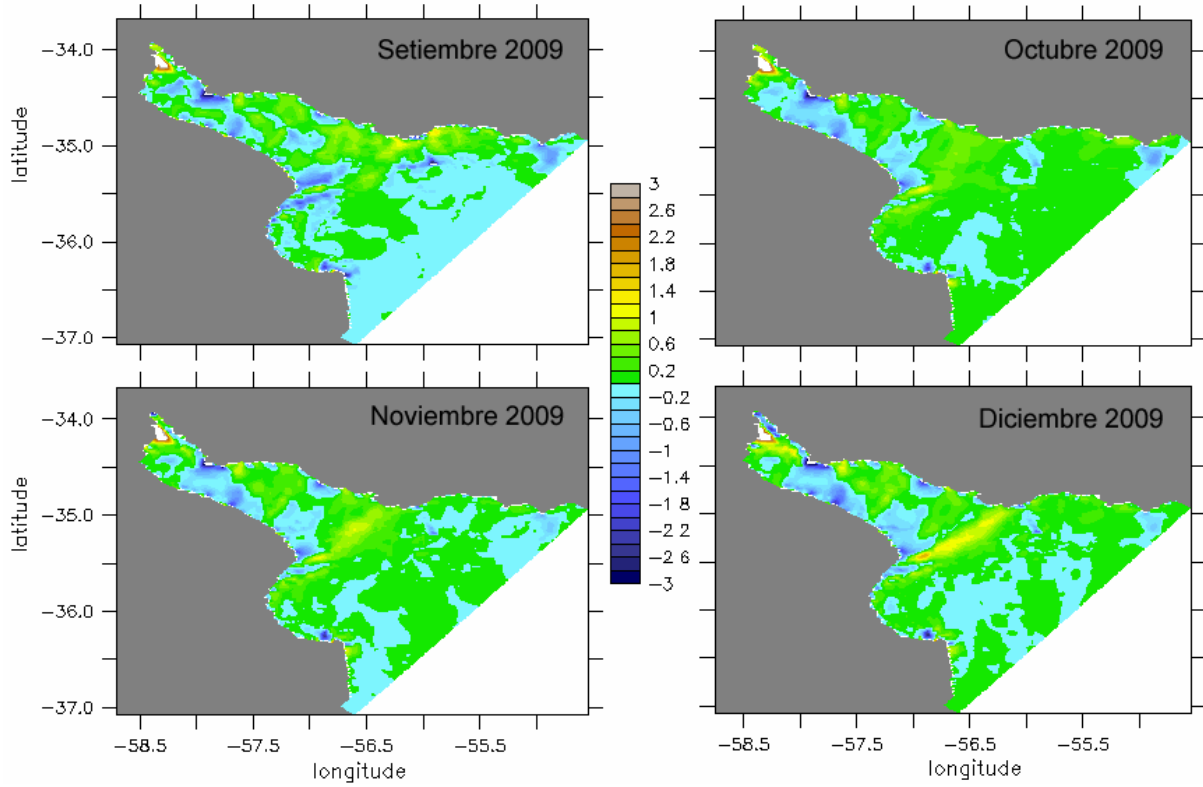


Figura 5.55: Distribución espacial de la variación mensual del espesor de sedimento de fondo (escala en cm) obtenida con el modelo para el tercer cuatrimestre del año 2009.

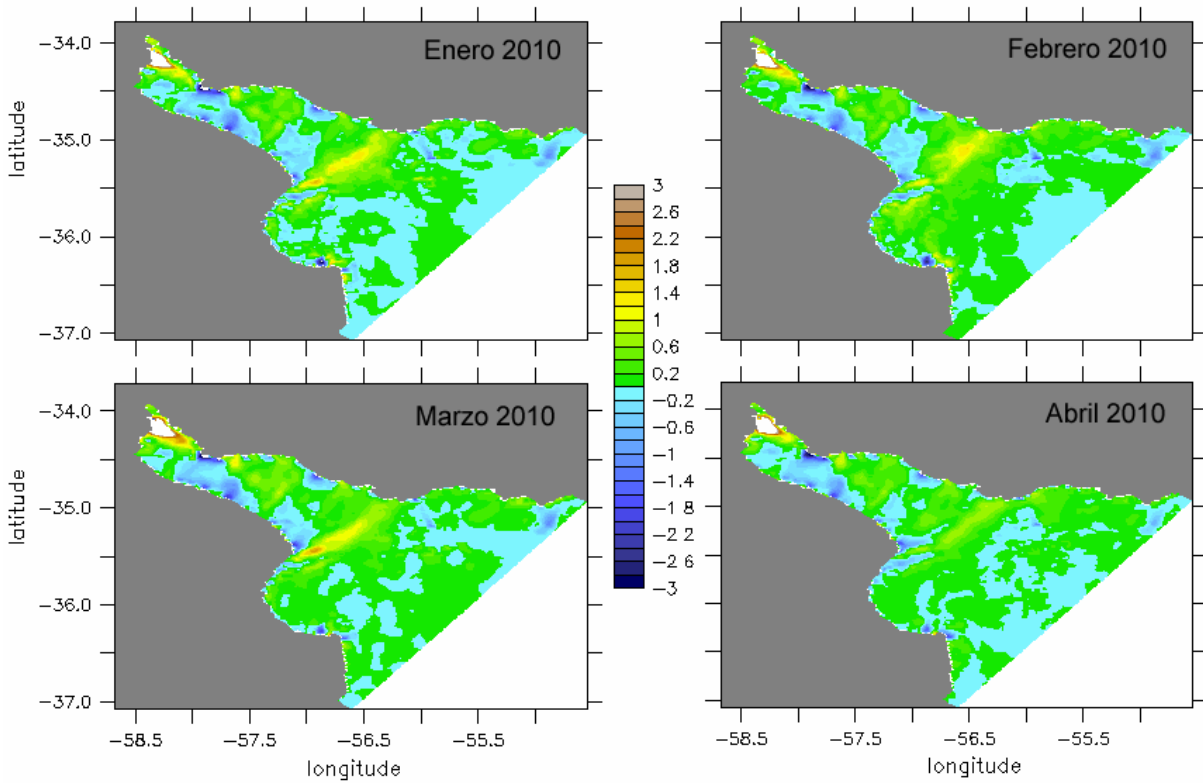


Figura 5.56: Distribución espacial de la variación mensual del espesor de sedimento de fondo (escala en cm) obtenida con el modelo para el primer cuatrimestre del año 2010.

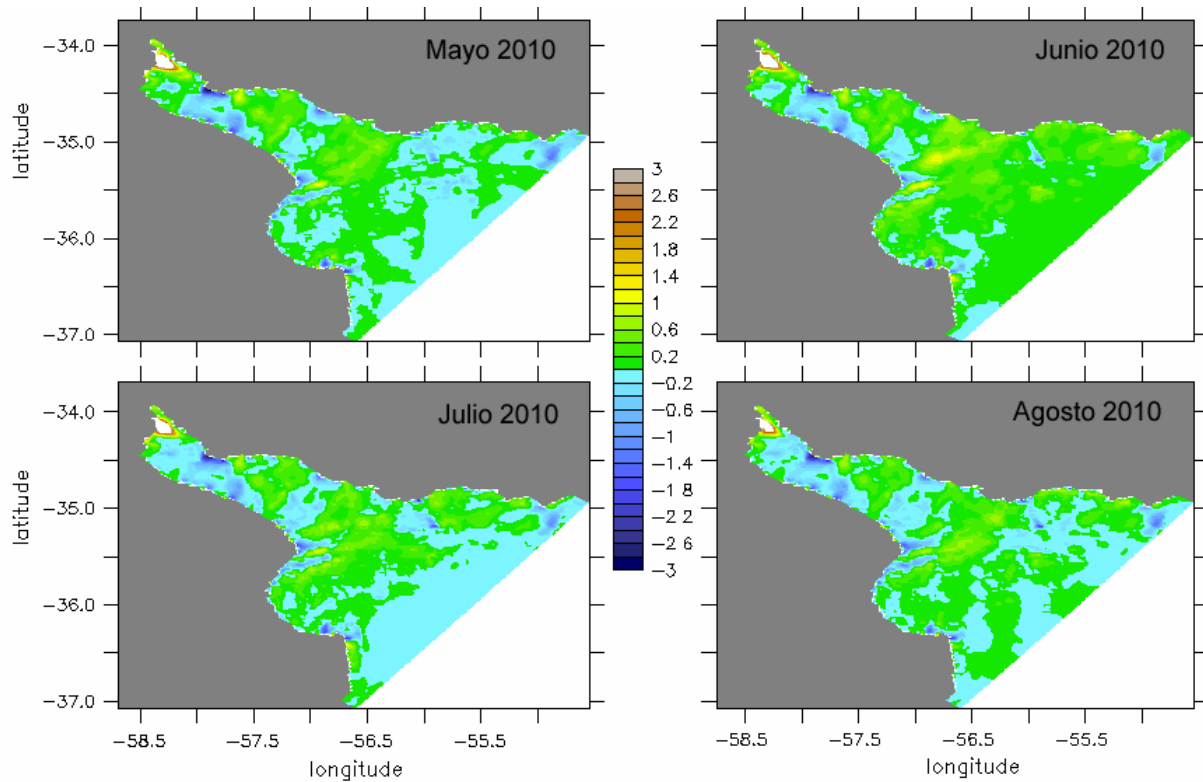


Figura 5.57: Distribución espacial de la variación mensual del espesor de sedimento de fondo (escala en cm) obtenida con el modelo para el segundo cuatrimestre del año 2010.

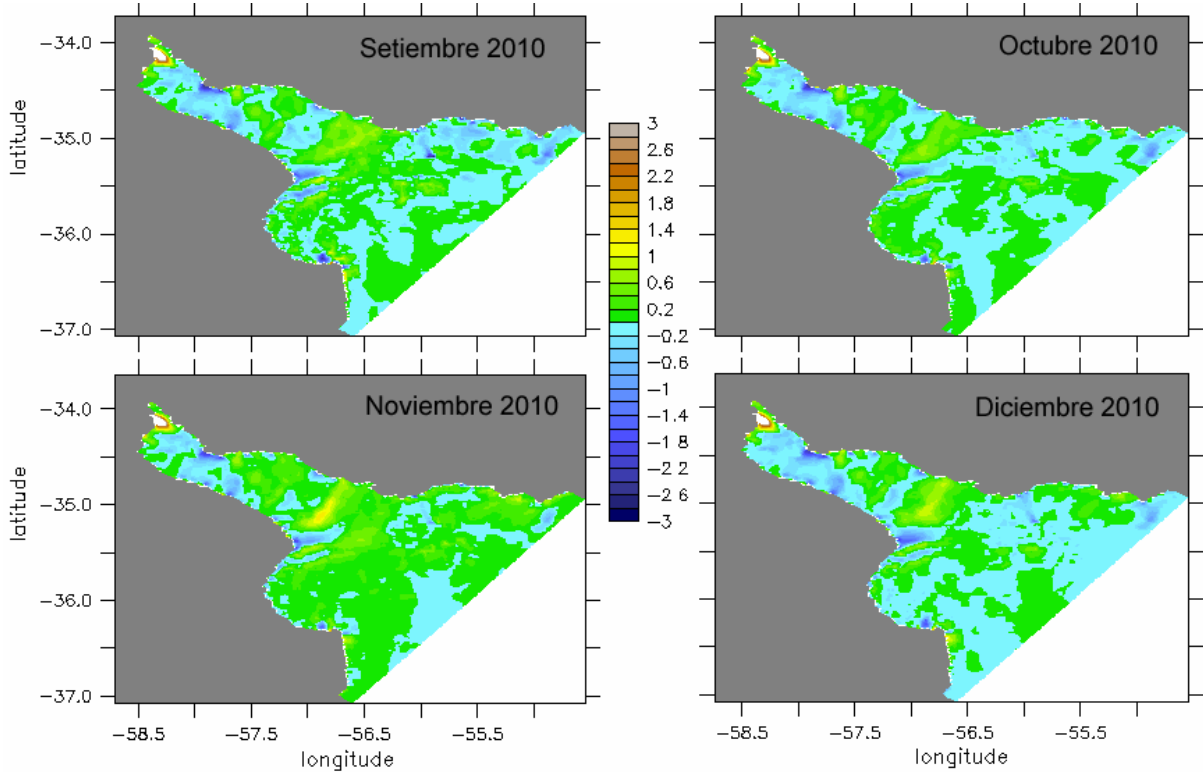


Figura 5.58: Distribución espacial de la variación mensual del espesor de sedimento de fondo (escala en cm) obtenida con el modelo para el tercer cuatrimestre del año 2010.

Estos patrones de deposición de material identificados para el último cuatrimestre del año 2009 se continúan identificando en los resultados obtenidos para el

primer cuatrimestre del año 2010 simulado (Figura 5.56). Se observa en enero, febrero y marzo 2010 se destaca el patrón de deposición de material en la transición entre la zona intermedia y externa, además de la deposición habitual identificada en la zona intermedia superior del Río de la Plata. En abril también se identifica el mismo patrón aunque cuantitativamente las variaciones son menores a las obtenidas en los meses anteriores. Los resultados obtenidos para los meses del segundo cuatrimestre del año 2010 se presentan en la Figura 5.57. Se observa que en estos casos las zonas de mayor deposición no están tan marcadas como en los casos anteriores y los patrones de deposición presentan una variación mes a mes en la zona exterior principalmente. El mes de junio de 2010 presenta una tendencia a la deposición en prácticamente todo el Río de la Plata exterior, mientras que en mayo, julio y agosto 2010 hay combinación de zonas de deposición y erosión aunque con leves variaciones en general. Por último, los resultados obtenidos para el tercer cuatrimestre del año 2010 (Figura 5.58) muestran patrones un poco diferentes. En setiembre y octubre 2010 se observa una tendencia a la deposición de material en el límite exterior de la zona intermedia, que luego se acentúa para los meses de noviembre y diciembre 2010. En la zona exterior en setiembre, octubre y diciembre 2010 la tendencia general es a una leve erosión sin incremento del espesor de fondo, mientras que para noviembre se observa básicamente un patrón de deposición de material en el fondo.

5.2.4.3. Variación espacial diaria

En función de la variación temporal de la evolución del sedimento de fondo a escala de marea y asociada a las tormentas identificada en la sección anterior, y de la variabilidad mensual identificada en los patrones espaciales del mismo, se realizó un análisis de las variaciones diarias del sedimento de fondo. Para cada día del período simulado (2009-2010) se calculó la diferencia entre el espesor de fondo al final y al inicio del mismo, y se graficó de forma espacial en la zona de interés. De esta manera se identifican los principales patrones y sus variaciones.

En la mayoría de los casos analizados se obtiene una variación leve diaria del sedimento de fondo, lo que se corresponde con períodos de tiempo asociados a las mareas, predominantes en el área. No obstante, dichos patrones presentan grandes variaciones durante los períodos de tormenta y en los instantes posteriores a las mismas, registrándose patrones de erosión predominante durante los días en los cuáles ocurren, y de deposición predominante en los días posteriores a las mismas. Con el objetivo de presentar los resultados que se obtienen a lo largo de varios días en un período habitual de calma con leves tormentas se presentan en la Figura 5.59 los campos de variación diaria del sedimento de fondo obtenidos para los últimos días del mes de noviembre 2009 (21 al 30). En la misma se observa por un lado que a nivel diario las variaciones del sedimento de fondo son bajas, en general bastante menores a los 0,6 cm establecidos como máxima fluctuación en la escala de referencia seleccionada. Por otra parte se observa una gran variabilidad en los patrones de variación del espesor del sedimento de fondo a escala diaria. Por ejemplo los días 21, 22 y 23 hay una tendencia en la mayor parte del Río de la Plata a la deposición y en cambio el día 24 el patrón es bien diferente con una disminución del espesor de fondo en prácticamente toda la zona, debido a una leve tormenta ocurrida ese día. En consecuencia el día 25 los patrones de deposición son de mayor magnitud, y se ubican principalmente en la zona del frente y en la Bahía de Samborombón. Los días 26, 27 y 28 los forzantes hidrodinámicos corresponden a situaciones de calma (domina la marea) y nuevamente se observa una tendencia a una leve acumulación en gran parte del Río de la Plata. Por último los días 29 y 30 se observan leves modificaciones con una tendencia a la erosión en la zona intermedia, producto de una mayor intensidad de marea meteorológica.

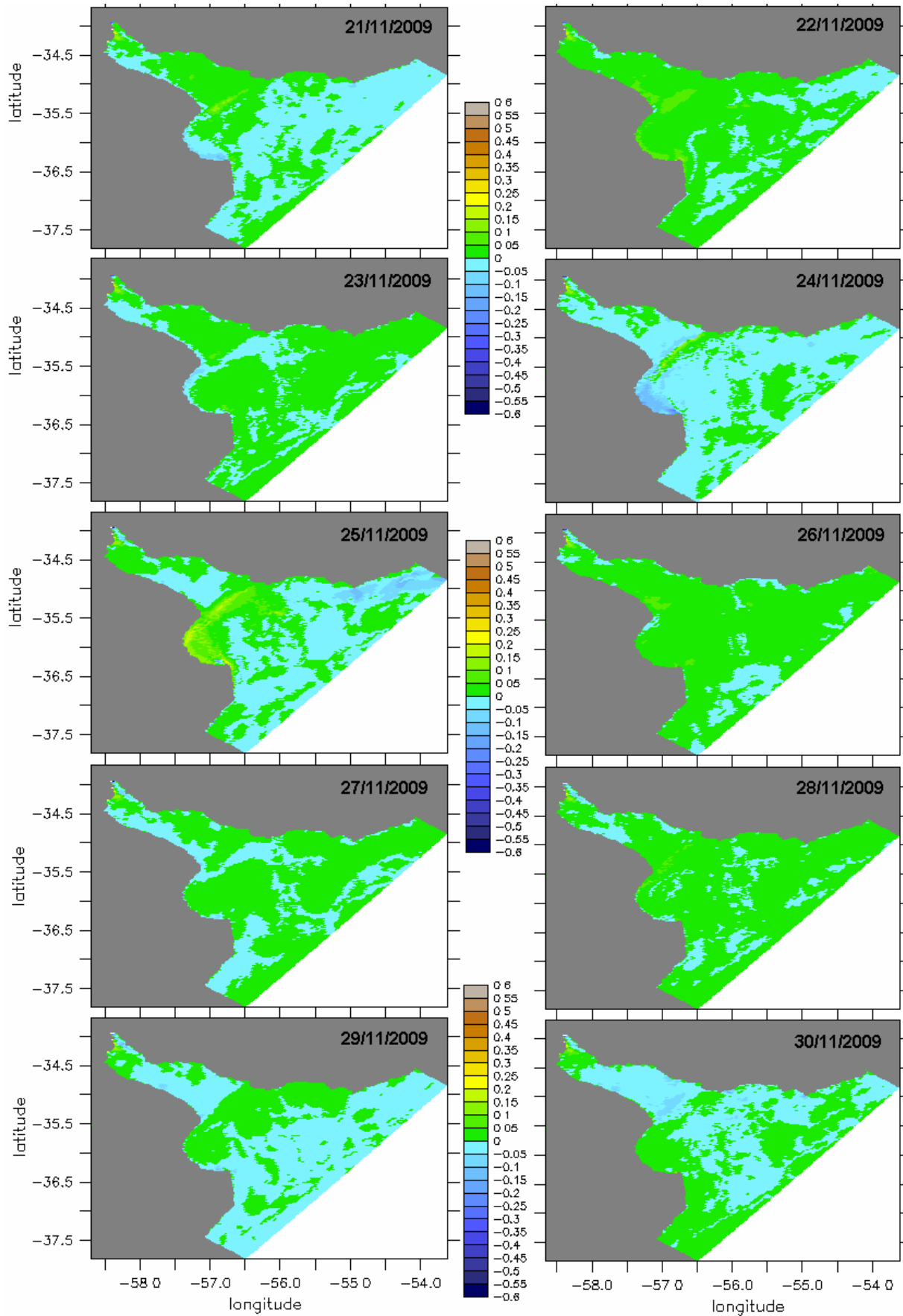


Figura 5.59: Distribución espacial de la variación diaria del espesor de sedimento de fondo (escala en cm) obtenida con el modelo para los últimos 10 días del mes de noviembre 2009.

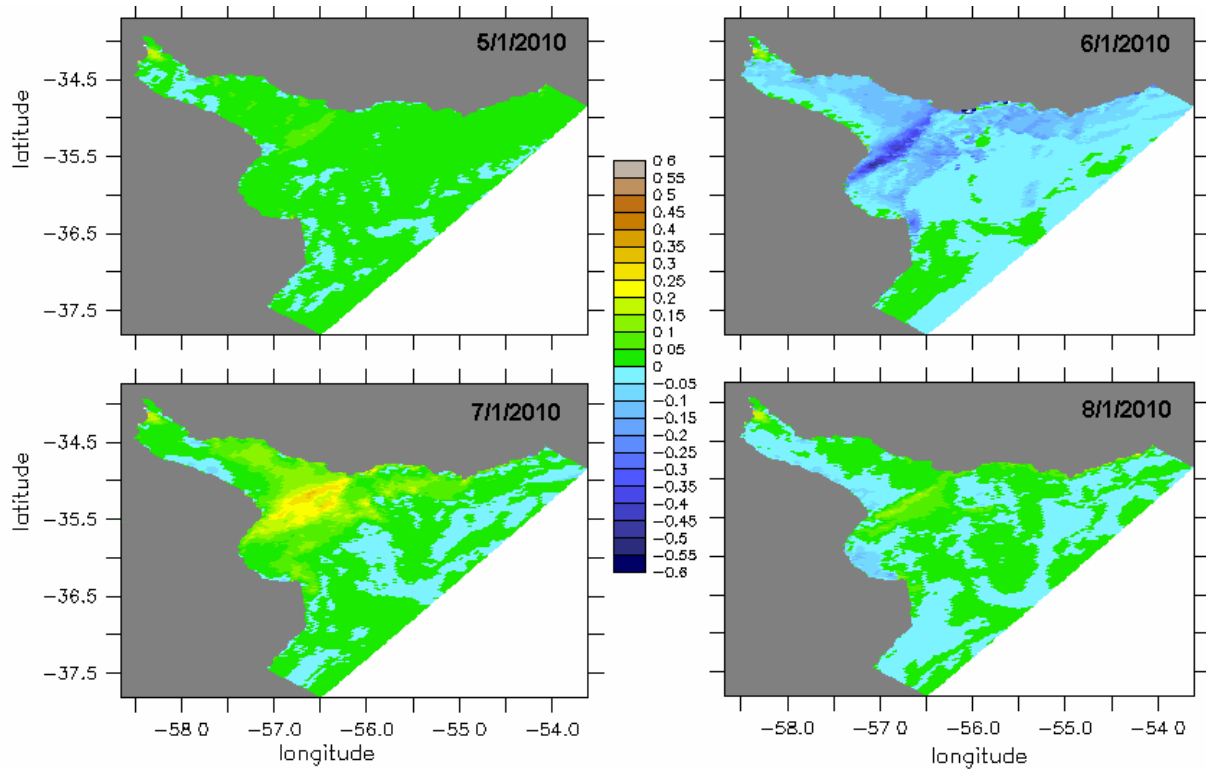


Figura 5.60: Distribución espacial de la variación diaria del espesor de sedimento de fondo (escala en cm) obtenida con el modelo para los días 5, 6, 7 y 8 de enero 2010.

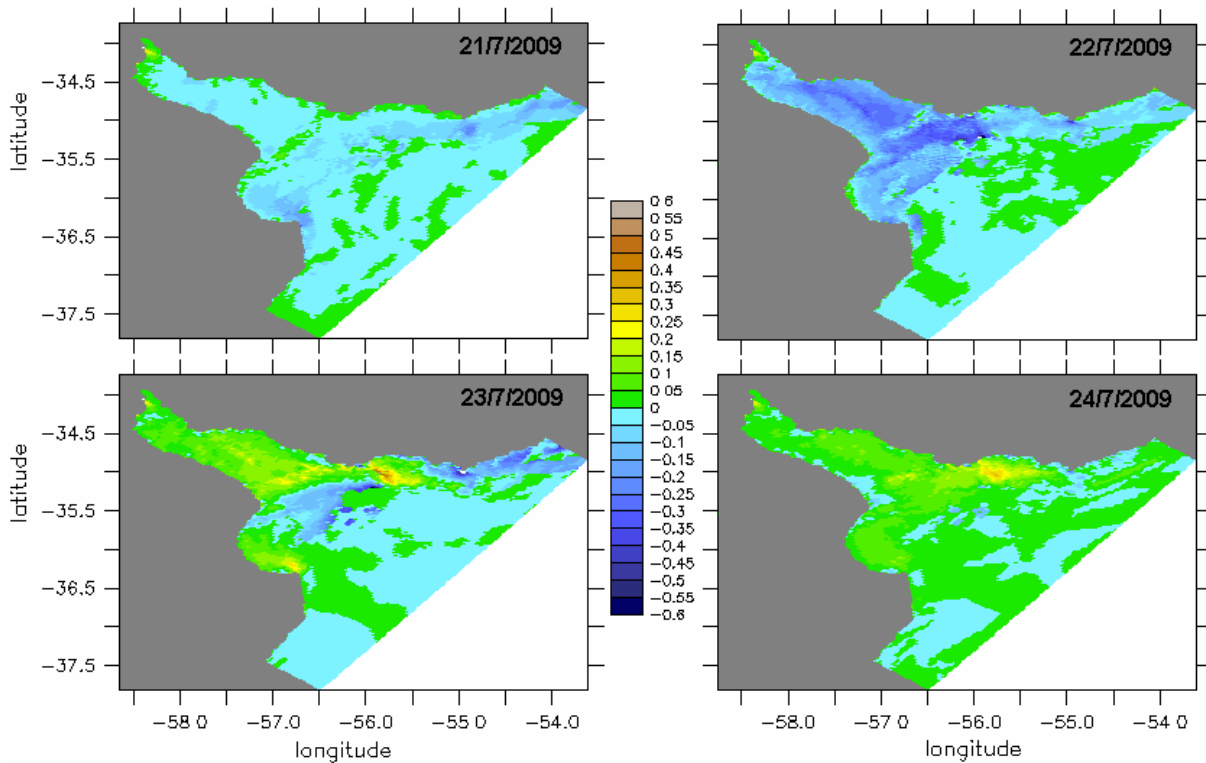


Figura 5.61: Distribución espacial de la variación diaria del espesor de sedimento de fondo (escala en cm) obtenida con el modelo para los días 21, 22, 23 y 24 de julio 2009.

Los patrones habituales correspondientes a períodos de calma mencionados anteriormente se ven alterados en situaciones de tormenta, durante las mismas y en los

días posteriores. A modo de ejemplo se presentan en la Figura 5.60 los campos espaciales de variación diaria del espesor de sedimento de fondo obtenidos para los días 5, 6, 7 y 8 de enero de 2010. El día 5 se observa un campo de variación diaria similar a los identificados anteriormente correspondiente a condiciones hidrodinámicas de marea. El día 6 en cambio ocurrió una tormenta y gran parte de la zona exterior (con mayor intensidad en la zona de transición) presenta erosión, es decir, una disminución del sedimento de fondo. El día 7 la tormenta ha finalizado y se observa una tendencia a la deposición en toda la zona exterior y gran parte de la zona intermedia del Río de la Plata. Este patrón es claramente diferente al obtenido en condiciones de calma hidrodinámica. El día 8 se observa continúa la tendencia a la deposición en la zona del frente, es decir, en la línea Punta Piedras-Montevideo.

En la Figura 5.61 se presenta otro ejemplo de variación diaria del sedimento de fondo debido a una tormenta (días 21 a 24 de julio de 2009). Se observa el día 22 ocurre una tormenta fuerte en toda la zona exterior del Río de la Plata y como consecuencia hay una erosión en gran parte de la zona, a diferencia de la variación leve del sedimento de fondo que se observa el día anterior. El día 23, posterior a la tormenta, el patrón de variación espacial de sedimento de fondo muestra una deposición en toda la zona interior e intermedia del Río de la Plata, y en el frente y gran parte de la zona exterior. El día 24 continúan los efectos de la tormenta y se observa un patrón espacial de deposición con mayores valores sobre la costa uruguaya.

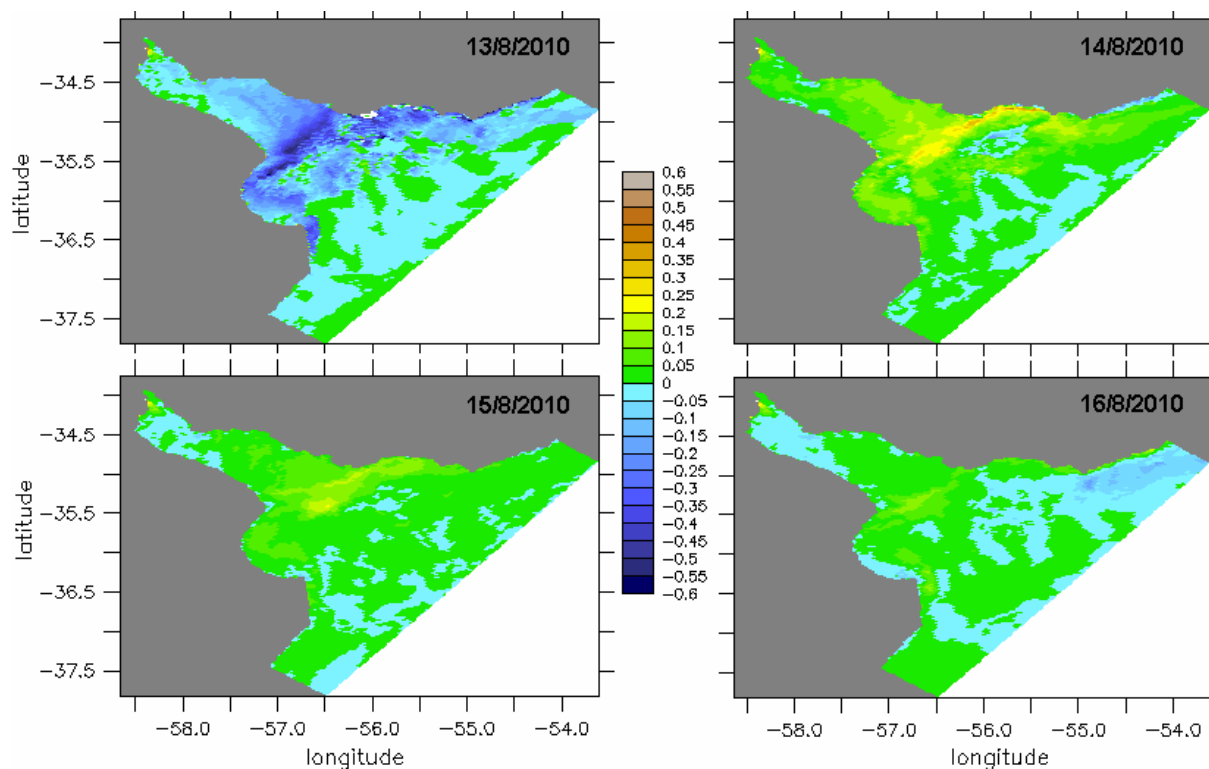


Figura 5.62: Distribución espacial de la variación diaria del espesor de sedimento de fondo (escala en cm) obtenida con el modelo para los días 13, 14, 15 y 16 de agosto 2010.

Por último se presenta en la Figura 5.62 la variación diaria del depósito de fondo obtenida para los días 13, 14, 15 y 16 de agosto 2010. El día 13 ocurrió una gran tormenta y en consecuencia se observa un patrón de erosión en todo el Río de la Plata. El día 14 se genera la deposición de todo ese material resuspendido durante la tormenta y se observa un patrón con mayores valores de deposición diaria en el frente y zona costera uruguaya hacia el exterior. El día 15 se continúa observando un patrón de deposición

predominante con mayores espesores en la zona del frente. El día 16 en algunas zonas se observa cierta erosión diaria producto del efecto de las mareas aunque en la zona central se continúa observando una deposición predominante.

A partir de la determinación de la variación de espesor del sedimento de fondo en cada celda del dominio de cálculo, durante los dos años de tiempo simulados, se calculan ciertos campos estadísticos de los mismos y se analiza su distribución espacial. Se calcularon los porcentajes de frecuencia asociados a diversos umbrales de incremento de espesor de fondo diario (deposición) y de disminución del espesor de fondo diario (erosión). Los umbrales definidos fueron entre -6 mm y 6 mm con una frecuencia de 1 mm. Por otro lado, se determinó para cada celda el valor máximo y el mínimo de la variación diaria de espesor de sedimento de fondo, y por tanto se obtuvo la máxima deposición y la máxima erosión diarias, en cada celda durante los dos años simulados.

Los resultados obtenidos para los umbrales de erosión máxima diaria de -2 mm y deposición máxima diaria de 2 mm se presentan en la Figura 5.63. En relación a la deposición estos resultados muestran que en la zona de desembocadura de los tributarios siempre hay una deposición. Por otra parte en la zona interior prevalecen porcentajes elevados de decrecimiento diario del espesor de fondo, correspondiente a una erosión, principalmente sobre la costa uruguaya en la zona cercana a Colonia. En la zona intermedia los mayores porcentajes se asocian a deposición pero se observan también porcentajes de hasta un 20 % asociados a la erosión. En la zona intermedia hacia el exterior se observan variaciones diarias positivas que predominan en la costa uruguaya pero en ciertas ocasiones ocurre erosión. Lo inverso sucede en la variación del espesor de fondo sobre la costa argentina en Punta Piedras. En el exterior del Río de la Plata se observa principalmente prevalece la deposición diaria, principalmente en las zonas más bajas (costa uruguaya y Bahía de Samborombón), con porcentajes bajos de eventos diarios de erosión, asociados principalmente a las tormentas.

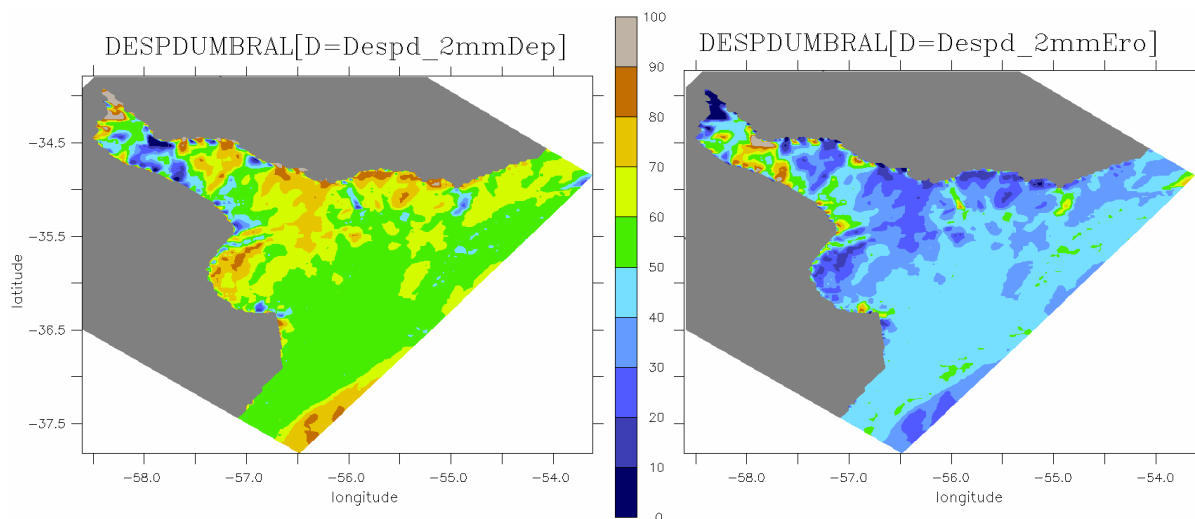


Figura 5.63: Distribución espacial del porcentaje de frecuencia asociado a una variación diaria del espesor de sedimento positiva menor a 2 mm (panel izquierdo) y negativa mayor a -2 mm (panel derecho) para el período de simulación 2009-2010.

Las distribuciones espaciales del porcentaje de frecuencia de ocurrencia asociadas a los restantes umbrales negativos considerados (erosión) y positivos (deposición) presentaron muy leves variaciones en relación al caso presentado. Esto se debe a que las situaciones más frecuentes son las correspondientes a los valores más bajos de variación del espesor del sedimento de fondo y el umbral mínimo de 2 mm las incluye. Claramente

los casos extremos que generan mayores variaciones son muy poco frecuentes y casi no generan variación en los porcentajes de frecuencia de ocurrencia. Debido a esto se calcula la distribución espacial de la mayor variación diaria del espesor del sedimento de fondo, negativa para analizar erosión y positiva para analizar deposición, obtenida con el modelo durante los dos años simulados (Figura 5.64). Estos valores representan las distribuciones asociadas a la erosión que ocurre durante las tormentas y a la deposición que ocurre una vez ocurridas las mismas, según el análisis detallado realizado anteriormente de la variación diaria del espesor de fondo. Los resultados obtenidos muestran que las mayores erosiones diarias y las mayores deposiciones diarias ocurren ambas en la zona de transición entre la región intermedia y exterior del Río de la Plata, y se extiende incluso sobre la costa uruguaya y el Canal Oriental sobre el exterior y parte de la Bahía de Samborombón. Se observa las mayores deposiciones se ubican levemente hacia el exterior en relación a la zona de erosión del frente. No obstante se destacan las mayores erosiones hacia el oeste de Montevideo y en Punta del Este, mientras que las mayores deposiciones diarias se observan hacia el exterior de la zona del frente y sobre el Canal Oriental al norte del Banco Inglés.

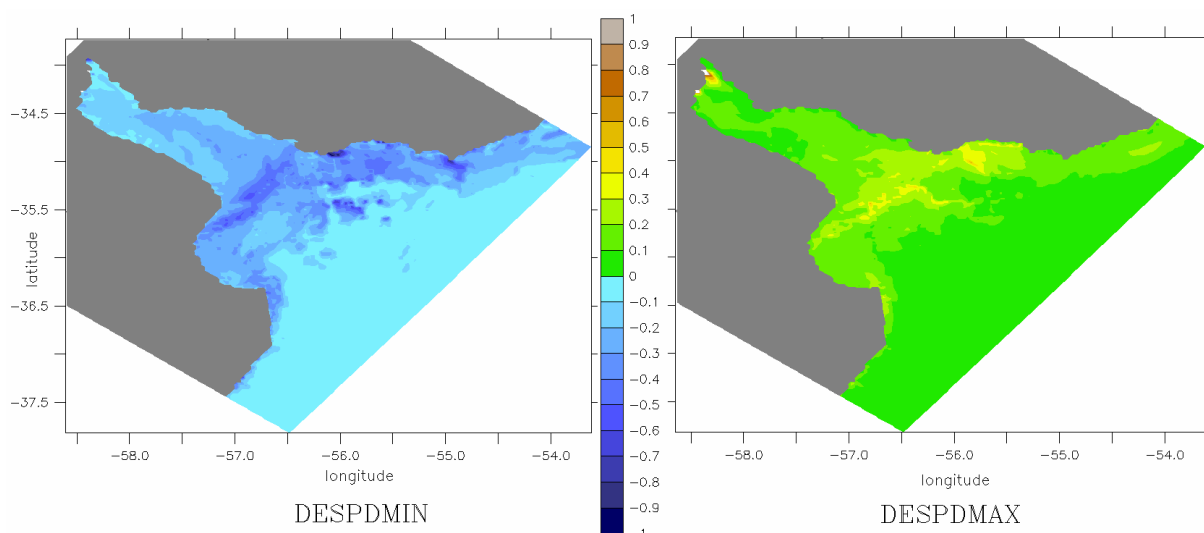


Figura 5.64: Distribución espacial de la variación diaria del espesor de sedimento de fondo mínima (panel izquierdo) y máxima (panel derecho) obtenida con el modelo durante el período 2009-2010. Escala en cm.

5.2.4.3. Síntesis

Los patrones analizados de variación mensual del depósito de fondo obtenidos con el modelo para el período simulado 2009-2010 muestran básicamente cierta variabilidad en la tendencia neta de evolución del fondo principalmente en la zona intermedia inferior y exterior del Río de la Plata. Esto se debe a las variaciones mensuales de las tensiones de corte asociadas a las tormentas y a las variaciones en el patrón espacial del campo salino, asociado principalmente a la ubicación del frente. No obstante, el patrón de deposición principal en el mes dependerá de las características hidrodinámicas (corrientes y salinidad) en los instantes posteriores a los eventos de tormenta, donde ocurren las máximas erosiones y por tanto la mayor puesta en resuspensión de material. Como se observó en secciones anteriores la cantidad de sedimento en suspensión se incrementa muchísimo, respecto a las situaciones de calma, durante las tormentas debido a la mayor escala espacial y a la mayor duración, en relación a las corrientes de marea. La forma que dicho material deposita (dónde) es lo que determina el patrón de variación espacial del fondo. Los casos presentados muestran una tendencia a mayor

deposición de material post tormenta en la zona del frente (transición entre el Río de la Plata intermedio y la zona exterior). En algunos casos se observa también mayor deposición en la zona costera exterior uruguaya o en la zona de Samborombón sobre la costa argentina. Estos patrones que se observan en las variaciones diarias del espesor de fondo responden a las plumas de sedimento en suspensión máximas mensuales analizadas en las secciones anteriores.

5.2.5. Dinámica durante condiciones de calma y tormentas

Los resultados presentados muestran que una de las principales características de la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata es la existencia de dos dinámicas bien diferentes según ocurran o no tormentas generadas por viento en la zona. En períodos donde no hay tormentas la dinámica es gobernada por las corrientes de marea, y cuando ocurren las tormentas la dinámica es gobernada por ambos forzantes, corrientes de marea y oleaje. Por otra parte, se ha observado una gran variabilidad de la dinámica de sedimentos finos entre los períodos de calma y tormentas en la zona del frente, es decir, entre la transición de la zona intermedia y la zona exterior del Río de la Plata. Las características físicas de la misma, es decir, la expansión de la sección, y la variación batimétrica, generan que sea una zona de características particulares desde el punto de vista hidrodinámico, físico-químico y también sedimentológico. Según los resultados anteriormente presentados en ésta zona se da una disminución importante de la concentración de sedimento en suspensión durante períodos de calma, lo que se denomina frente de turbidez. Además, durante los períodos de tormenta se observan valores altos de concentración en la zona y por tanto se produce una extensión del frente de turbidez hacia la zona exterior.

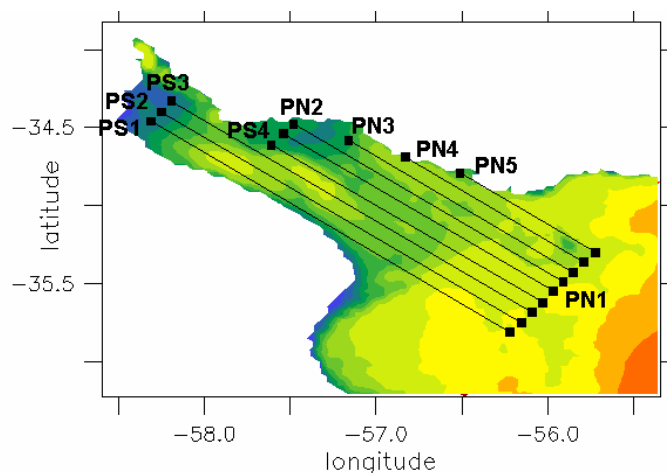


Figura 5.65: Ubicación de las 9 secciones definidas para analizar la variación longitudinal de la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata.

Con el objetivo de aportar más elementos a la caracterización realizada en este capítulo se seleccionaron diversos períodos de tiempo (días) asociados a tormentas y a períodos de calma. Para cada uno de los subperíodos se calcularon todos los campos relevantes para entender la dinámica, los patrones medios de concentración de sedimento en suspensión en la capa de fondo y en la capa de superficie, los patrones medios de salinidad en fondo y superficie, y la estratificación media y máxima asociada, el flujo residual en ambas capas, la variación en el espesor del sedimento de fondo, y la tensión de corte total ejercida sobre el fondo. La estratificación del campo salino en cada celda se define como la diferencia entre la salinidad en la capa más cercana al fondo y la salinidad en la capa superficial. Además, con el objetivo de analizar cómo es la dinámica de sedimentos finos a lo largo del eje del Río de la Plata y en el frente de turbidez, se

calcularon los perfiles promedio de concentración de sedimento en suspensión, salinidad y de las corrientes (obteniendo el flujo residual), en las secciones longitudinales que se presentan en la Figura 5.65. Se definieron a lo largo de la sección transversal del frente 9 secciones longitudinales que abarcan la zona interior, intermedia y exterior.

En términos generales los resultados obtenidos para cada subperíodo analizado muestran diversos patrones aunque es posible identificar comportamientos comunes, tanto en los períodos de calma como en los períodos de tormenta, los cuales se presentan a continuación.

5.2.5.1. Condiciones de calma

En primer lugar se presentan los patrones medios asociados a dos situaciones de calma seleccionadas de los subperíodos de tiempo analizados, el período comprendido entre el 1° y el 7 de febrero de 2010 y el período comprendido entre el 17 y el 23 de agosto de 2010. En la Figura 5.66 se muestra la distribución espacial del campo medio de vientos de cada período de calma seleccionado; se observan los vientos para el período de agosto son levemente más intensos, aunque en ambos casos las intensidades medias del viento es menor a los 6 m/s en todo el Río de la Plata y la dirección predominante de los mismos es desde el sector Noreste en ambos casos.

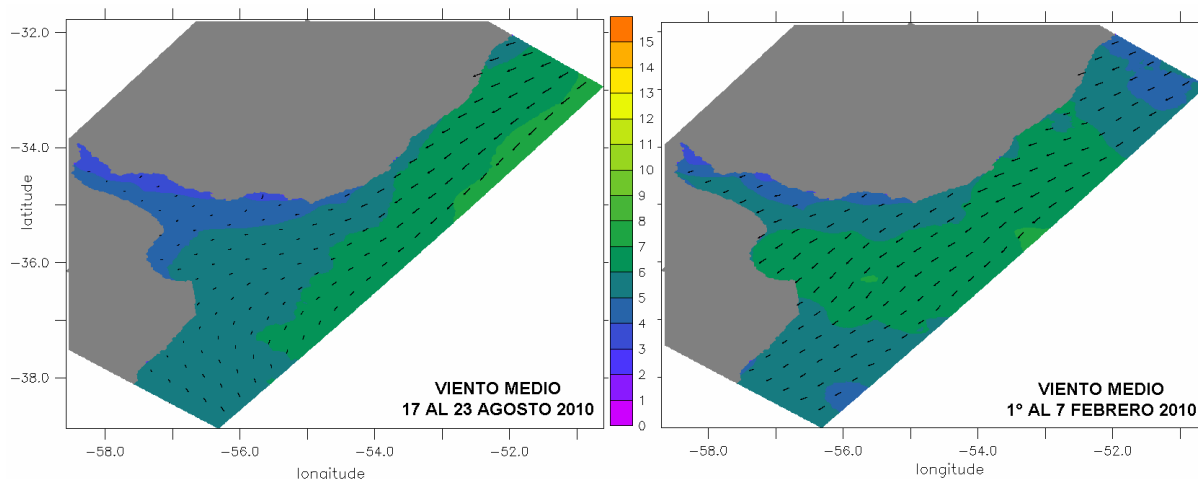


Figura 5.66: Campo medio espacial de la intensidad (m/s) y dirección del viento de los períodos de calma de agosto 2010 (panel izquierdo) y febrero 2010 (panel derecho).

Los resultados obtenidos para el período de calma seleccionado de febrero 2010 se presentan en la Figura 5.67. Se observa en primer lugar el patrón medio de tensiones de corte de fondo corresponde principalmente al patrón generado por las corrientes de marea en la zona, con tensiones máximas en la zona intermedia sobre la costa argentina. La variación del espesor del sedimento de fondo muestra que durante éste período la deposición fue predominante en la mayor parte del área, siendo mayor en la zona del frente, Bahía de Samborombón y sobre la margen norte del Río de la Plata intermedio. El campo de salinidad muestra un patrón medio de salinidad de fondo estable, consistente con la variación batimétrica, que ingresa al Río de la Plata hasta el frente con valores altos de 20 ppm en la costa de Montevideo; la salinidad en superficie en cambio muestra una mayor extensión y por tanto menores gradientes en la zona exterior con una pluma de descarga de agua dulce sobre la costa uruguaya. Coherente con estas observaciones los campos medios y máximos de estratificación muestran que los máximos valores ocurren sobre la zona de descarga contra la costa uruguaya de la zona exterior, aunque también en la zona central del exterior del Río de la Plata la estratificación es alta.

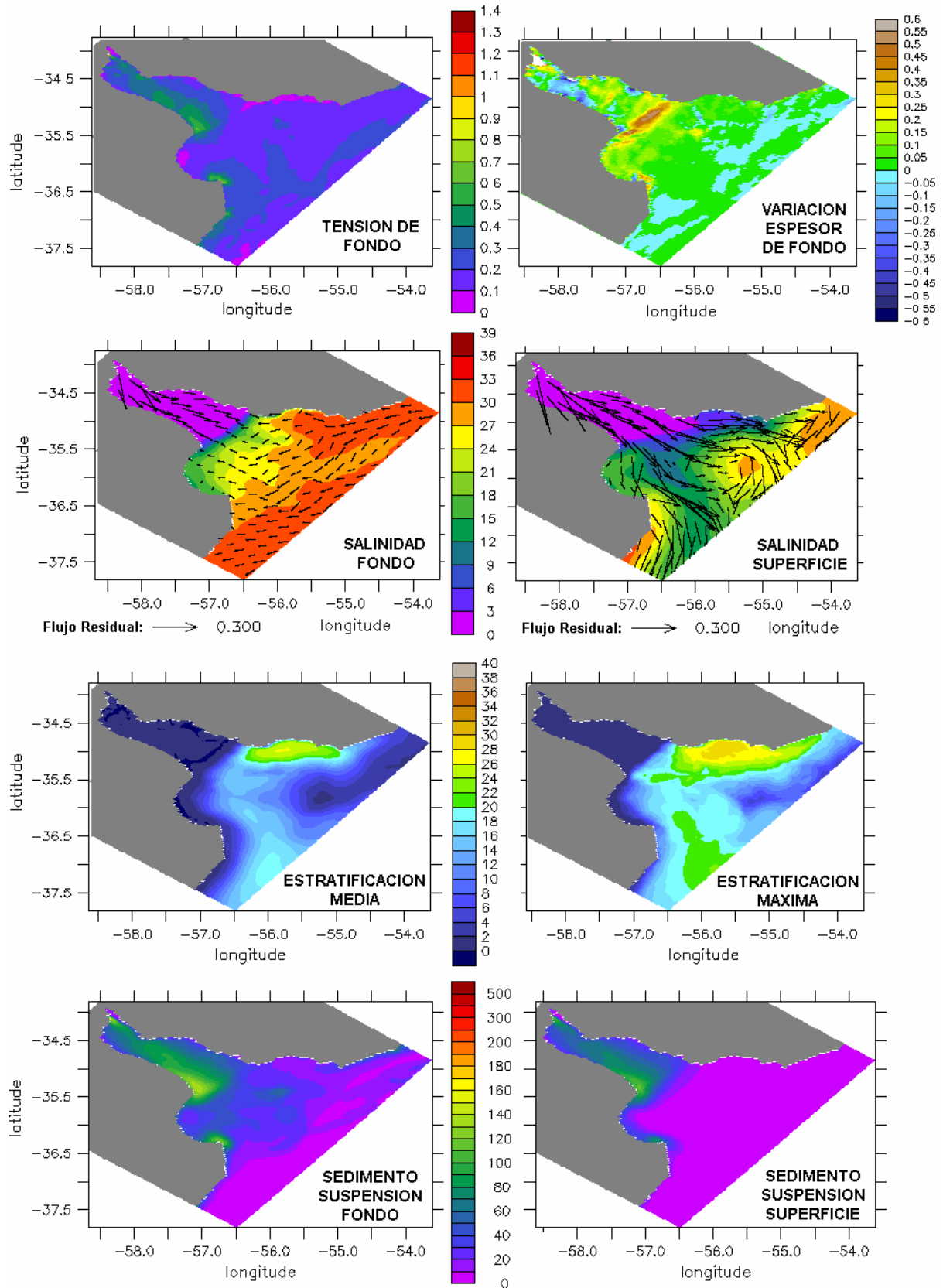


Figura 5.67: Caracterización del período de calma comprendido entre el 1° y el 7 de febrero 2010.

Campos espaciales medios de tensión de corte total de fondo (N/m^2); salinidad (ppm) y flujo residual en fondo y superficie, estratificación (diferencia entre salinidad fondo y superficie), concentración (mg/l) de sedimento en suspensión en superficie y en fondo. Campo máximo de la estratificación salina y variación (cm) del espesor del sedimento de fondo durante el período.

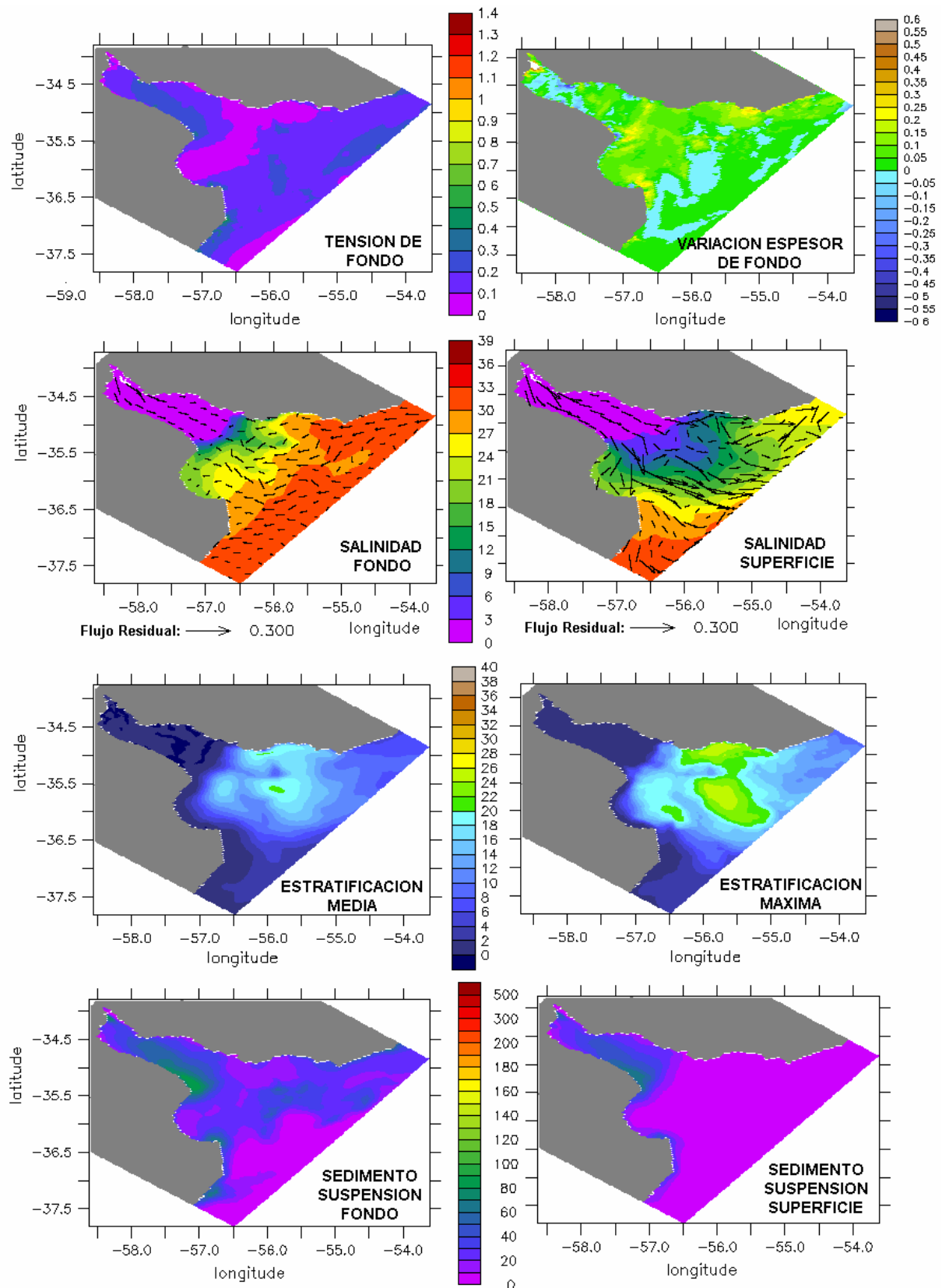


Figura 5.68: Caracterización del período de calma comprendido entre el 17 y el 23 de agosto 2010.

Campos espaciales medios de tensión de corte total de fondo (N/m^2); salinidad (ppm) y flujo residual en fondo y superficie, estratificación (diferencia entre salinidad fondo y superficie), concentración (mg/l) de sedimento en suspensión en superficie y en fondo. Campo máximo de la estratificación salina y variación (cm) del espesor del sedimento de fondo durante el período.

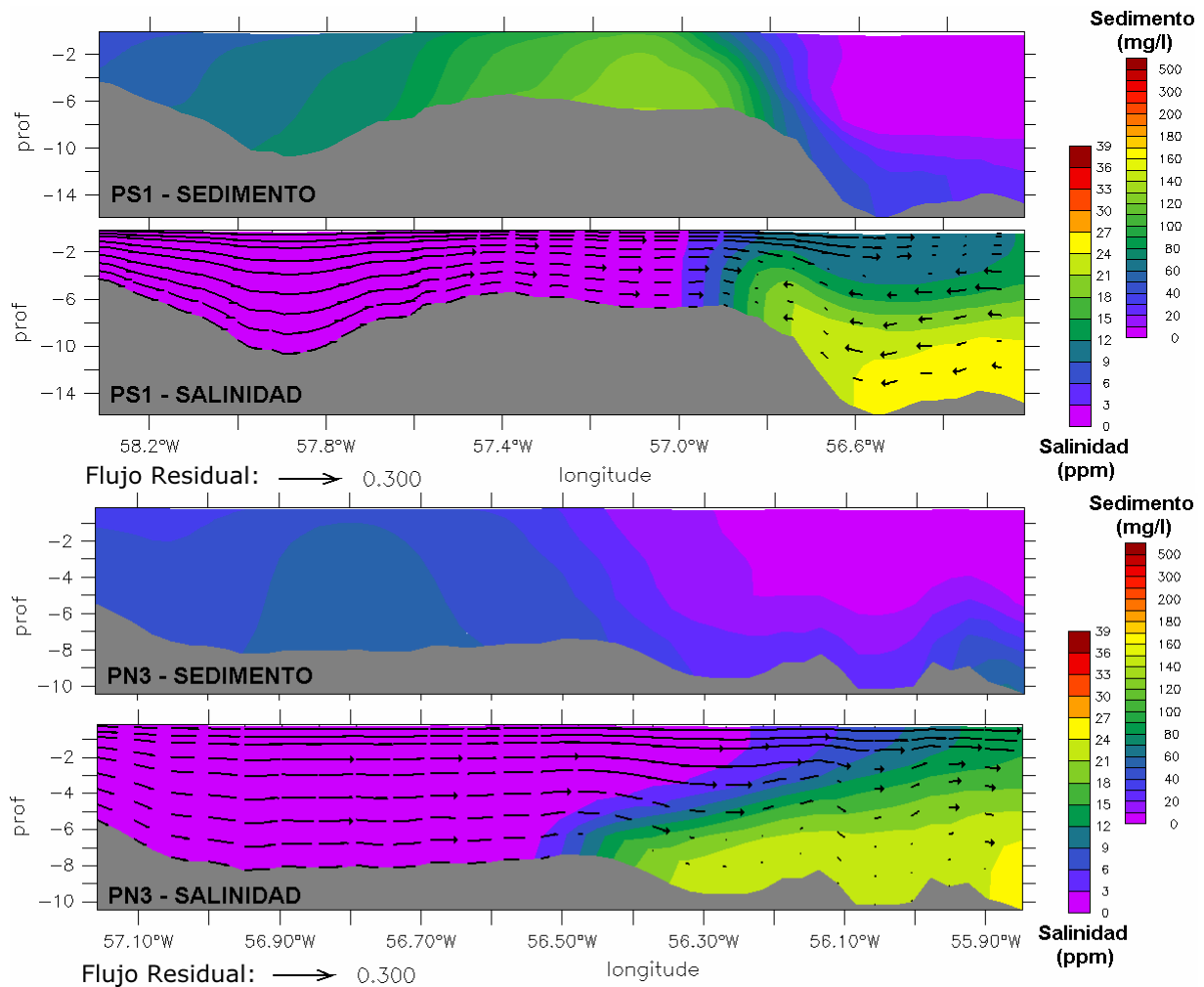


Figura 5.69: Perfiles verticales medios de concentración de sedimento, salinidad y flujo residual durante el período de calma comprendido entre el 1° y el 7 de febrero 2010 en las secciones longitudinales PS1 y PN3. Escala vertical correspondiente a la profundidad (m).

El flujo residual de marea muestra una circulación gravitacional en toda la zona exterior (en el fondo el flujo es predominantemente entrante al Río de la Plata y en superficie principalmente saliente) y el flujo de descarga en la zona intermedia. Los patrones medios de concentración de sedimento en suspensión en fondo y superficie muestran valores muy similares en la zona interior e intermedia, con un gradiente creciente desde la costa uruguaya hacia la margen argentina, y desde el interior hacia el frente. Sobre el fondo en la zona exterior se observan concentraciones bajas pero en el resto de la columna de agua durante períodos de calma no se observa sedimento en suspensión, salvo sobre la costa argentina en este caso. En consecuencia se observa una pluma superficial de sedimento que alcanza la zona del frente en donde la concentración disminuye pues la marea no genera una permanente resuspensión.

Los resultados obtenidos para el período de calma seleccionado del mes de agosto se presentan en la Figura 5.68. Se observan tensiones de corte de fondo concentradas en la zona intermedia del Río de la Plata; menores respecto a las observadas del período de calma anterior. La variación del espesor de fondo muestra que ocurrió una deposición de material en toda la zona exterior con mayor acumulación en la zona del frente. El campo salino medio de fondo muestra un fuerte ingreso de salinidad desde el Océano y en cambio el campo salino de superficie muestra una gran extensión producto de la descarga fluvial. La estratificación en consecuencia es alta en prácticamente toda la zona

exterior del Río de la Plata salvo en la zona costera de Samborombón. El flujo residual de marea es similar al del período anterior característico de una zona estuarina con un campo salino estratificado. El sedimento en suspensión muestra concentraciones bajas en fondo y en superficie, con valores similares en la zona interior e intermedia, con diferencias en la zona exterior donde en el fondo se observan concentraciones bajas de base mientras que en el resto de la columna de agua prácticamente no hay sedimento.

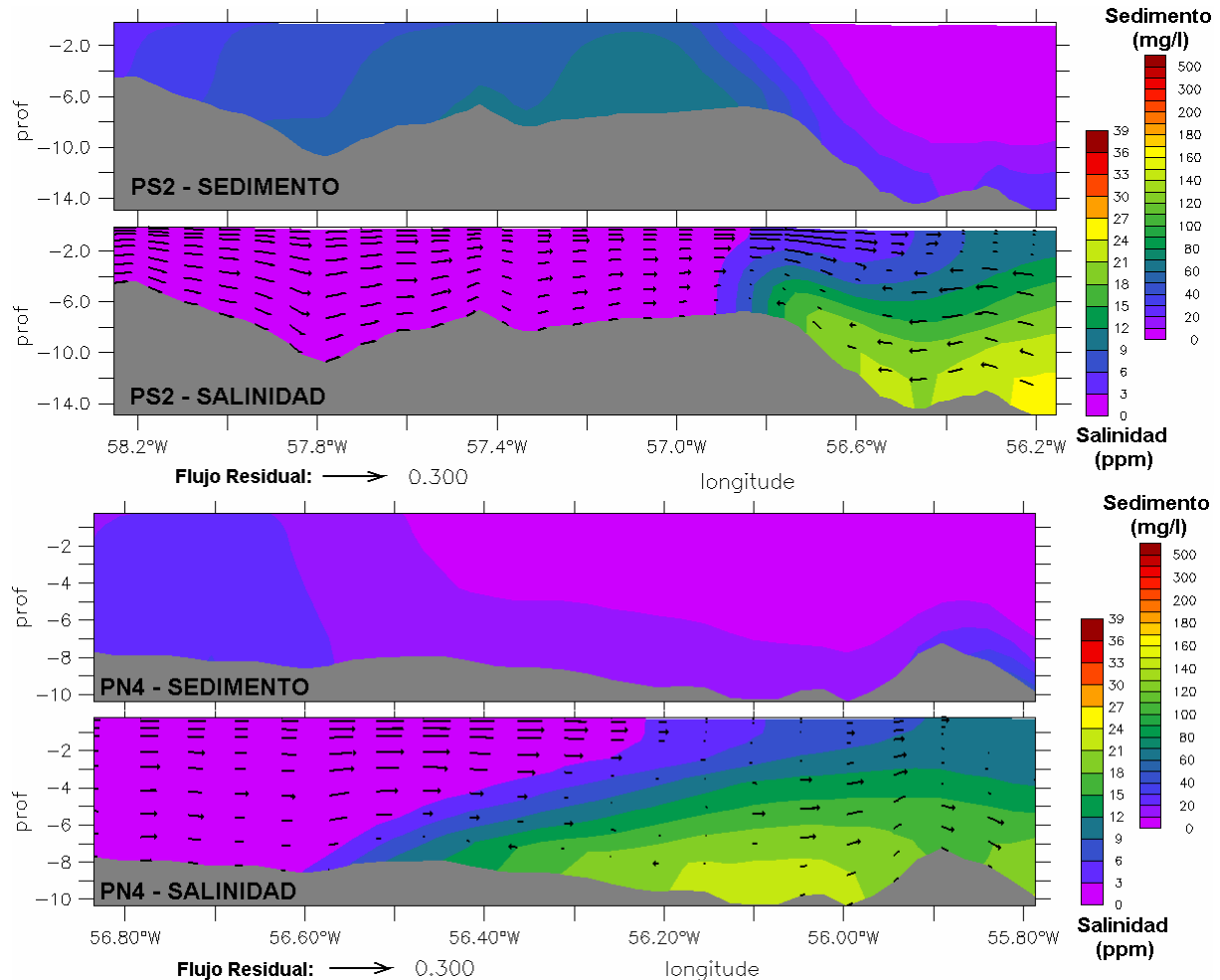


Figura 5.70: Perfiles verticales medios de concentración de sedimento, salinidad y flujo residual durante el período de calma comprendido entre el 17 y el 23 de agosto 2010 en las secciones longitudinales PS2 y PN4. Escala vertical correspondiente a la profundidad (m).

En la Figura 5.69 se presentan a modo de ejemplo los perfiles promedio en PS1 y PN3 durante el período de calma de febrero 2010, de la concentración de sedimento en suspensión, la salinidad y el flujo residual. En la Figura 5.70 se presentan a modo de ejemplo los perfiles promedio en PS2 y PN4 durante el período de calma de agosto 2010, de la concentración de sedimento en suspensión, la salinidad y el flujo residual. Se observa en ambos casos perfiles del campo salino, y flujo residual asociado, característicos de un estuario estratificado, con un ingreso de agua salada por el fondo y una salida de agua dulce por la capa superior. No obstante hay cierta variación en la sección transversal del Río de la Plata. En la zona sur se observa un frente salino marcado, favorecido por la diferencia de batimetría entre la zona intermedia y exterior, mientras que a medida que la sección se ubica hacia el norte el perfil de salinidad vertical es gradual indicando una mayor mezcla vertical y un ingreso paulatino del campo salino desde el Océano favorecido por un gradiente más suave de la cota de fondo.

En relación a la concentración de sedimento en suspensión se observa el frente de turbidez en todas las secciones presentadas, dado por la disminución de concentración desde el interior hacia el exterior. En todas las secciones se observa un comportamiento similar, con mayores concentraciones en la zona intermedia. Además, se observan mayores concentraciones en los perfiles sobre la costa argentina que en los perfiles ubicados hacia la costa norte del Río de la Plata.

5.2.5.2. Condiciones de tormenta

Cuando ocurren tormentas en el Río de la Plata la dinámica del sedimento en suspensión varía considerablemente respecto a la situación sin tormentas. Básicamente el oleaje generado por los fuertes vientos produce una gran resuspensión de material de fondo tanto en la zona exterior como en la zona intermedia e interior, incrementando considerablemente la cantidad de material puesto en suspensión, y generando erosión en zonas de mayor extensión en relación a lo que ocurre durante los períodos de calma. El efecto de las tormentas sobre la dinámica es directamente proporcional a la intensidad (vientos y altura de ola) y a la duración de la misma.

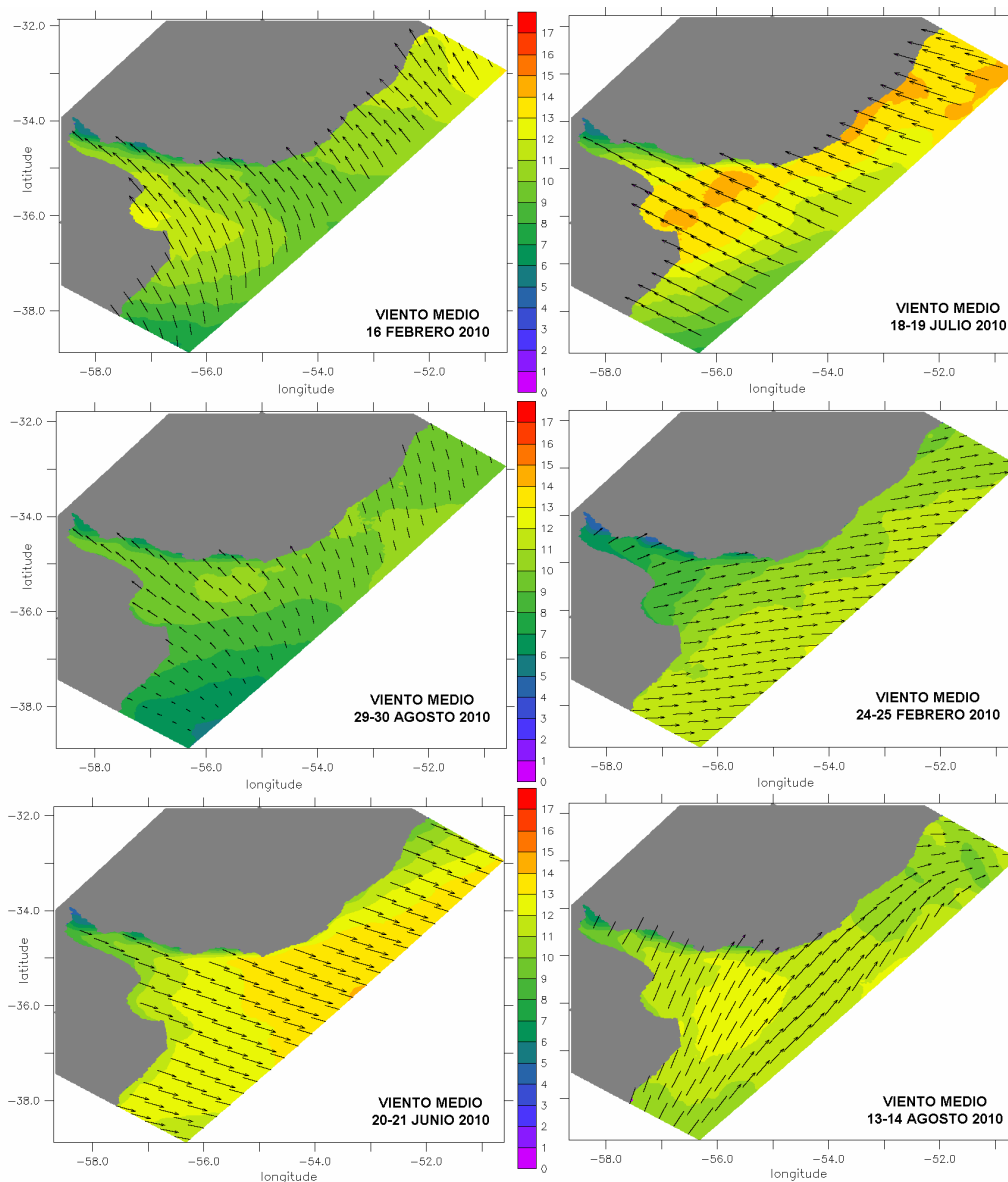


Figura 5.71: Campos medios espaciales de la intensidad (m/s) y dirección del viento de los 6 períodos de tormenta seleccionados.

Para ejemplificar las diversas características de la dinámica de sedimentos durante las tormentas se seleccionaron 6 ejemplos de tormentas diferentes, las cuales corresponden a los días 16/2/2010; 18-19/7/2010; 29-30/8/2010; 24-25/2/2010; 20-21/6/2010 y 13-14/8/2010. En la Figura 5.71 se presenta el campo medio de los vientos ocurridos durante las tormentas seleccionadas. Se observa que las tres primeras corresponden a tormentas generadas por vientos provenientes del sector SE principalmente, las dos siguientes corresponden a tormentas con vientos predominantes del sector NNW-W, y la última tormenta corresponde a vientos predominantes del sector SSW. Se observan en todos los casos intensidades medias de viento entre 11 y 14 m/s en la zona del Río de la Plata.

En las Figuras 5.72, 5.73 y 5.74 se presentan los resultados obtenidos para las tres tormentas del tipo Sudestadas (generadas por vientos del SE) en la región. A pesar de que hay diferencia en los resultados en función de la intensidad de cada tormenta es posible determinar patrones comunes asociados a las mismas. Se observa el patrón espacial de tensiones de corte de fondo característico de las tormentas, durante las cuales en todo el Río de la Plata las tensiones son elevadas, con variaciones según la intensidad de cada tormenta. La variación del espesor de fondo muestra principalmente una disminución del mismo producto de la erosión generada por las tormentas y las zonas de mayor erosión corresponden directamente con las zonas de mayor tensión de corte de fondo. En relación al campo de salinidad se observan diferencias según cada tormenta pero en los tres casos el campo salino presenta un ingreso de agua salada desde el Océano, principalmente por la costa Norte. Se observa un flujo residual más intenso en relación al de las situaciones de calma. La estratificación muestra valores medios en general en varias zonas del Río de la Plata, menores a los obtenidos en las situaciones de calma.

La distribución espacial media de sedimento en suspensión presenta características diferentes en la zona interior e intermedia, respecto a las de la zona exterior. En el fondo se observan valores altos de concentración en todo el Río de la Plata, con valores máximos en la zona del frente, en Punta Piedras, Samborombón y en la zona central sobre los Bancos Inglés y Arquímedes, aunque evidentemente los mismos dependen directamente de la intensidad de la tormenta. En la superficie la pluma de sedimento en suspensión se extiende en la zona interior e intermedia, hasta la zona de Barra del Indio y se extiende por la zona costera de la Bahía de Samborombón hacia el Sur; las mayores concentraciones se encuentran en la parte de la pluma ubicada en ésta zona exterior. En la zona interior e intermedia no se observan diferencias en el patrón de sedimento en suspensión en la columna de agua, salvo una estratificación leve dada por la sedimentación vertical. Además se observa un gradiente creciente de concentración desde la zona del interior hacia el frente y desde la costa norte a la costa sur del Río de la Plata. Se mantiene en ésta zona interior e intermedia el patrón de distribución espacial de sedimento en suspensión observado durante los períodos de calma. Los perfiles medios de concentración de sedimento en suspensión, salinidad y flujo residual, presentados en la Figura 5.75 para la tormenta del 16 de febrero 2010 y en la Figura 5.76 para la tormenta del 29-30 de agosto 2010, complementan éstos resultados.

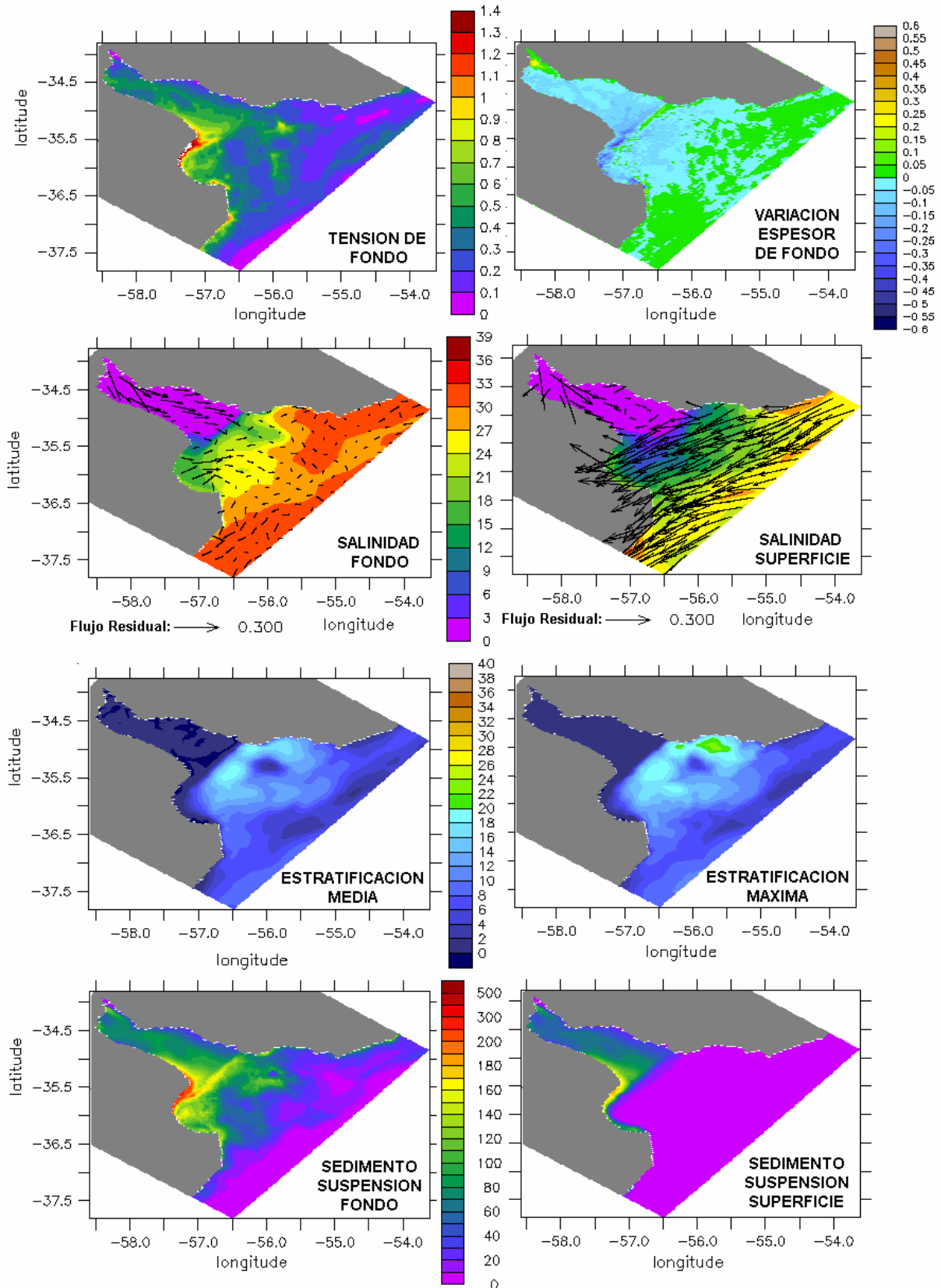


Figura 5.72: Caracterización del período de tormenta del SE del 16/2/2010. Campos espaciales medios de tensión de corte total de fondo (N/m^2); salinidad (ppm) y flujo residual en fondo y superficie, estratificación (diferencia entre salinidad fondo y superficie), concentración (mg/l) de sedimento en suspensión en superficie y en fondo. Campo máximo de la estratificación salina y variación (cm) del espesor del sedimento de fondo durante el período.

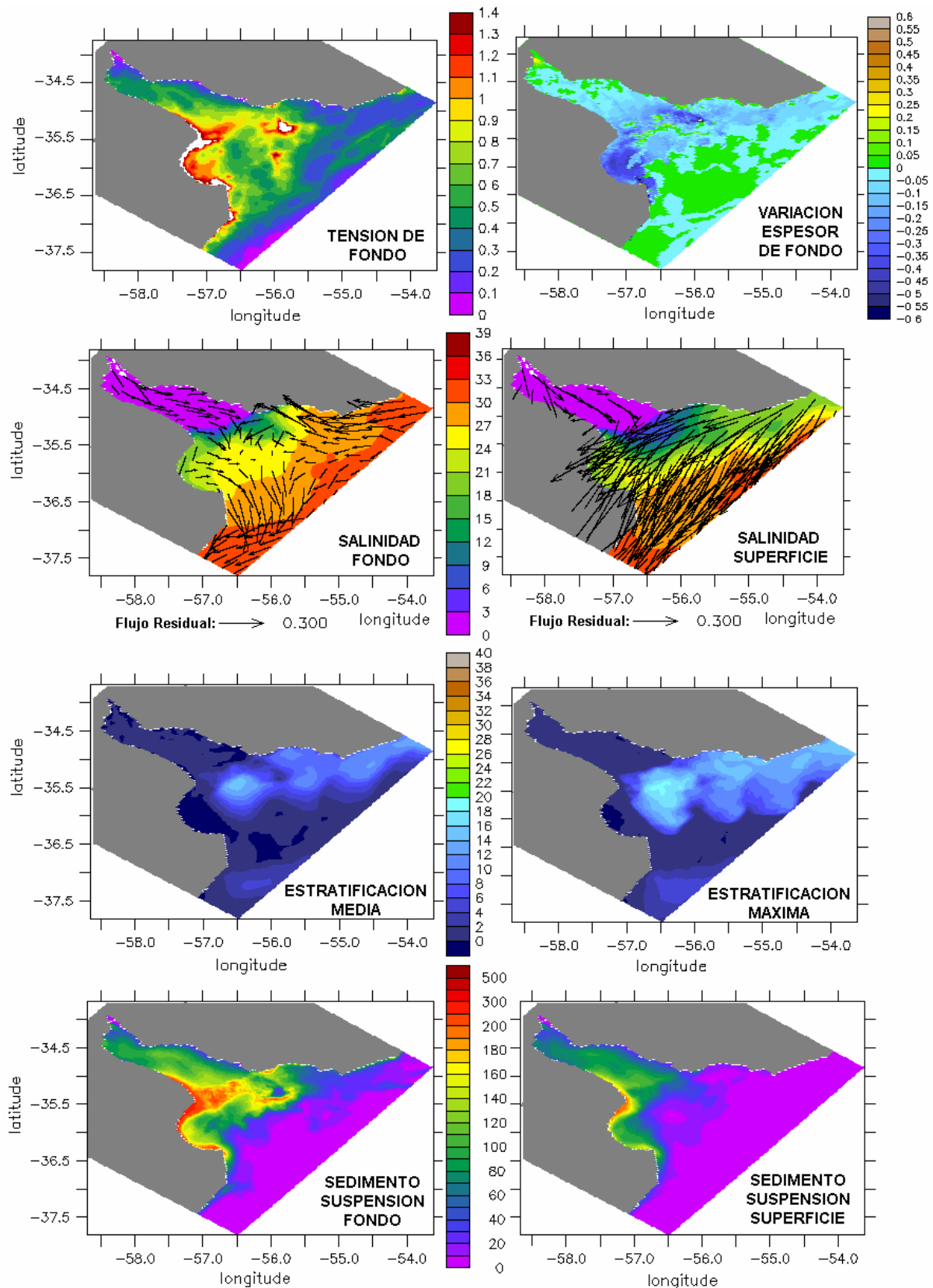


Figura 5.73: Caracterización del período de tormenta del SE del 18-19/7/2010. Campos espaciales medios de tensión de corte total de fondo (N/m^2); salinidad (ppm) y flujo residual en fondo y superficie, estratificación (diferencia entre salinidad fondo y superficie), concentración (mg/l) de sedimento en suspensión en superficie y en fondo. Campo máximo de la estratificación salina y variación (cm) del espesor del sedimento de fondo durante el período.

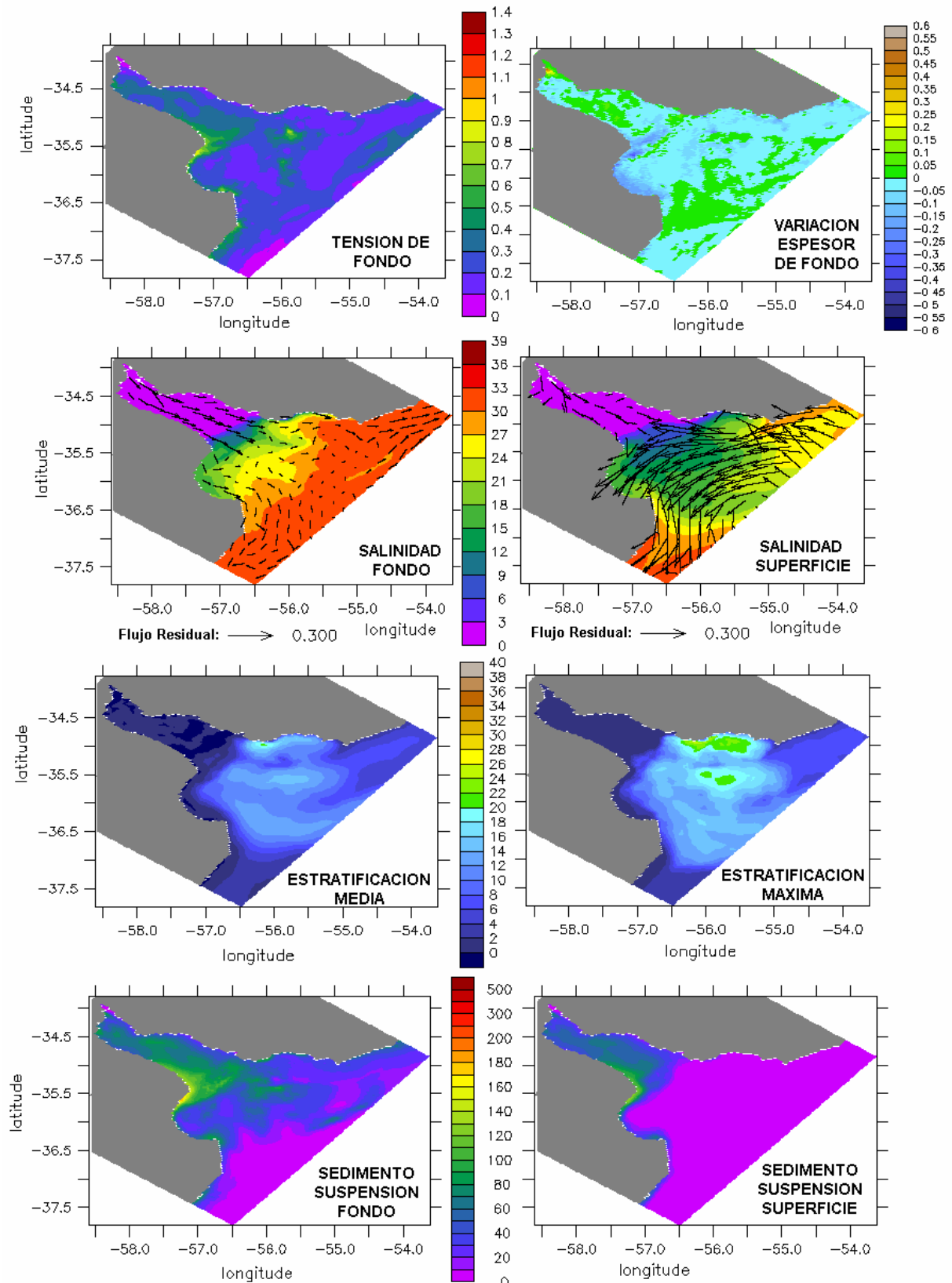


Figura 5.74: Caracterización del período de tormenta del SE del 29-30/8/2010. Campos espaciales medios de tensión de corte total de fondo (N/m^2); salinidad (ppm) y flujo residual en fondo y superficie, estratificación (diferencia entre salinidad fondo y superficie), concentración (mg/l) de sedimento en suspensión en superficie y en fondo. Campo máximo de la estratificación salina y variación (cm) del espesor del sedimento de fondo durante el período.

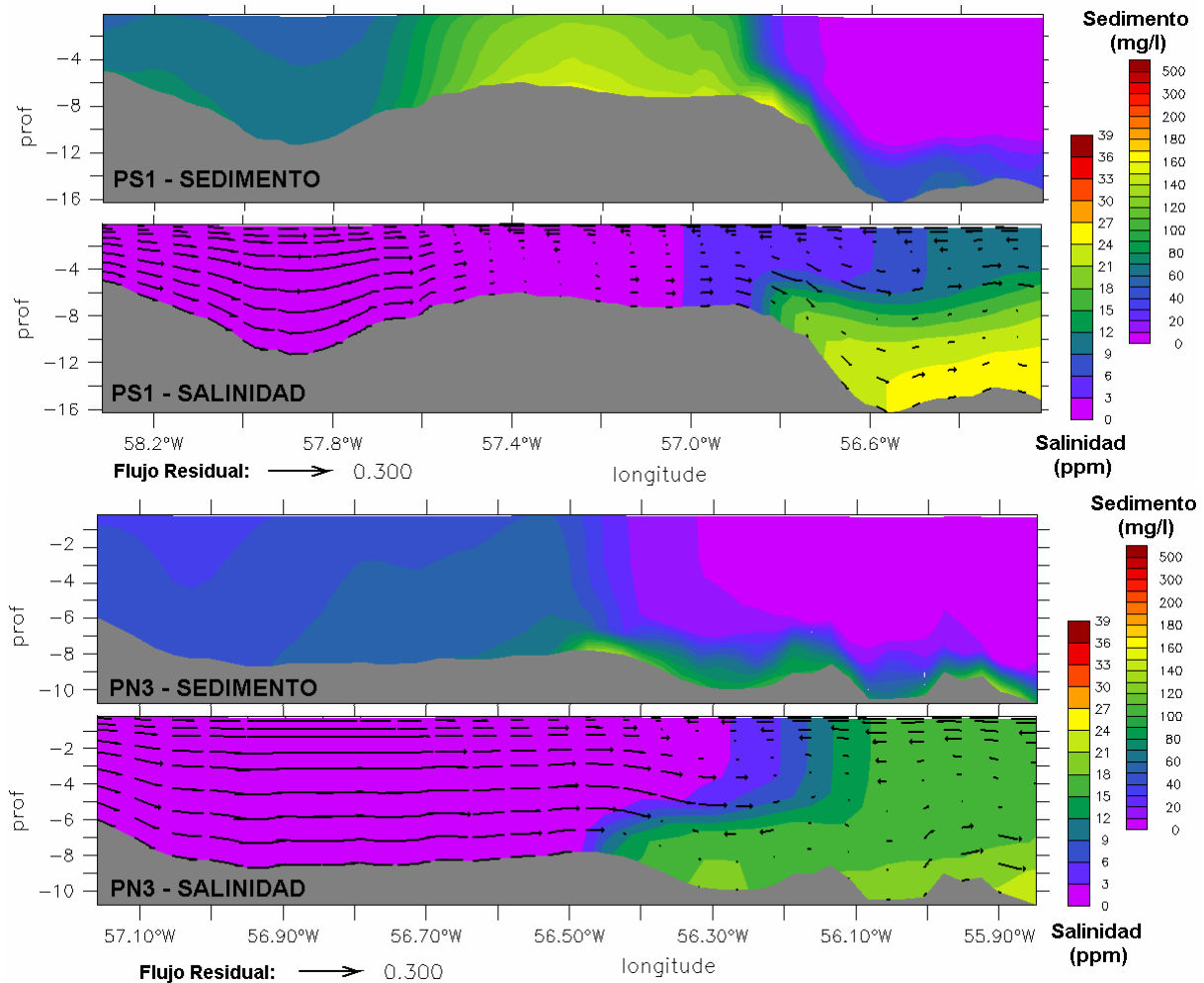


Figura 5.75: Perfiles verticales medios de concentración de sedimento, salinidad y flujo residual durante la tormenta del SE del 16 de febrero de 2010 en las secciones longitudinales PS1 y PN3. Escala vertical correspondiente a la profundidad (m).

En los perfiles ubicados hacia la costa argentina se observa que durante las tormentas hay un incremento de concentración de sedimento en suspensión (respecto a las situaciones de calma) en la zona intermedia en todo el perfil, y sobre el fondo en la zona del frente donde comienza el descenso del nivel del fondo, producto de la resuspensión por el oleaje y por la descarga de sedimento por el fondo desde la zona intermedia. Esto último se debe al patrón de flujo residual inverso que se observa durante las tormentas (inverso en relación al que se encuentra en situaciones de calma), con un ingreso (hacia el interior) neto por las capas superiores, y una salida (hacia el Océano) por las capas inferiores. El campo salino presenta cierta estratificación en la vertical y los sedimentos presentan el mismo comportamiento en la zona exterior del perfil. En los perfiles ubicados hacia la costa norte se observa nuevamente un perfil de salinidad con menor nivel de estratificación, y un flujo residual invertido producto de los fuertes vientos del SE. La variación longitudinal de la concentración de sedimento en suspensión muestra picos de concentración en el fondo en la zona del frente y exterior del perfil, con mezcla en la columna de agua en la zona intermedia donde no hay salinidad y estratificación en la zona del frente y exterior donde el campo salino está estratificado.

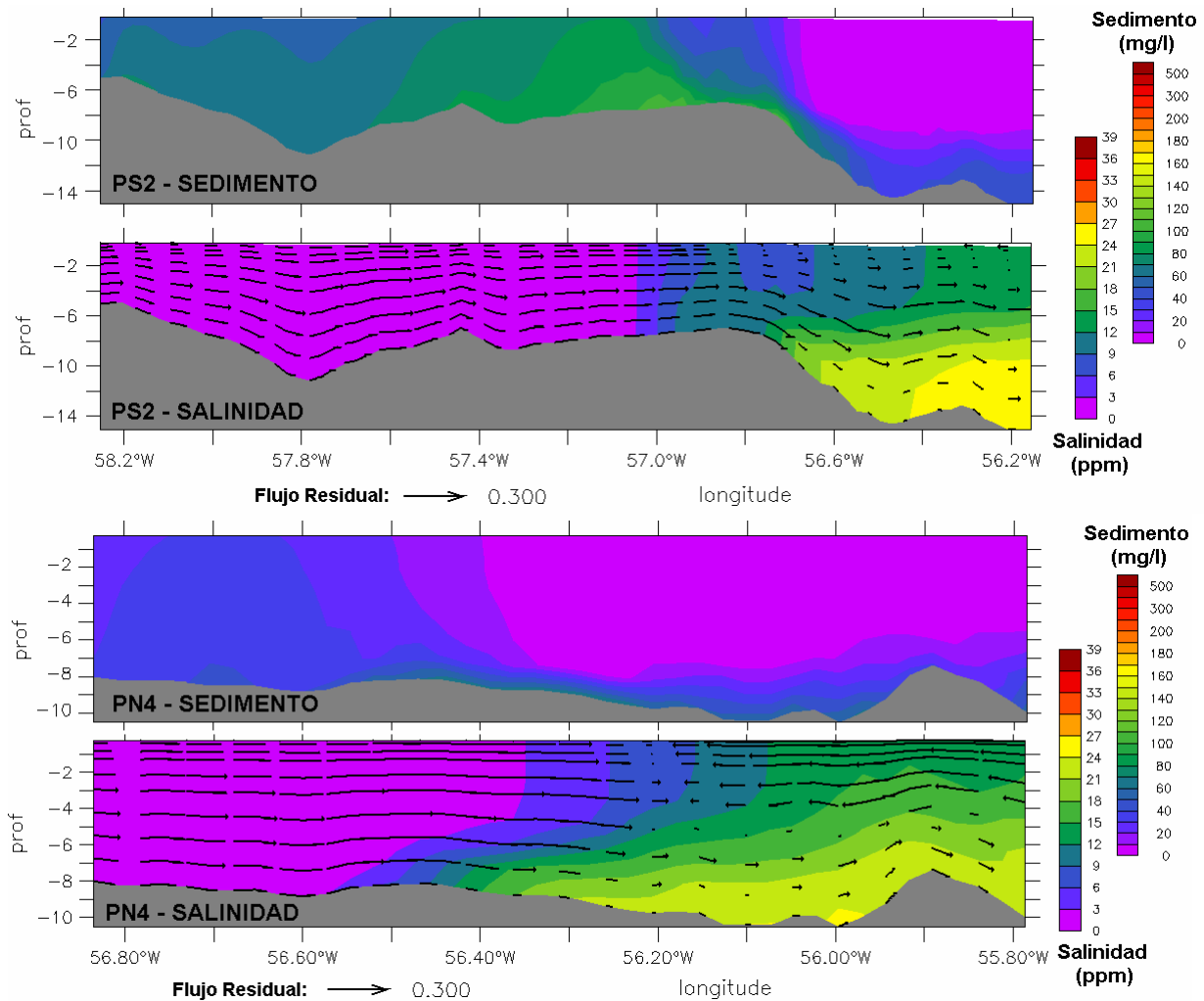


Figura 5.76: Perfiles verticales medios de concentración de sedimento, salinidad y flujo residual durante la tormenta del SE del 29 y 30 de agosto de 2010 en las secciones longitudinales PS2 y PN4. Escala vertical correspondiente a la profundidad (m).

En las Figuras 5.77 y 5.78 se presentan los resultados obtenidos para las tormentas de vientos del sector NNW-W, mientras que en la Figura 5.79 se presentan los resultados para la tormenta del sector SSW ocurrida durante agosto 2010. Más allá de las diferencias que se observan en los resultados debido a la dependencia con las características particulares de cada tormenta, hay ciertos patrones comunes a los tres casos que se destacan a continuación, y que difieren de los identificados para las tormentas analizadas anteriormente generadas por vientos del sector SE. En estos casos los patrones medios de las tensiones de corte de fondo muestran valores altos en todo el Río de la Plata; los valores máximos se observan en la zona del frente, y sobre el sector central y norte exterior, sobre la zona de los bancos. La variación del espesor de fondo muestra principalmente una disminución asociada a la erosión, que es mayor en las zonas del frente y central exterior. Respecto al campo salino se observa tanto en fondo como en superficie una pluma de descarga por la zona Norte del Río de la Plata, y una leve estratificación media en la mayor parte de la zona de estudio, lo que indica una mezcla vertical del campo salino ocurrida durante las tormentas. El flujo residual presenta una descarga intensa por la costa norte del Río de la Plata, tanto en fondo como en superficie.

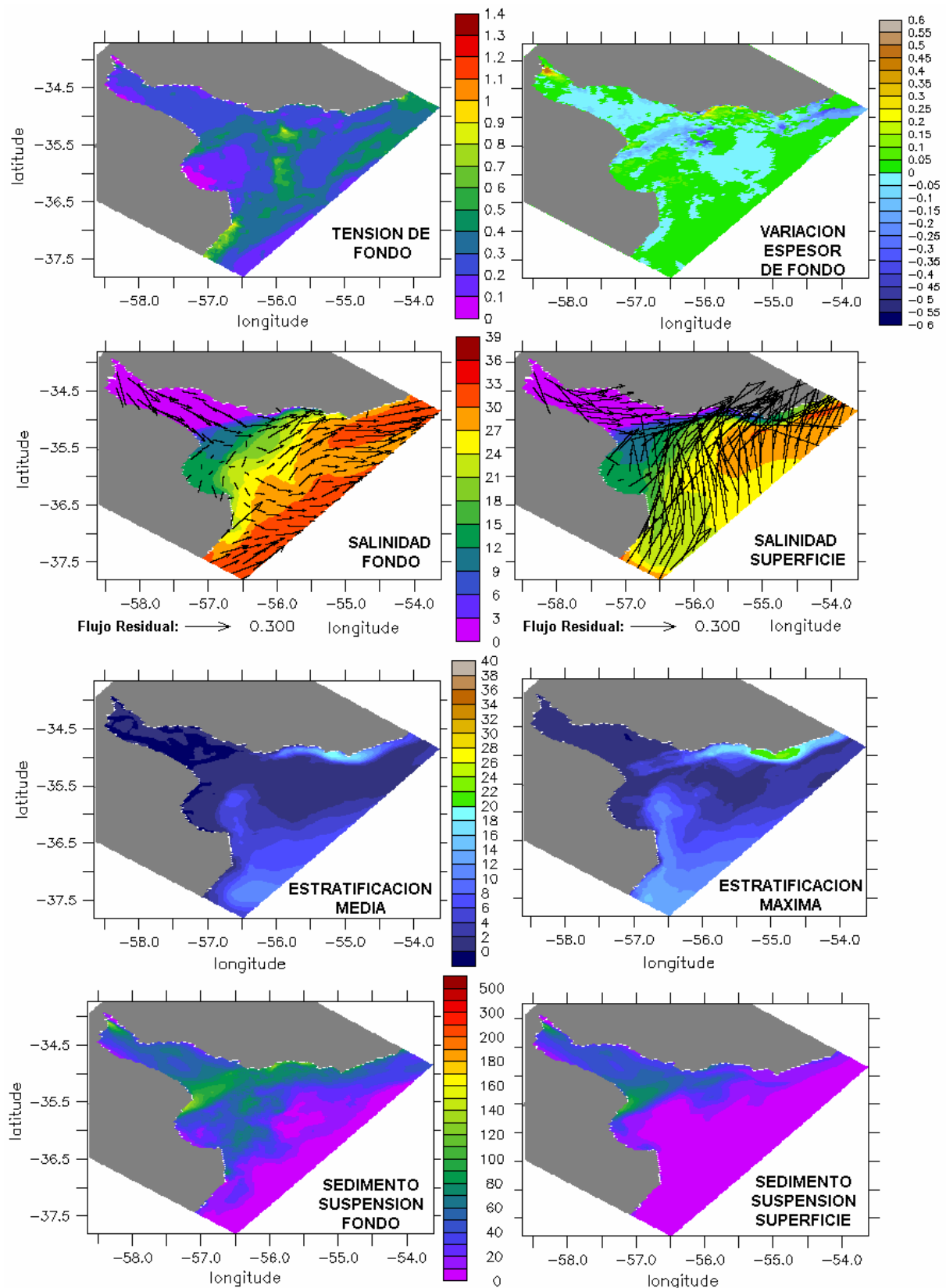


Figura 5.77: Caracterización del período de tormenta del NNW-W del 24-25/2/2010. Campos espaciales medios de tensión de corte total de fondo (N/m^2); salinidad (ppm) y flujo residual en fondo y superficie, estratificación (diferencia entre salinidad fondo y superficie), concentración (mg/l) de sedimento en suspensión en superficie y en fondo. Campo máximo de la estratificación salina y variación (cm) del espesor del sedimento de fondo durante el período.

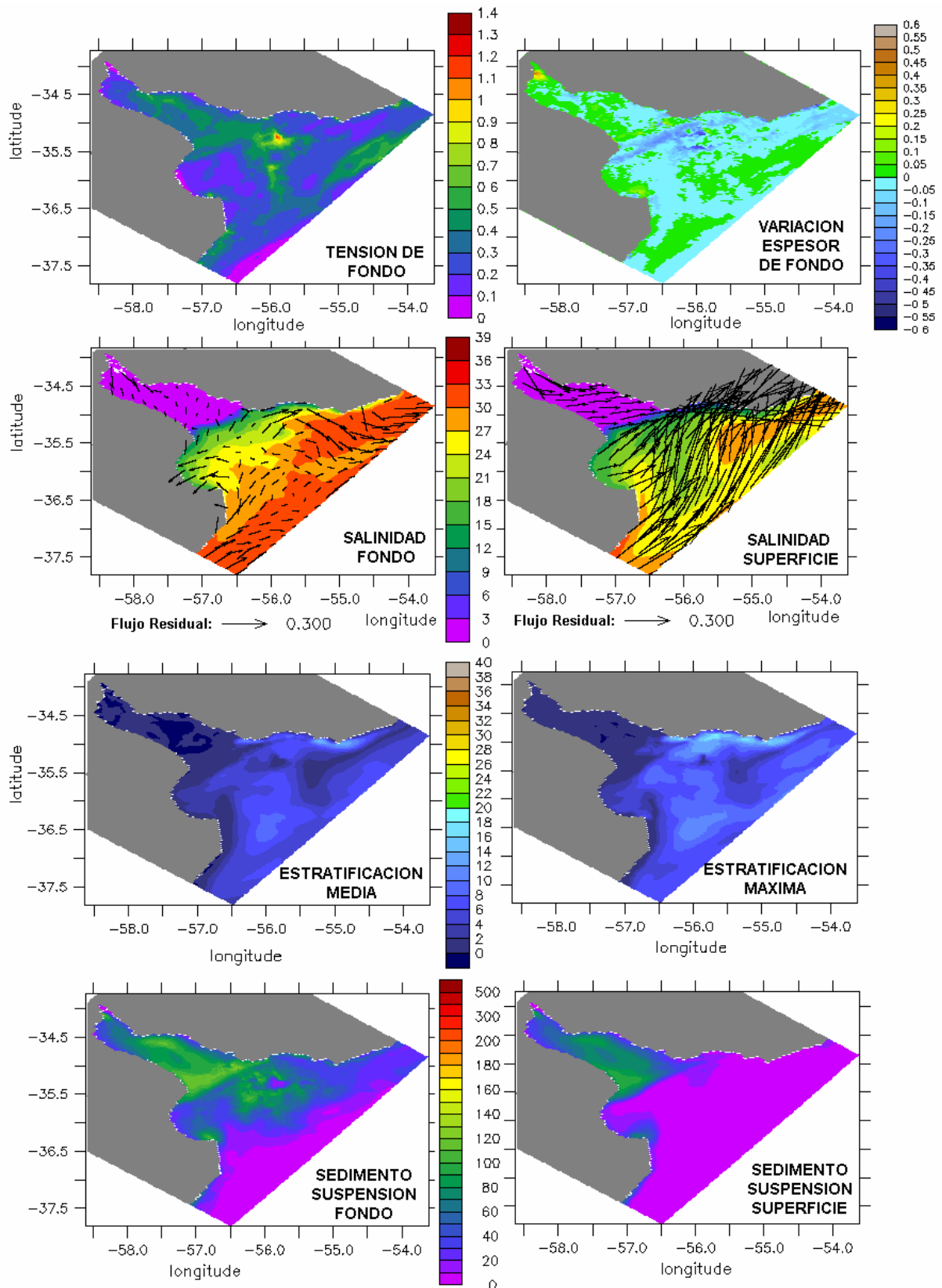


Figura 5.78: Caracterización del período de tormenta del NNW-W del 20-21/6/2010. Campos espaciales medios de tensión de corte total de fondo (N/m^2); salinidad (ppm) y flujo residual en fondo y superficie, estratificación (diferencia entre salinidad fondo y superficie), concentración (mg/l) de sedimento en suspensión en superficie y en fondo. Campo máximo de la estratificación salina y variación (cm) del espesor del sedimento de fondo durante el período.

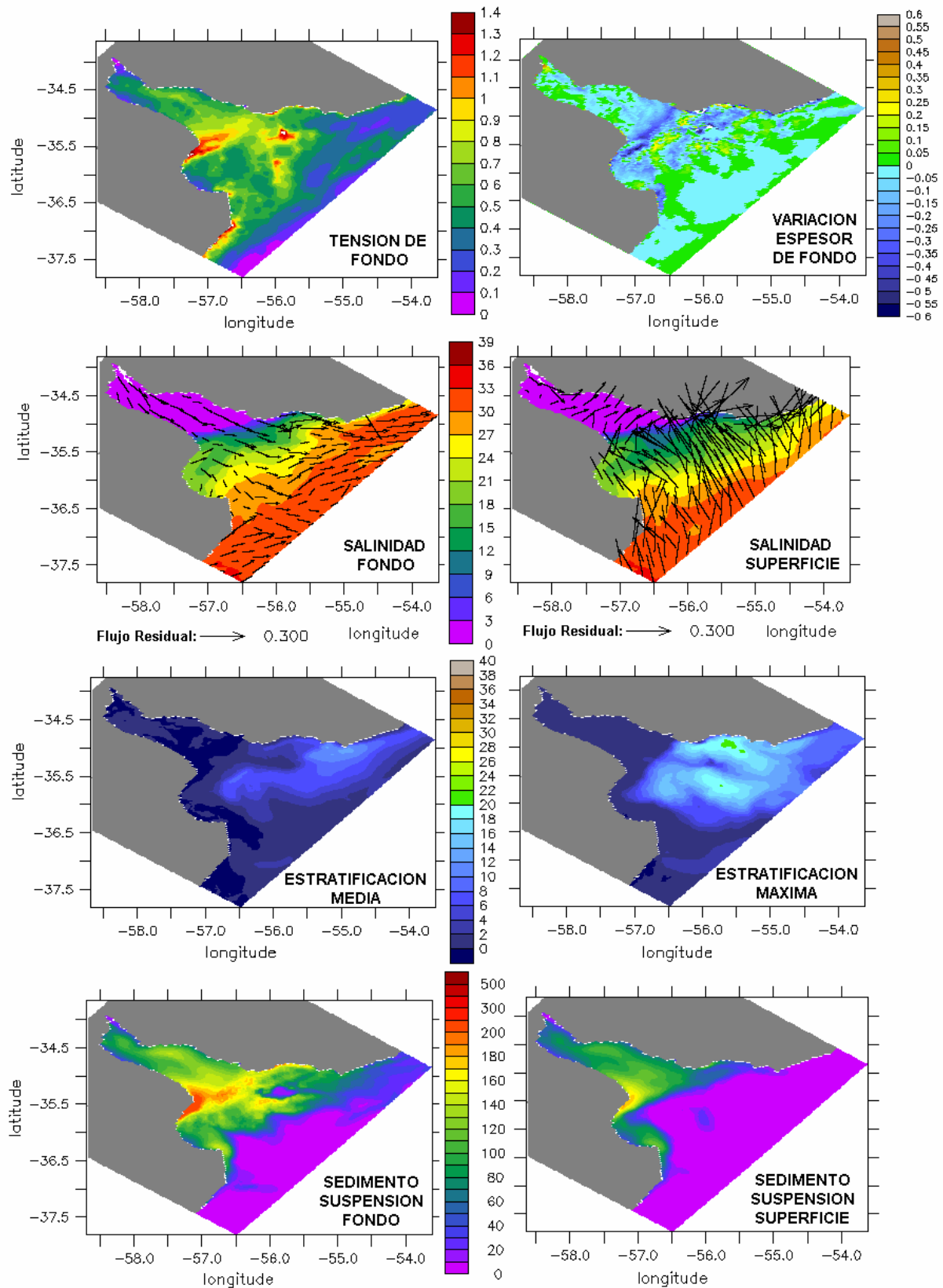


Figura 5.79: Caracterización del período de tormenta del SSW del 13-14/8/2010. Campos espaciales medios de tensión de corte total de fondo (N/m^2); salinidad (ppm) y flujo residual en fondo y superficie, estratificación (diferencia entre salinidad fondo y superficie), concentración (mg/l) de sedimento en suspensión en superficie y en fondo. Campo máximo de la estratificación salina y variación (cm) del espesor del sedimento de fondo durante el período.

El campo de sedimentos en suspensión sobre el fondo presenta valores altos de concentración en gran parte del Río de la Plata producto de la gran resuspensión, con valores extremos sobre la zona de Barra del Indio, y las zonas cercanas, con concentraciones mayores sobre la zona norte y central del exterior a las de la zona sur. En la superficie se observa un campo de sedimento en suspensión similar al descrito para el fondo en la zona interior e intermedia, en el frente y sobre la costa uruguaya en la zona exterior. Esto significa que se observa un campo de sedimento en suspensión medio que se extiende hacia el exterior del frente sobre la zona norte del Río de la Plata exterior, aunque se mantiene que los máximos ocurren en la zona de Punta Piedras en la costa sur.

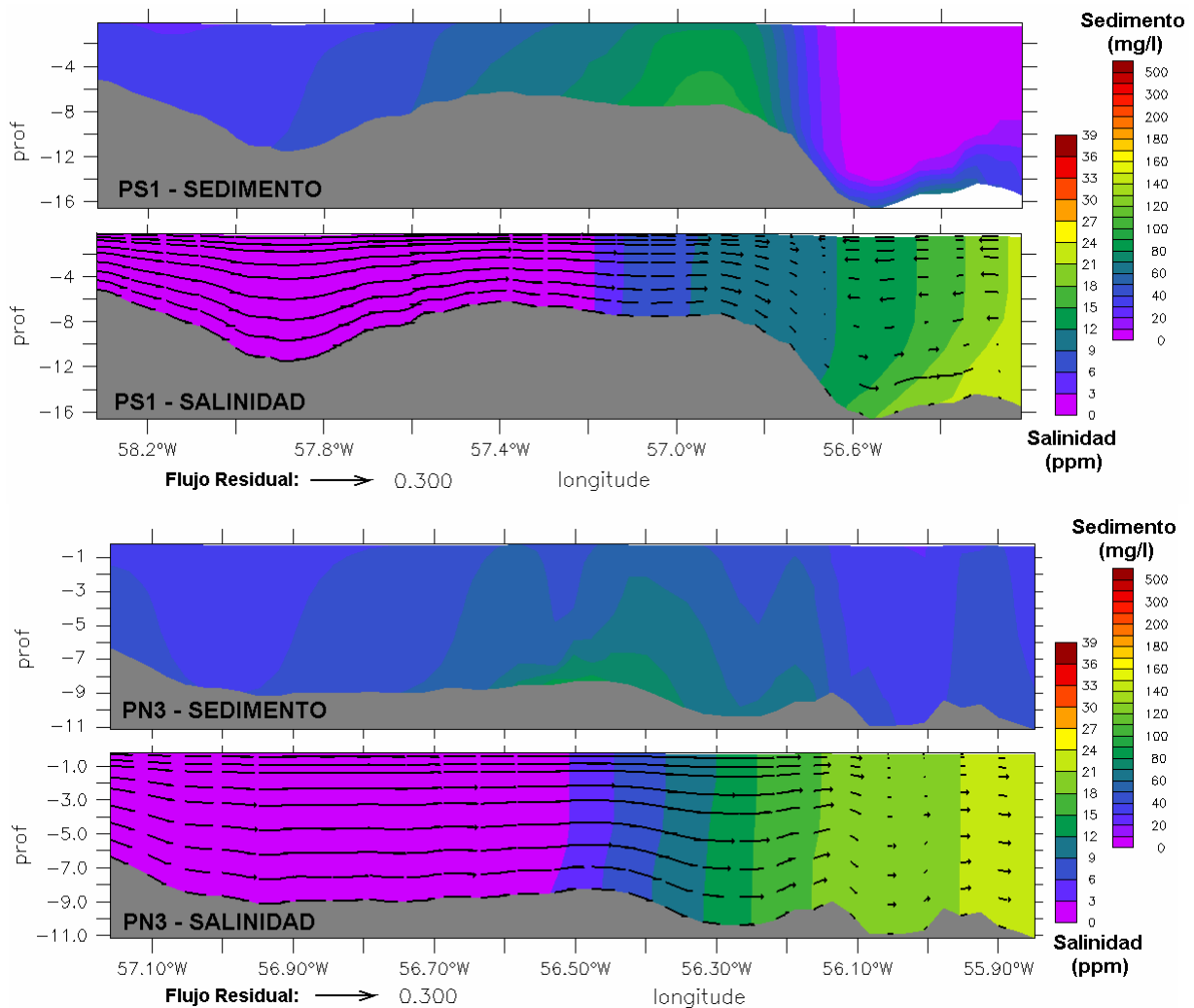


Figura 5.80: Perfiles verticales medios de concentración de sedimento, salinidad y flujo residual durante la tormenta del NNW-W del 24 y 25 de febrero de 2010 en las secciones longitudinales PS1 y PN3. Escala vertical correspondiente a la profundidad (m).

En la Figura 5.80 se presentan a modo de ejemplo dos perfiles longitudinales de la concentración de sedimento, salinidad y flujo residual promedio obtenidos para la tormenta del NNW-W del 24-25 de febrero 2010. Se observa el campo salino presenta condiciones de mayor mezcla en la vertical en relación a las situaciones de calma y de tormenta del SE, principalmente sobre los perfiles del norte. En la costa sur se observa un flujo residual de descarga en la zona intermedia y entrante desde el Océano que resulta en velocidades medias muy bajas en la zona del frente; en la costa norte se observa un perfil neto de descarga con velocidades muy bajas en la zona del frente y

exterior. Los perfiles de concentración de sedimento en suspensión muestran valores mayores a cero en todo el perfil de la costa norte producto de la descarga observada en dicha zona, mientras que en el perfil presentado contra la costa sur se observa la concentración máxima que ocurre en la zona del frente, y la estratificación vertical en la zona exterior, sin sedimento en suspensión sobre las capas superiores. En la Figura 5.81 se presentan a modo de ejemplo dos perfiles correspondientes a la tormenta del SSW del 13 y 14 de agosto 2010. Para este caso el perfil de flujo residual de la costa sur muestra una descarga en la zona intermedia y un ingreso de flujo residual desde el Océano que resulta en un flujo residual saliente por el fondo de la zona exterior, mientras que el perfil del norte muestra un ingreso de flujo desde el Océano. En ambos perfiles se observan grandes concentraciones de sedimento en suspensión sobre el fondo en la zona intermedia y del frente. En el perfil ubicado sobre la costa norte se observan concentraciones no nulas en gran parte de la zona exterior, mientras que en el perfil del sur se observa un perfil estratificado con mayores concentraciones en el fondo producto de la resuspensión de material.

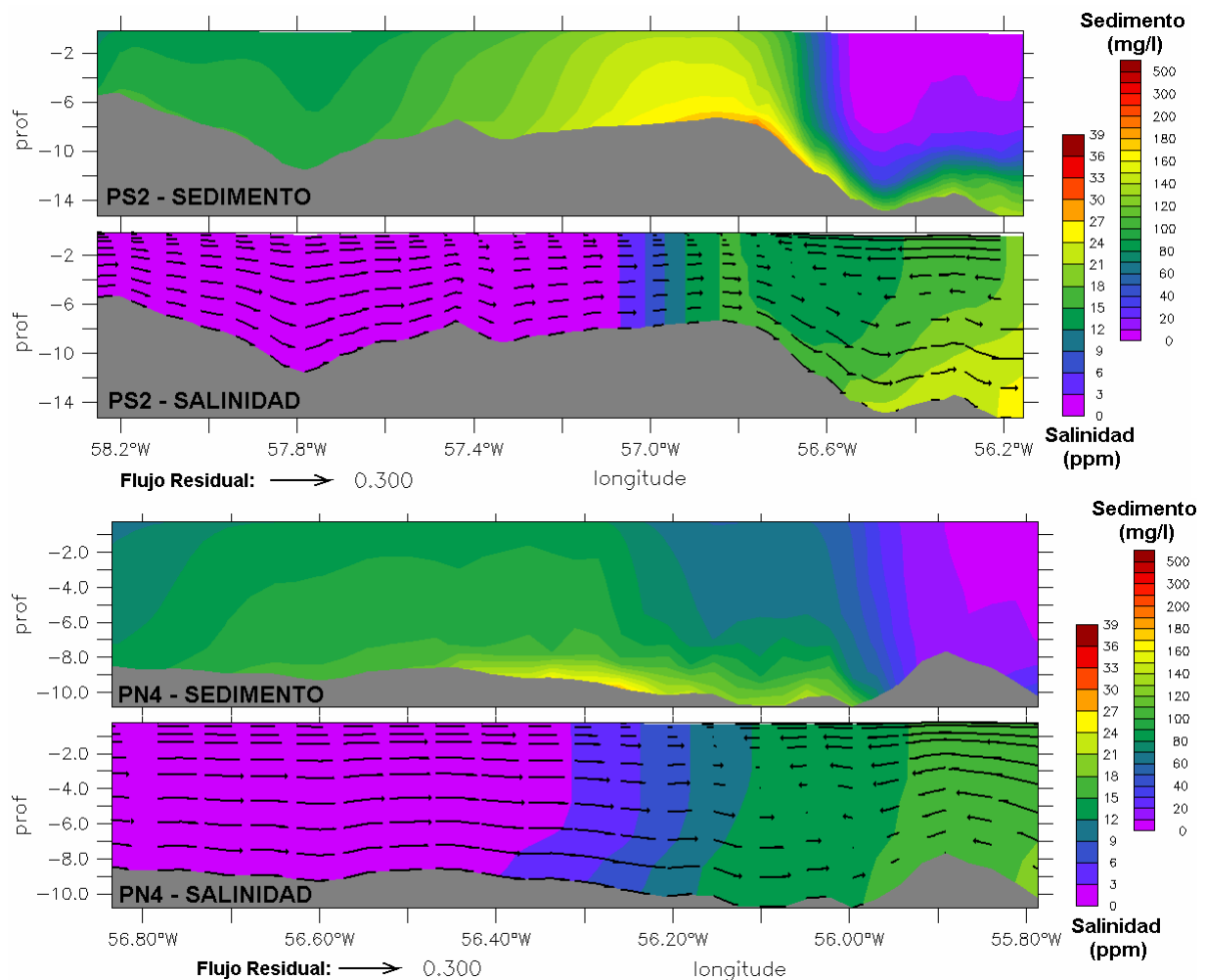


Figura 5.81: Perfiles verticales medios de concentración de sedimento, salinidad y flujo residual durante la tormenta del SSW del 13 y 14 de agosto de 2010 en las secciones longitudinales PS2 y PN4. Escala vertical correspondiente a la profundidad (m).

5.2.6. Conclusiones

Utilizando el modelo numérico ajustado como herramienta de generación de información de la dinámica de sedimentos finos se obtuvieron las características de la

misma para el período 2009-2010. Analizando los resultados obtenidos se identifica que en el Río de la Plata las características del sedimento en suspensión, cómo es la interacción con el sedimento de fondo, y cómo es su variabilidad temporal, dependen de la zona del mismo en la que se esté trabajando. Esta zonificación está asociada principalmente a las características hidrodinámicas y a las características del sedimento fino del fondo en las diversas zonas.

En la zona interior predominan los materiales limosos y son relevantes los procesos hidrodinámicos de marea, las tormentas y la descarga de los tributarios del Río de la Plata. En consecuencia a estas interacciones la dinámica de sedimentos finos en la columna de agua se caracteriza por una situación de régimen con valores en el entorno de los 50 mg/l con oscilaciones entre 30-80 mg/l según la marea con valores excepcionales durante las tormentas que pueden superar los 100 mg/l. El intercambio con el sedimento de fondo (erosión y deposición) ocurre permanentemente pero hay una tendencia neta a la erosión en toda la zona salvo en la zona inmediata a la descarga de los tributarios que ocurre una gran deposición del material descargado por los mismos.

A la zona intermedia del Río de la Plata es posible dividirla en varias subzonas en función de las dinámicas predominantes en cada una. Por un lado se observan diferencias en la dinámica de sedimentos entre la zona ubicada entre el eje longitudinal del Río de la Plata y la costa uruguaya, y la zona ubicada entre el eje y la costa argentina. En la primera la magnitud relativa de las tensiones generadas por el oleaje es mayor a la de las corrientes, y por tanto se observa en el sedimento en suspensión un régimen permanente en respuesta a la marea con alta variabilidad durante los eventos extremos de tormentas. Se observa un incremento de la concentración de sedimento en suspensión de base desde la zona superior intermedia (es decir, la zona intermedia adyacente a la zona interior) hacia la zona intermedia inferior (es decir, hacia el límite con la zona exterior) desde valores medios de 50 mg/l a 70 mg/l; y también un incremento desde la margen uruguaya hacia la margen argentina del valor basal (de 40 mg/l a 70 mg/l, aproximadamente). El comportamiento del sedimento en suspensión es diferente durante los eventos de tormenta. En esos casos en la zona intermedia superior hay un incremento de concentración desde la costa argentina hacia la costa uruguaya, desde valores superiores a los 100 mg/l hasta valores superiores a los 150 mg/l. En la zona intermedia inferior se mantienen en general las mayores concentraciones sobre la margen argentina (de hasta 200 mg/l) pero los valores extremos sobre la margen uruguaya también son altos y superan los 150 mg/l. En la zona intermedia superior el fondo presenta una tendencia neta a la deposición más allá de los ciclos de erosión y resuspensión que ocurren durante el ciclo de marea y durante las tormentas. En la zona intermedia inferior en cambio se observa una zona con tendencia a la deposición ubicada hacia la margen uruguaya del Río de la Plata y una zona con tendencia a la erosión ubicada hacia la margen argentina del mismo. En relación a la composición predomina en toda la zona intermedia el sedimento fino tipo limo con un leve porcentaje de arcilla. Se observa una tendencia a mayor contenido de material arcilloso en la zona intermedia hacia la costa argentina. Sobre la costa uruguaya se depositan bajos porcentajes de material provenientes de los tributarios en los períodos de tiempo considerados (hasta dos años).

La zona de transición entre el Río de la Plata intermedio y la zona exterior se define como una zona de altas concentraciones en suspensión gobernada por las condiciones de marea, por las tormentas y por el campo salino, con una tendencia a la deposición del material sobre el fondo. El cambio en el patrón de corrientes y el inicio de las aguas salobres que ocurren en esta zona generan una dinámica de sedimentos finos caracterizada por un valor basal de concentración de sedimento en suspensión de aproximadamente 50 mg/l con cierta variación en la vertical (40 mg/l en superficie y 70

mg/l sobre el fondo) que varía levemente según las condiciones de la marea, y que presenta valores extremos altos de concentración asociado a los eventos de tormenta de más de 200 mg/l. En esta zona en general ocurre la mayor parte de la deposición en el fondo del material en suspensión, principalmente en los instantes siguientes a las grandes tormentas, y se trata de finos tipo mezcla de limos y arcillas, ya que los porcentajes de ambos materiales en la zona son muy similares.

En la zona exterior hacia la costa argentina (Bahía de Samborombón) se observan valores bajos de concentración de base permanentemente, de entre 30 y hasta 60 mg/l según la profundidad en la columna de agua. Durante las tormentas estos valores aumentan alcanzándose concentraciones mayores a 200 mg/l sobre el fondo y un poco menores en la superficie ya que la estratificación salina condiciona la mezcla vertical. Hacia la zona central exterior disminuyen levemente los valores de concentración de base pero los picos durante las tormentas se mantienen. En general en la parte central y norte de la región exterior la estratificación salina es mayor y por tanto se incrementa la estratificación vertical de concentración de sedimento en suspensión. En estas zonas los valores de régimen de concentración de sedimento en suspensión son muy bajos principalmente sobre la superficie pero durante las tormentas los incrementos son muy grandes, principalmente sobre el fondo. En esos casos se observa una gran estratificación vertical aunque en ciertas circunstancias de campo salino mezclado son posibles concentraciones mayores a 150 mg/l a nivel superficial. En definitiva, debido a las diferencias en régimen que existe durante las calmas en relación a las tormentas, es que en esta zona se observan las mayores variabilidades en la concentración de sedimento en suspensión. El material de fondo de la zona exterior está sujeto a una alta variabilidad debido a los eventos de fuerte erosión durante las tormentas en contraste con la deposición del material que arriba a la misma (ya sea por transporte en suspensión desde la zona interior o intermedia, o por erosión en el lugar) durante las calmas posteriores a las tormentas. El material fino de la zona está compuesto por un alto porcentaje de arcillas además de limos. Las arcillas incluso son predominantes sobre la zona exterior sur.

A partir de los resultados presentados es posible generar una caracterización de la dinámica de sedimentos en períodos de calma y en períodos de tormenta. Es posible afirmar que en las situaciones de *calma* (sin tormentas) los patrones obtenidos de sedimento en suspensión en el Río de la Plata presentan las siguientes características:

- La pluma de sedimento se extiende sobre la zona interior e intermedia del Río de la Plata, con un gradiente creciente en dirección longitudinal hacia el exterior y en dirección transversal desde la costa norte hacia la costa argentina. La pluma es generada principalmente por la resuspensión de material de fondo producto de las tensiones de corte de las corrientes de marea. Las fluctuaciones en la concentración de sedimento en suspensión son consecuencia de los ciclos sucesivos de resuspensión y deposición de material. Se observa una leve estratificación vertical con concentraciones sobre el fondo de la columna de agua levemente mayores a las de superficie.

- En la zona exterior no hay sedimento en suspensión prácticamente en toda la columna de agua salvo en las capas cercanas al fondo donde se observan valores bajos de concentración basal. Durante los períodos de calma las tensiones de corte de fondo son leves y no generan una resuspensión de material del fondo relevante en ésta zona.

- Existe un frente de turbidez en la transición entre la zona intermedia y la zona exterior, en donde las concentraciones bajan abruptamente. El frente varía levemente su posición en función de las condiciones de marea que actúan durante el período sin tormentas. Hacia la costa argentina se ubica en Punta Piedras mientras que sobre la costa uruguaya se ubica principalmente aguas arriba de la descarga del río Santa Lucía.

- El gradiente de la concentración en dirección longitudinal al eje del Río de la Plata es más intenso en la costa sur y disminuye su intensidad hacia el norte, donde las variaciones son más graduales. Es posible identificar una zona de máxima concentración de sedimento en suspensión antes de la caída de concentración existente en el frente con valores levemente mayores a los observados hacia el interior sobre el eje longitudinal.

- Durante las situaciones de calma predomina la estratificación salina en la zona exterior que favorece la estratificación vertical en la concentración de sedimento en suspensión.

- En la medida que haya sedimento en suspensión producto de la resuspensión durante las tormentas previas al período de calma, el mismo sedimenta y se deposita en el fondo durante los períodos de calma. Se observa deposición prácticamente en todo el Río de la Plata salvo en las zonas de mayor flujo de marea como la costa argentina en la zona intermedia.

Qué sucede durante las **tormentas** puede clasificarse también según las distintas zonas del Río de la Plata, siendo mayores los cambios que se observan en la zona exterior a los que se observan en la zona interior e intermedia.

En la zona interior e intermedia se observa que:

- Las tormentas generan un incremento de concentración de sedimento en suspensión respecto al valor basal en toda la columna de agua, producto de la resuspensión de material de fondo. Se mantienen las condiciones de leve estratificación en la vertical con concentraciones mayores sobre el fondo.

- La distribución espacial de la pluma de sedimento se modifica durante las tormentas siendo menores las diferencias de concentración entre la zona sur y la zona norte (respecto a las calmas), alcanzando en algunos casos mayores concentraciones sobre la costa uruguaya que sobre la costa argentina, situación opuesta a la identificada durante los períodos de calma.

- Las mayores variaciones del espesor de fondo producto de la erosión se observan sobre la transición y sobre la zona norte, producto del gradiente longitudinal y transversal existente en los patrones de tensión de corte del oleaje en la zona.

Por otra parte en la zona exterior la dinámica de sedimentos varía considerablemente respecto a la situación de calma, y es posible identificar los siguientes aspectos principales:

- La concentración de sedimento en suspensión sobre el fondo se incrementa considerablemente en todo la zona exterior del Río de la Plata. Las mayores concentraciones en general se observan en la zona exterior cercana al frente, tanto en la zona central como en las zonas costeras.

- Hay una gran diferencia entre la distribución espacial de sedimento sobre el fondo y la distribución espacial en la superficie, siendo mayor la extensión de la pluma de fondo, la que responde directamente a la erosión de material de fondo. En términos generales las condiciones de cierto nivel de estratificación salina impiden la mezcla vertical y generan patrones diferenciados en fondo y superficie.

- Esta situación es un poco diferente en la zona del frente e inicio de la zona exterior, ya que durante las tormentas se produce mayor erosión en esta zona pues influyen en igual proporción las tensiones de marea y las tensiones de oleaje. En esta zona las bajas profundidades continúan permitiendo la mezcla vertical del sedimento resuspendido, aunque a su vez la misma dependerá del patrón de corrientes residuales

impuesto por las características del frente salino que varía durante las distintas tormentas.

- Debido a esto el sedimento en las capas superficiales en general se extiende sobre la zona inicial de la región exterior respecto a la pluma observada en la situación sin tormentas. En la zona del frente éste incremento de concentración en las capas superficiales se observa en general en todas las tormentas, mientras que en el resto de la zona exterior (costa norte y costa sur) el patrón superficial de sedimento depende de otras condiciones.

- En general cuando las tormentas se generan producto de vientos intensos que provienen del sector Oeste la pluma de sedimento en suspensión superficial se extiende por la zona central hacia la costa uruguaya. En cambio cuando las tormentas se generan producto de vientos intensos provenientes del SE (Sudestadas) la pluma de sedimento en suspensión se extiende principalmente por la costa argentina hacia el Sur.

- El frente de turbidez varía su ubicación con las tormentas principalmente en la zona central y norte, donde la mayor variabilidad del campo salino permite la mayor variabilidad del frente.

Luego de las tormentas las altas concentraciones de sedimento en suspensión generadas durante la misma disminuyen en todo el Río de la Plata por la sedimentación y posterior deposición del material en el fondo. La costa norte en la región intermedia es una zona de deposición predominante, mientras que en la zona exterior la deposición se observará en la zona donde se haya extendido la pluma superficial. El efecto de las tormentas en la dinámica de sedimentos se observa durante varias horas posteriormente a la finalización de la misma, siendo los efectos muy leves luego de un día de pasada la misma. La permanencia de los efectos es mayor en la zona exterior que en la zona intermedia.

5.3. DETERMINACIÓN DE ZONAS DE EROSIÓN Y DEPOSICIÓN PREDOMINANTES

5.3.1. Descripción del análisis

El objetivo de este análisis es determinar si existen zonas de erosión y deposición predominantes en el Río de la Plata. Esto se realiza a través del análisis de la evolución temporal neta del espesor de sedimento de fondo a lo largo del período de dos años simulado. Como se observó anteriormente, la dinámica de interacción columna de agua-sedimento de fondo genera una variación del espesor de fondo a una escala corta de marea superpuesta con efectos más intensos durante las tormentas. No obstante a largo plazo el modelo muestra una tendencia de deposición, erosión o equilibrio en diversas zonas del Río de la Plata. Estas zonas se determinan en primer lugar a una escala mensual calculando la diferencia entre el espesor de fondo al final de cada mes y el espesor de fondo inicial de la simulación correspondiente al 01/01/2009. Analizando la tendencia del acumulado mensual se observa que hay una evolución de las mismas hacia un estado permanente que posibilita la clasificación a largo plazo de la tendencia neta de evolución del espesor de fondo en todo el dominio.

Por otra parte con el objetivo de continuar el análisis de la evolución del fondo mas allá de los dos años simulados se continuó la simulación del período 2009-2010 repitiendo los forzantes disponibles de dicho período, pero tomando como fondo inicial el resultado obtenido al final de los primeros dos años simulados. De esta manera se obtiene la evolución del fondo en un total de 4 años y se obtiene una clasificación final de la evolución del sedimento de fondo a largo plazo. Además de analizar la evolución a

largo plazo del espesor de fondo se analiza también la evolución de la composición del material de fondo, con el objetivo de identificar las principales tendencias para cada zona.

Es importante mencionar que al repetir la simulación bianual con los forzantes 2009-2010 ya utilizados en los dos primeros años, los resultados obtenidos a nivel de dinámica instantánea de sedimentos finos son exactamente iguales a los obtenidos durante el período analizado y por tanto no tiene sentido analizarlos. Esto significa que todas las variables en suspensión, y la variación del espesor de fondo instante a instante se mantienen, y por tanto los campos medios mensuales de sedimento en suspensión o los campos espaciales de variación mensual del espesor de fondo, analizados en la sección anterior, son exactamente iguales. Lo que sí se modifica es la evolución acumulada del sedimento de fondo, tanto en espesor como en composición, y por eso tiene sentido repetir la simulación con los mismos forzantes pero con el sedimento de fondo producto de los dos primeros años de interacción con el sedimento en suspensión.

Vinculado a esto, al analizar la evolución temporal de la composición del material de fondo en las estaciones de control de deposición para los dos años de simulación extra realizada repitiendo los forzantes del 2009-2010 se obtienen valores cuasi-constantessimilares a los obtenidos hacia finales de los dos períodos iniciales. Esto muestra que durante el primer año hay un ajuste en la distribución del material en respuesta a la condición inicial impuesta alcanzando una distribución de composición de material de fondo que responde a la dinámica de sedimentos finos gobernada por los patrones principales hidrodinámicos del sistema, corrientes de marea, oleaje y salinidad, la cual se mantiene a largo plazo.

5.3.2. Resultados obtenidos

Para definir las zonas de tendencia a la erosión (disminución del espesor de fondo) y deposición (aumento del espesor de fondo) se estableció un límite de variación del espesor de fondo mayor a $|0,5|$ cm en el acumulado temporal. Las zonas donde la variación de fondo es leve, entre $-0,5$ y $0,5$ cm se definen como zonas de equilibrio, y en general son las zonas limítrofes entre las definidas como de erosión y de deposición.

Analizando los resultados obtenidos para cada mes durante los dos años simulados, 2009 y 2010, se observa que las mayores variaciones en las zonas ocurren durante los primeros meses de simulación, principalmente durante el 2009, siendo leves las variaciones durante el año 2010. Esto se observa en la Figura 5.82 en la cual se presentan las zonas establecidas para los 4 trimestres del año 2009. Se observa que en el primer trimestre el rango establecido para definir las zonas de erosión y deposición genera que la mayor parte del Río de la Plata se definida como de equilibrio. En el segundo trimestre se observa zonas definidas de erosión sobre la costa argentina en la zona intermedia y de deposición en la zona de transición hacia el exterior del Río de la Plata. Esta tendencia se intensifica en los últimos dos trimestres del año. En la Figura 5.83 se presenta la evolución de las zonas de fondo obtenida para los 4 trimestres del segundo año de simulación (2010). Se observa que las zonas principales de erosión y deposición se mantienen a lo largo del tiempo, con un incremento de la zona exterior de deposición.

Utilizando las características del sedimento de fondo obtenidas al final de los dos años de simulación como condición inicial se simularon nuevamente los dos años 2009 y 2010, es decir, que se reiteran los forzantes. De esta manera se analiza la evolución del sedimento de fondo durante un período total de 4 años. Los resultados obtenidos mostraron leves modificaciones en la determinación de las zonas de erosión y deposición predominantes identificadas durante los dos primeros años. En la Figura 5.84 se

presenta la zonificación obtenida luego de 3 y 4 años de simulación. Se observa principalmente que se mantienen durante los nuevos dos años de simulación las áreas identificadas en los dos primeros años.

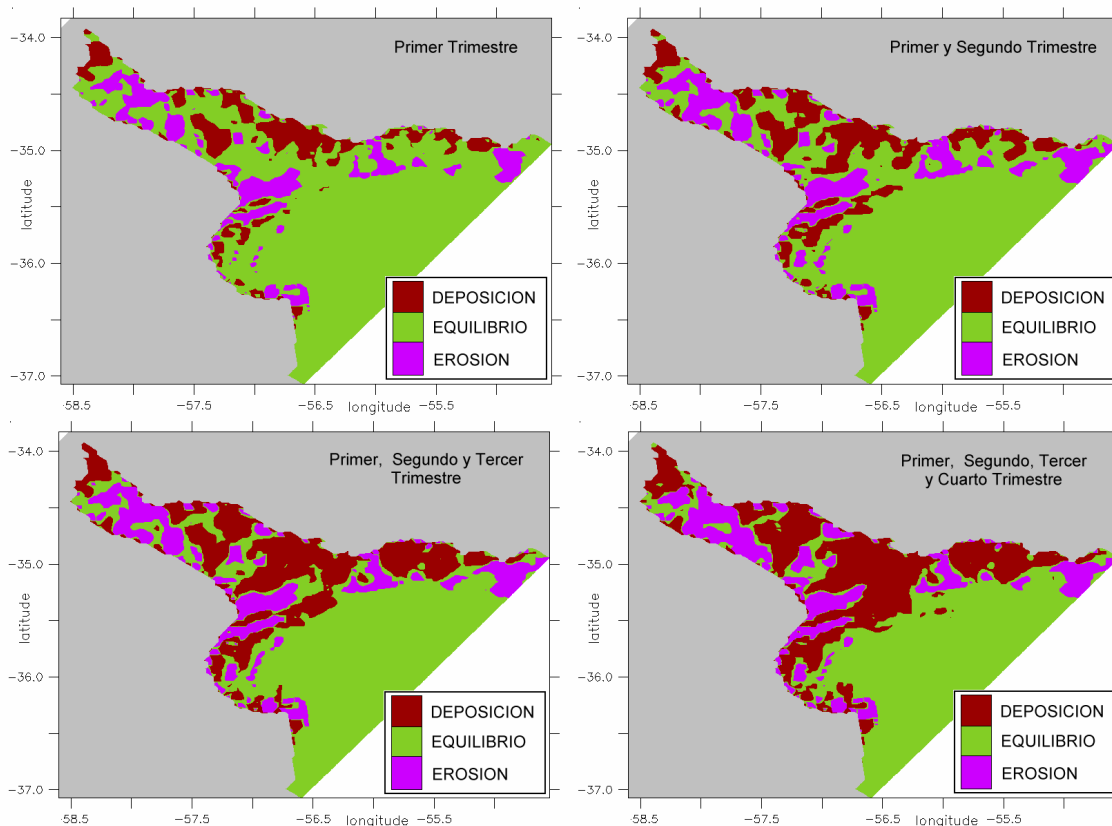


Figura 5.82: Evolución de las zonas de deposición, erosión y equilibrio durante los 4 trimestres del primer año de simulación (forzantes 2009).

Estos resultados muestran que en la escala anual la dinámica de evolución del sedimento de fondo producto de la interacción con el sedimento en suspensión podría generar zonas con tendencia neta a la erosión, con tendencia neta a la deposición y zonas denominadas de equilibrio donde no se observan grandes variaciones del mismo. La zona interior del Río de la Plata donde desembocan los principales tributarios estaría caracterizada por una zona de deposición. Luego se observa una zona de equilibrio con una zona de erosión sobre el canal central, deposición sobre la costa de Buenos Aires y hacia la línea Colonia La Plata comienza una zona de erosión que se extiende hasta la zona intermedia superior. Posteriormente, en la zona intermedia se observa principalmente una zona de deposición en la parte central y sobre la costa uruguaya, que salvo alguna zona puntual de erosión se mantiene hasta la zona exterior. Sobre la costa argentina se observa en cambio zonas puntuales con tendencia a la erosión, las cuales se extienden sobre la misma sobre la zona exterior. En la parte central de la zona exterior y costa uruguaya hasta Montevideo se observa una tendencia a la deposición de material sobre el fondo. Sobre la costa uruguaya luego de una zona con tendencia a la erosión se observa nuevamente hasta Punta del Este una tendencia a la deposición. En la Bahía de Samborombón se observa en general una tendencia a la deposición aunque hay zonas que se clasifican como de erosión.

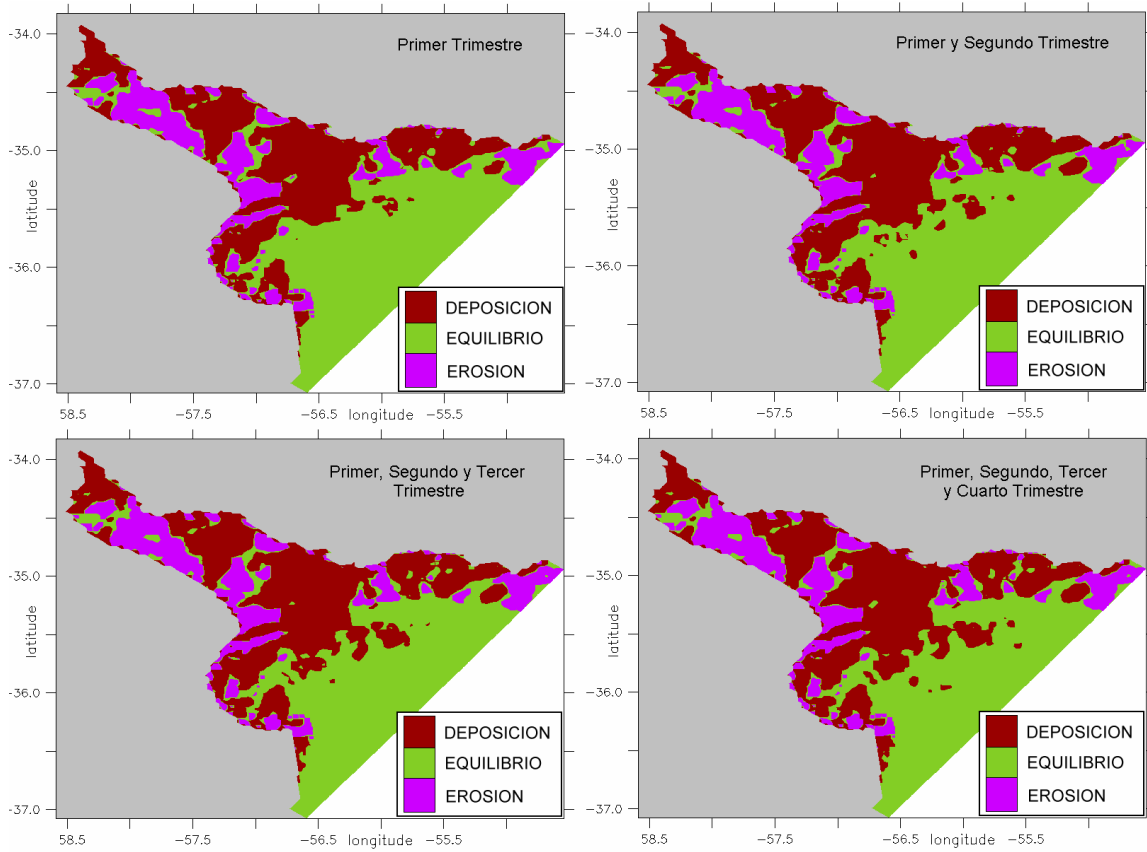


Figura 5.83: Evolución de las zonas de deposición, erosión y equilibrio durante los 4 trimestres del segundo año de simulación (forzantes 2010).

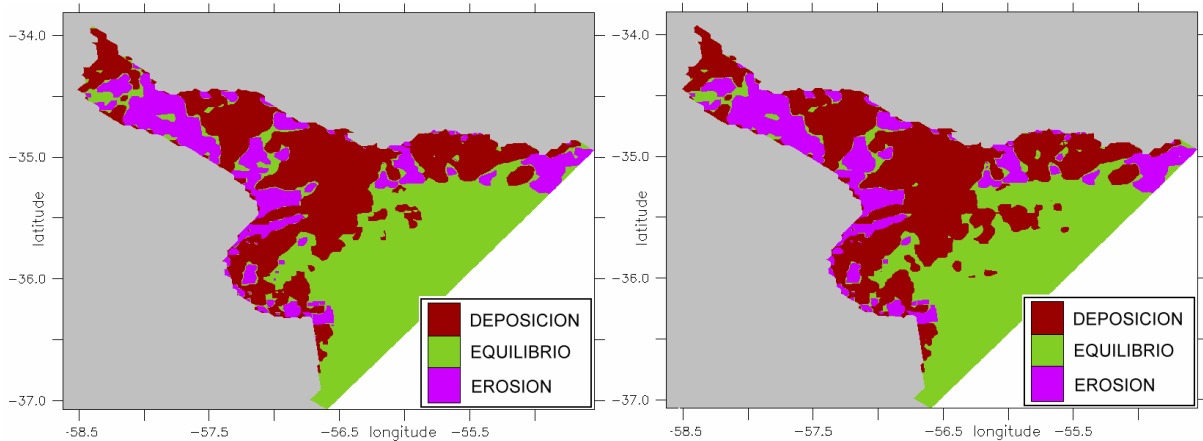


Figura 5.84: Evolución de las zonas de deposición, erosión y equilibrio luego de 3 años de simulación (panel izquierdo) y luego de 4 años de simulación (panel derecho).

Además de identificar las zonas de erosión y deposición es posible determinar dentro de cada zona el incremento ó el descenso del espesor de fondo, y su evolución a lo largo de los 4 años simulados. En la Figura 5.85 se presentan los resultados obtenidos durante el acumulado anual durante los 4 años de simulación. Para cada año se calcula la diferencia entre el espesor de fondo final y el espesor inicial de la simulación (día 0); los valores negativos corresponden a deposición y los positivos a erosión. Según se observó anteriormente la delimitación de las zonas de erosión y deposición presenta cierta estabilidad a partir del segundo año de simulación. No obstante estos resultados muestran la tendencia neta (ya sea de erosión o deposición) es lo que se continúa

incrementando a medida que se extiende el período de tiempo simulado. Se observa que, exceptuando la desembocadura de los tributarios, en las restantes zonas de deposición la magnitud de la misma presenta valores similares. En cuanto a la erosión se observan valores un poco mayores sobre la zona interior del Río de la Plata.

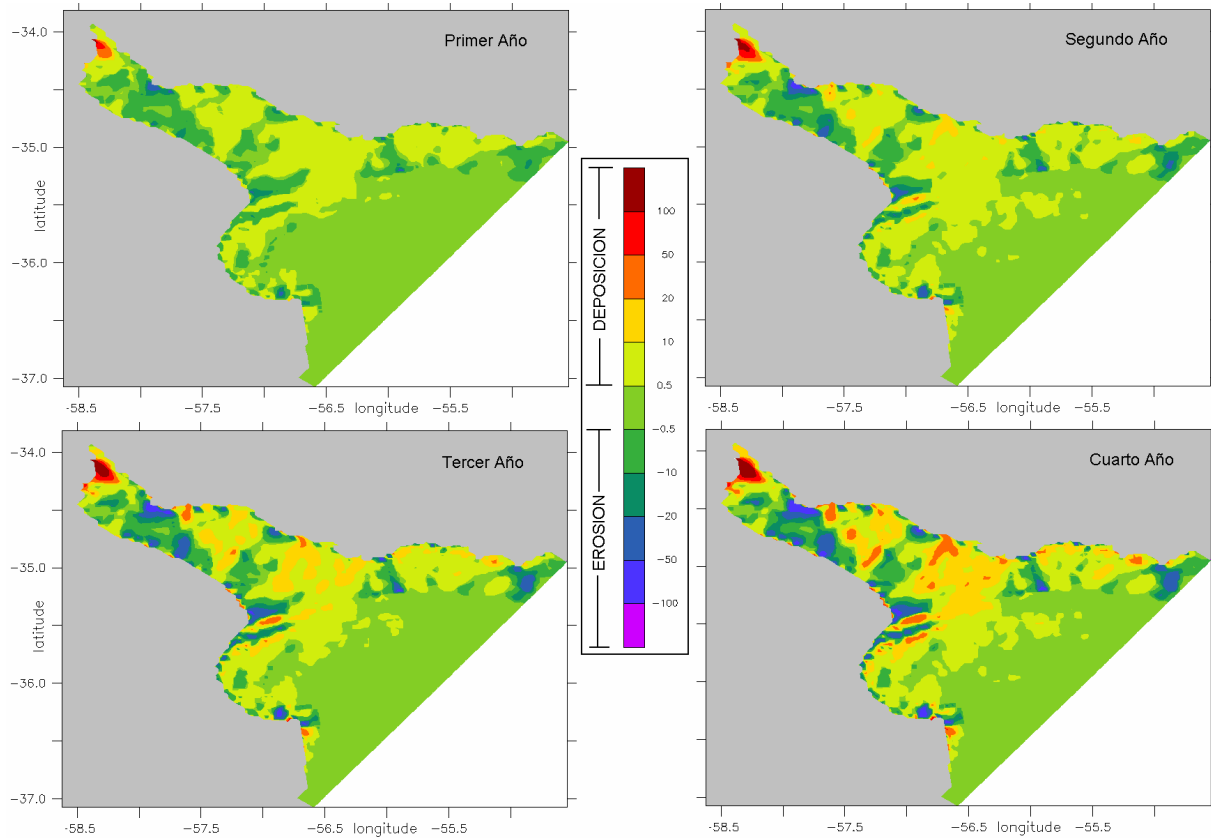


Figura 5.85: Evolución anual del incremento neto (deposición) y descenso neto (erosión) del espesor de sedimento de fondo. Escala en cm.

Por otra parte se analizó la evolución temporal de la composición del sedimento de fondo (expresada en porcentaje de limo y arcilla) que se obtiene con el modelo durante los 4 años simulados. Según la discretización seleccionada para el sedimento de fondo en el modelo tiene sentido solamente analizar cómo es dicha evolución solamente en las zonas clasificadas como de deposición, es decir, donde el espesor excede el valor inicial de 1 m (ver Capítulo 4). En las Figuras 5.86 y 5.87 se presentan los porcentajes de material tipo limo y arcilla, provenientes originalmente del fondo, (SILTfond y CLAYfond, respectivamente) en el sedimento de fondo en los depósitos generados en el modelo al final de cada año de simulación. Es importante recordar en el modelo se diferenciaron los sedimentos finos provenientes de los aportes tributarios (MESsilt y MESclay) de los sedimentos finos correspondientes a la condición inicial de sedimento de fondo. La mayor parte del depósito nuevo es producto de la resuspensión, transporte y posterior deposición del sedimento que inicialmente se encontraba en el fondo. Se observa en los depósitos generados en la zona intermedia superior predomina el material tipo limo, con una relación 80% frente a 20% del limo hacia el final del período de simulación. Hacia el frente disminuye el porcentaje de limo a valores entre 60 y 70% y aumenta el porcentaje de las arcillas, las cuales predominan, según los resultados del modelo, en los depósitos de la Bahía de Samborombón y sobre la costa uruguaya exterior.

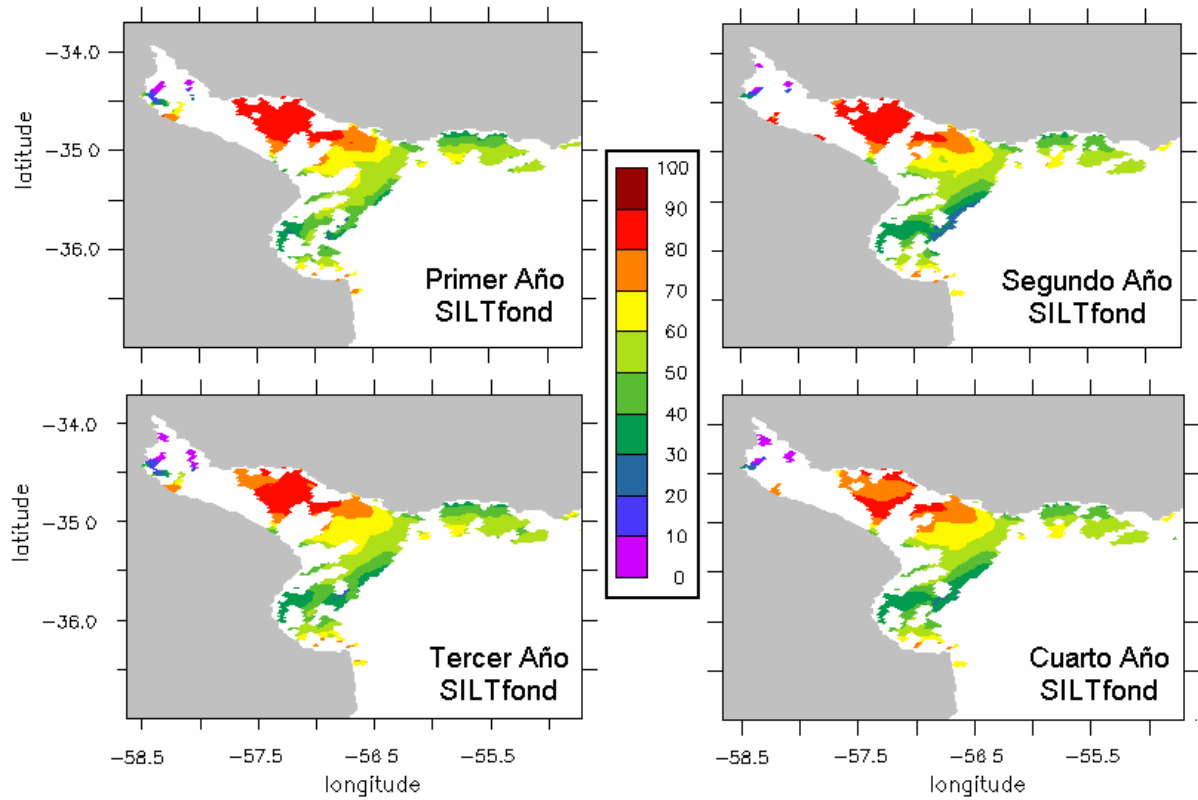


Figura 5.86: Porcentaje de material limo proveniente del fondo (SILTfond) en el depósito de sedimento de fondo generado al final de cada uno de los cuatro años de simulación.

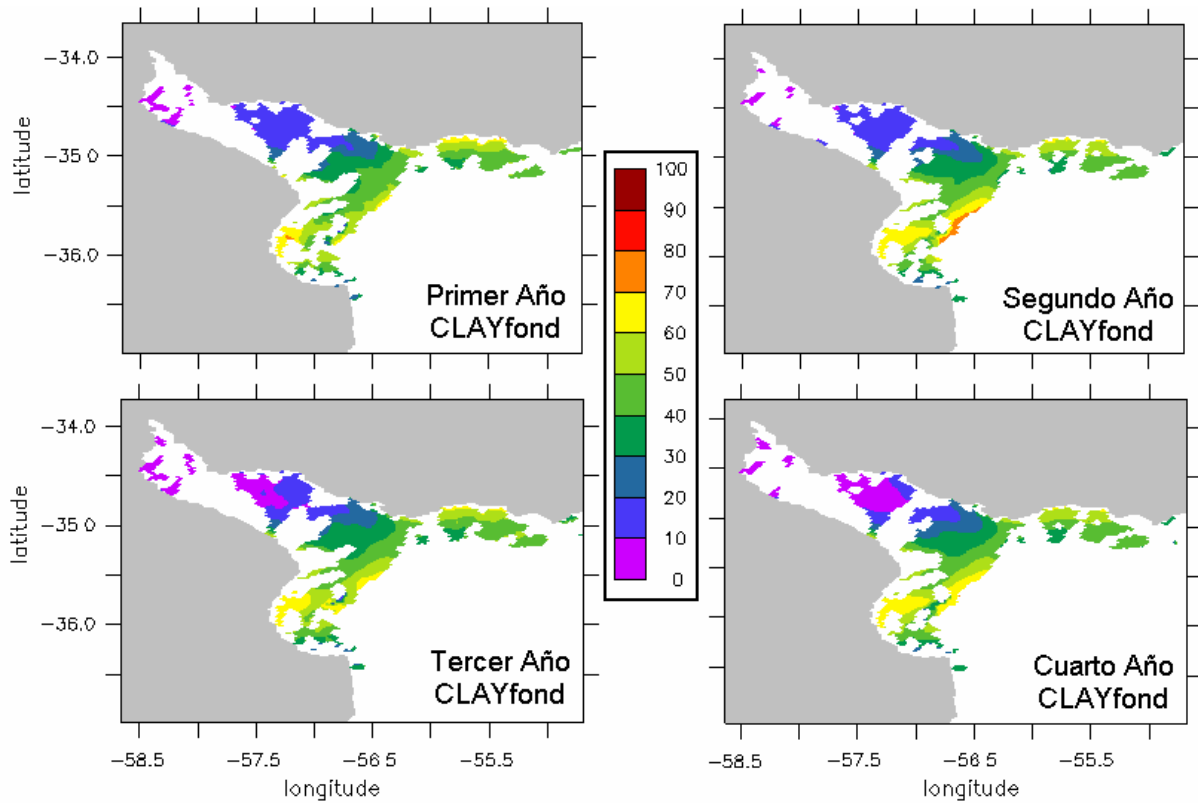


Figura 5.87: Porcentaje de material arcilla proveniente del fondo (CLAYfond) en el depósito de sedimento de fondo generado al final de cada uno de los cuatro años de simulación.

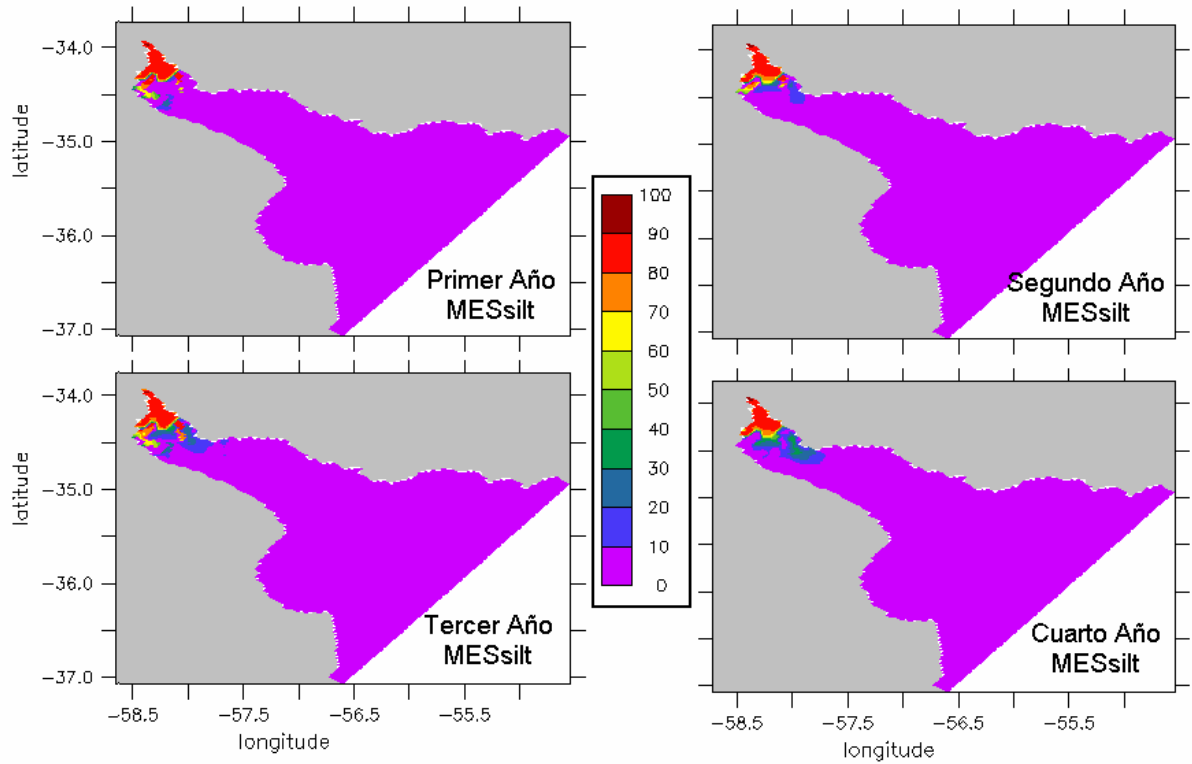


Figura 5.88: Porcentaje de material limo proveniente de los tributarios (MESsilt) en el depósito de sedimento de fondo generado al final de cada uno de los cuatro años de simulación.

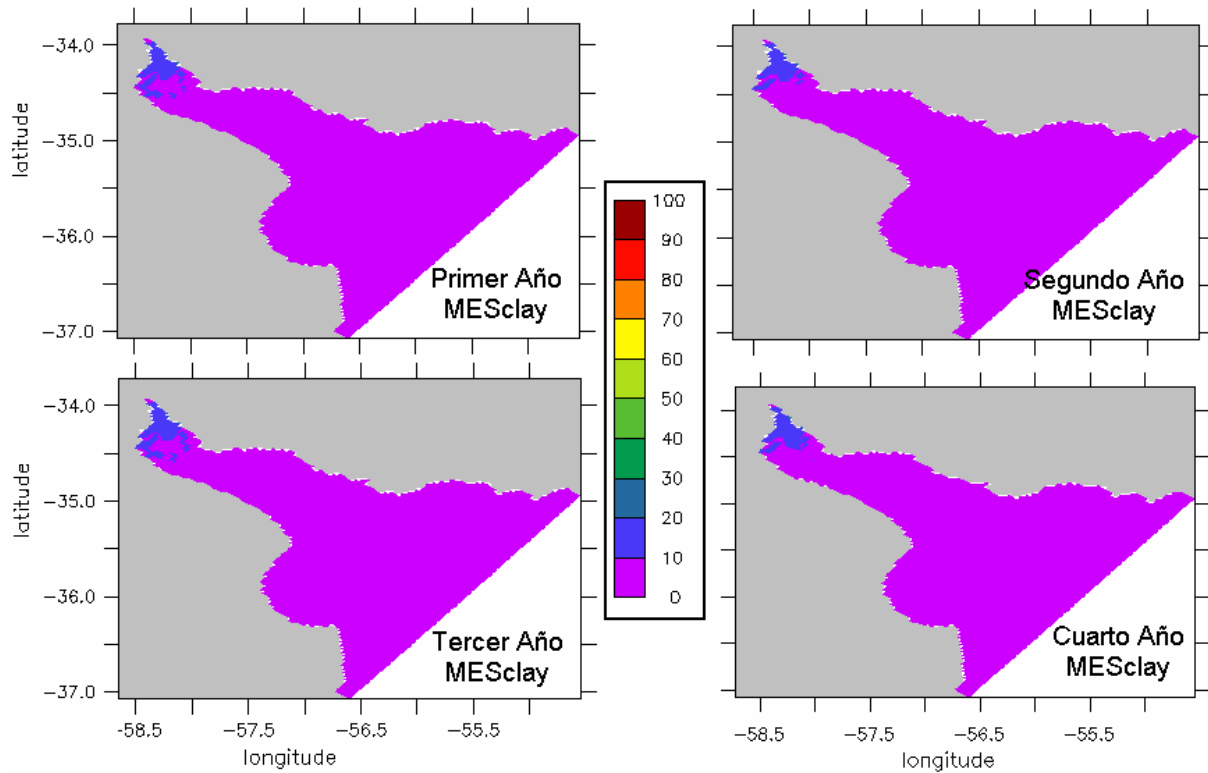


Figura 5.89: Porcentaje de material arcilla proveniente de los tributarios (MESclay) en el depósito de sedimento de fondo generado al final de cada uno de los cuatro años de simulación.

El material que ingresa durante las simulaciones por los tributarios (MESsilt y MESclay) deposita prácticamente en la zona interior del Río de la Plata constituyendo la zona de deposición identificada anteriormente en la descarga de los afluentes del Río de la Plata. Los porcentajes asociados a dichos materiales en los nuevos depósitos, al finalizar cada año de simulación, se presentan en las Figuras 5.88 y 5.89. Se observa que la mayoría del nuevo depósito que se forma en la desembocadura de los tributarios está compuesto por el limo que ingresa por los mismos, con un porcentaje bajo de la arcilla que proviene de los tributarios.

5.3.3. Síntesis

Se determinaron las zonas del fondo del Río de la Plata con tendencia a la deposición acumulada y erosión acumulada producto de la dinámica de sedimentos finos obtenida con el modelo. Se identifica una acumulación del material en el fondo en la zona inmediata a la descarga de los tributarios, formada principalmente por las arenas y limos que depositan en la zona. Se identifica otra zona de deposición predominante de material tipo limo principalmente en la zona intermedia superior y una zona con tendencia a la acumulación de material tipo limo y arcilla sobre la zona de transición hacia la zona exterior sobre la costa uruguaya principalmente, y en la zona exterior. Se identifican zonas de menor tamaño con tendencia a la erosión en el Río de la Plata interior, en la zona intermedia hacia la costa argentina y en algunas zonas específicas del Río de la Plata exterior.

Estos resultados pueden ser utilizados como guía para suponer la importancia de otros procesos no considerados en el modelo implementado, como consolidación del material de fondo o variación de la erosión en función de la composición del material de fondo. En las zonas donde la deposición predomina probablemente haya una consolidación del material acumulado que modifique las características del sedimento a la hora de ser erosionados, por ejemplo durante los eventos de tormenta. En cambio en las zonas que tienden a una erosión neta probablemente las condiciones de erosión no sean tan favorables como las que indica el modelo. Estos resultados permiten entonces identificar patrones principales y zonas en las cuales sería interesante por ejemplo realizar mediciones específicas para obtener mayor información de procesos complejos como son la consolidación del sedimento de fondo y erosión.

5.4. DINÁMICA DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTO FINO POR ZONAS

5.4.1. Descripción del análisis

Una de las principales características de la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata que se ha observado en este estudio es la gran relevancia de los procesos de intercambio entre el material en suspensión y el sedimento de fondo. La manera en que ocurren estos procesos difiere según las distintas zonas que se han identificado, dependiendo principalmente de las características específicas de las tensiones de corte de fondo generadas por marea y por las tormentas, de la estratificación salina y de la disponibilidad del material en suspensión.

Con el objetivo de avanzar un poco más en la comprensión de la dinámica por zonas mencionada se utiliza el modelo como herramienta de exploración. Se realiza una simulación donde se inicializa el fondo del Río de la Plata marcando el sedimento de fondo (tanto el limo como la arcilla) de diversas zonas definidas. Las diversas zonas se definieron considerando los distintos aspectos de la dinámica de sedimentos finos observados en la primera sección de este capítulo, es decir, las diferencias observadas entre la dinámica intermedia y exterior, y las variaciones transversales entre las zonas norte y sur divididas según el eje del Río de la Plata. A pesar de que inicialmente se

planificó realizar la simulación para el período completo 2009-2010, la cantidad de variables definidas incrementa los tiempos de cálculo siendo posible finalmente la realización de la simulación durante 10 meses, desde enero 2009 a octubre 2009. No obstante se considera el período simulado es suficientemente extenso como para obtener resultados representativos. Realizadas las simulaciones se analiza la evolución temporal del sedimento de fondo original de cada zona, es decir, a dónde se transporta en suspensión y en dónde se deposita. De esta manera se obtiene una idea de cómo es el intercambio de material entre las diversas zonas del Río de la Plata.

Se dividió el Río de la Plata en un total de 10 zonas. Para cada una se definen las variables tipo limo y arcilla, lo que sumado a las variables de los tributarios MESsable, MESsilt y MESclay comprenden un total de 23 variables que se incluyen en la simulación. En la Figura 5.90 se presentan las 10 zonas del fondo del Río de la Plata definidas según las características principales de la dinámica. La zona 1 comprende un área relativamente extensa y corresponde a la zona de transición entre el Río de la Plata intermedio y el Río de la Plata exterior (zona del frente). La zona 2 corresponde a la zona superior del Río de la Plata. La zona 3 y la zona 4 corresponden a la zona intermedia superior dividida según el eje del Río de la Plata, y las zonas 5 y 6 corresponden a la zona intermedia inferior también dividida según el eje del Río de la Plata. La zonas 7, 8, 9 y 10 corresponden al Río de la Plata exterior. La zona 7 se enfoca en la Bahía de Samborombon, la zona 8 corresponde a la zona sur exterior entre el eje del Río de la Plata y la zona 7, la zona 9 corresponde a la zona norte del exterior incluyendo la costa uruguaya hasta casi Punta del Este, y la zona 10 corresponde al material fino de fondo exterior al Río de la Plata en el Canal Oriental.

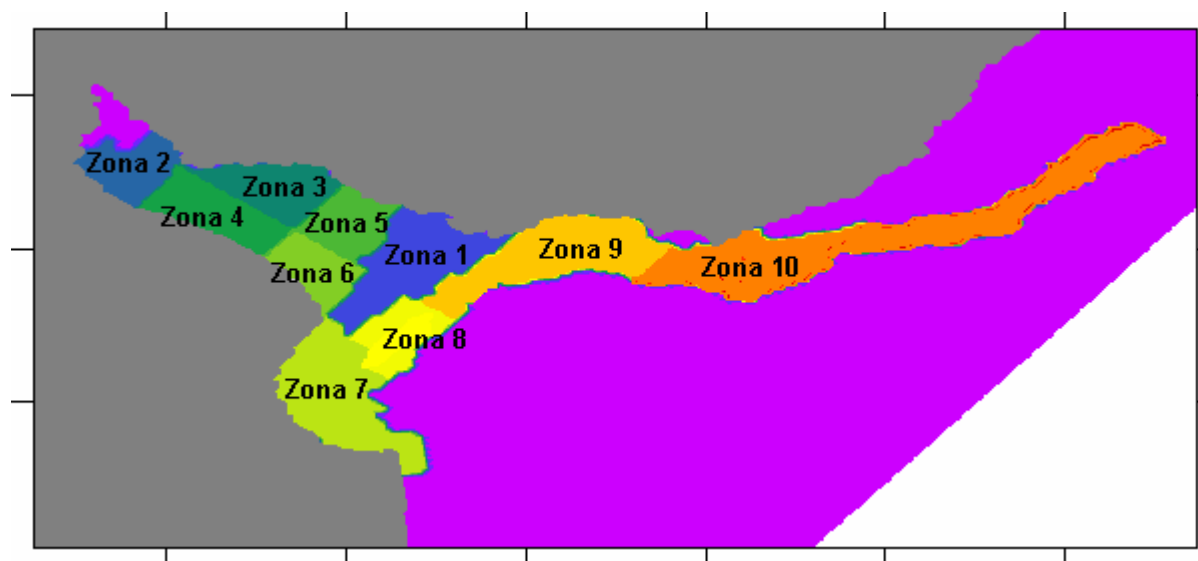


Figura 5.90: Definición de las 10 zonas en las cuales se divide el fondo del Río de la Plata según las características principales de la dinámica de sedimentos finos.

En cada zona se establece el porcentaje de limo y arcilla inicial según la composición establecida por la carta de Laborde. Es importante mencionar ambas zonificaciones no coinciden y por tanto cada zona definida debe subdividirse de forma de contemplar las distintas composiciones según la información histórica de Laborde. Por ejemplo, la zona 1 definida incluye los materiales arcilla limosa (código 6), limo arcilloso (código 5), limo arenoso (código 3) y limo (código 4), y por tanto el porcentaje de fracción limo y fracción arcilla varía según la celda pertenezca a cada código. De esta manera la concentración inicial de cada tipo de material en la zona 1 no es uniforme, cómo se observa en el ejemplo que se presenta en la Figura 5.91. En la misma se observa además

en el resto del dominio inicialmente las variables de la zona 1 tienen asociada una concentración nula.

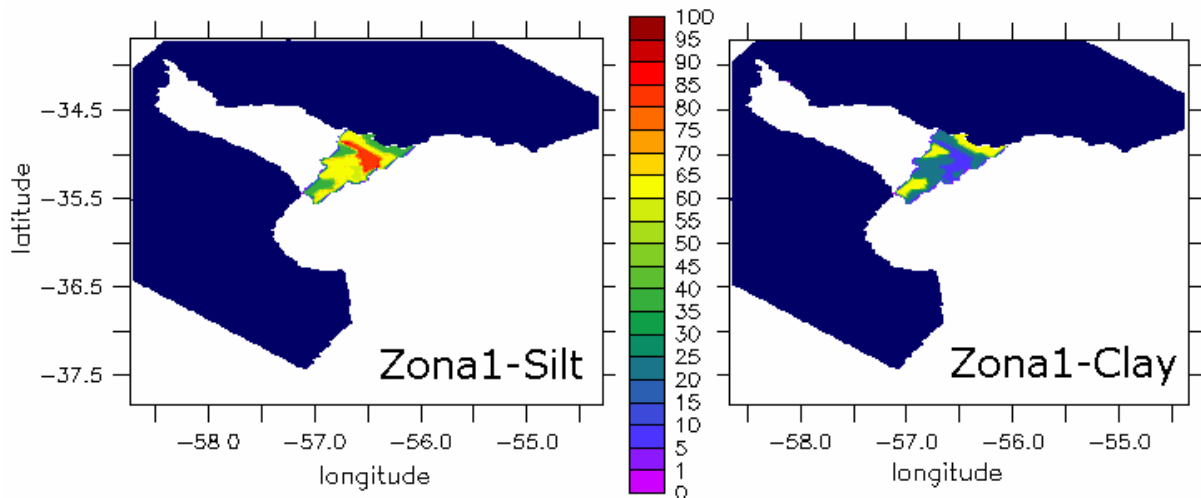


Figura 5.91: Porcentaje inicial del material de fondo tipo limo (panel izquierdo) y tipo arcilla (panel derecho) de la zona 1.

La velocidad de caída del limo y de la arcilla se considera independiente de la zona de origen y por tanto la ley de caída de la fracción limo es la misma para todas las variables de ese tipo y de igual manera sucede para la arcilla. Las leyes utilizadas son las obtenidas luego de la etapa de ajuste del modelo presentadas en el Capítulo 4. El resto de los parámetros del modelo también son los correspondientes a la parametrización final seleccionada luego del ajuste y utilizada en las simulaciones presentadas en este capítulo.

5.4.2. Resultados obtenidos

5.4.2.1. Sedimento en suspensión

Para analizar cómo es la evolución en la columna de agua del sedimento de fondo originario de cada zona se realizan dos tipos de análisis. Por un lado se estudia la variación espacial de las plumas de sedimento en suspensión determinando el área de influencia de las mismas. Por otra parte se estudia la evolución temporal del sedimento en suspensión en las estaciones de control, determinando para cada una de dónde proviene el material que se encuentra en suspensión.

5.4.2.1.1. Variación espacial

Para cada variable limo y arcilla proveniente del fondo de cada una de las 10 zonas definidas se analiza la zona de influencia obtenida para los 10 meses simulados, calculando la concentración en suspensión promedio de los valores máximos mensuales, en la capa de fondo y en la capa de superficie. Se incluyen también los resultados para los sedimentos finos descargados por los tributarios. Para complementar esta información se analiza la evolución temporal de las plumas de concentración de cada material identificando los elementos característicos de los períodos de calma y de tormentas.

Se presentan en primer lugar los resultados obtenidos para el material descargado por los tributarios del Río de la Plata (Figura 5.92). Se observa que el material descargado se encuentra acotado a la zona interior (zona 2) con mayor extensión del material arcilla que alcanza la zona intermedia superior (zonas 3 y 4). Se observa además la influencia de éstos materiales es mayor en la zona central y sobre la

costa uruguaya, no obteniéndose concentraciones del material de los ríos sobre la costa argentina.

En la Figura 5.93 se presentan los resultados obtenidos para los materiales originarios del fondo de la zona 1. Analizando las curvas de valores de concentración medios a altos, se observa tanto para el limo como para la arcilla que dichos materiales se encuentran en una zona acotada similar a la zona 1 definida. Contemplando los valores más bajos (que indicarían algunos eventos excepcionales) se observa la zona de influencia de las arcillas es mayor a la obtenida para el limo, extendiéndose prácticamente en toda la zona exterior (zonas 7, 8 y 9), exceptuando la zona costera de Samborombón. Las diferencias entre el fondo y la superficie son leves para ambas variables. En el caso del limo se observa el material se encuentra principalmente sobre la zona exterior central y sobre la costa uruguaya. Se observa además hay un ingreso de material hacia la zona intermedia, principalmente sobre la costa argentina (zona 6), pero en una zona limitada no alcanzando la zona intermedia superior. Analizando la evolución temporal de las variables se observó que durante los períodos de calma la pluma esta acotada básicamente a la zona sur de la zona 1, con leve transporte en función de la marea hacia la zona intermedia principalmente por la costa argentina, con un ciclo de resuspensión y deposición permanente. En cambio durante las tormentas se produce erosión del material de fondo de toda la zona 1, y dicho material se transporta hacia la zona central exterior y costa uruguaya principalmente.

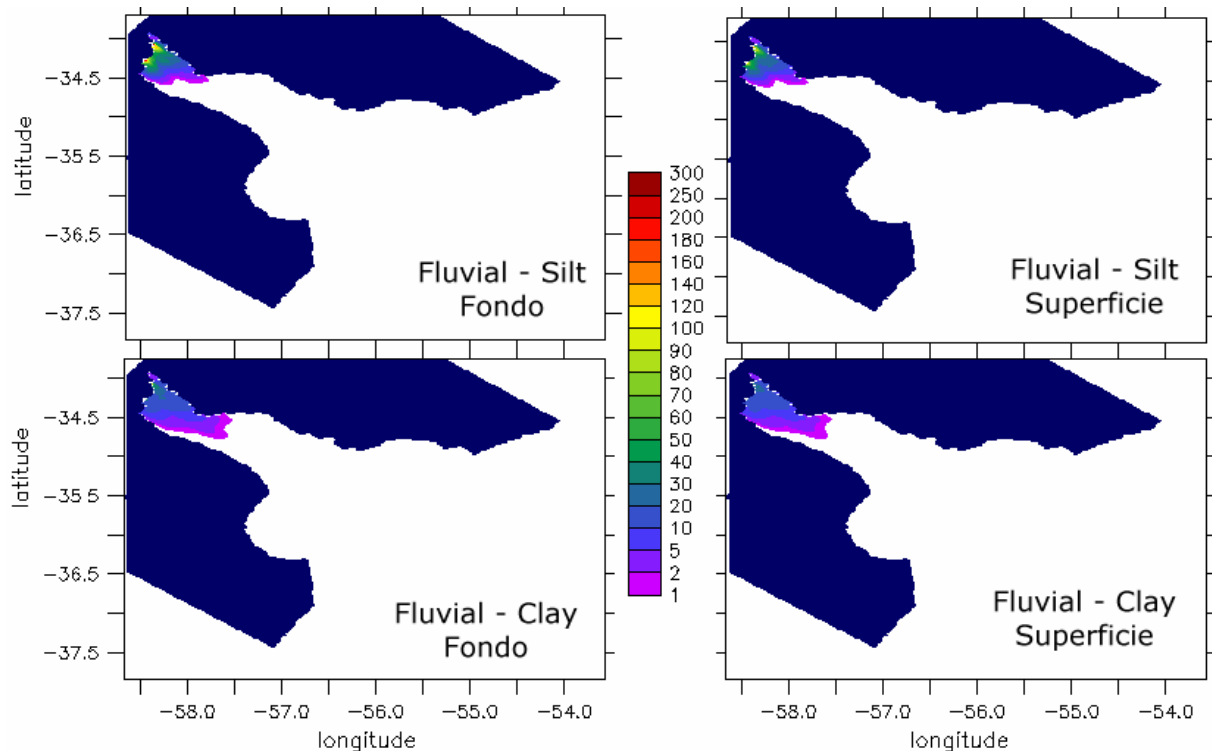


Figura 5.92: Distribución espacial de la concentración de sedimento en suspensión (mg/l) en el fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) para el limo (paneles superiores) y la arcilla (paneles inferiores) provenientes de la descarga fluvial.

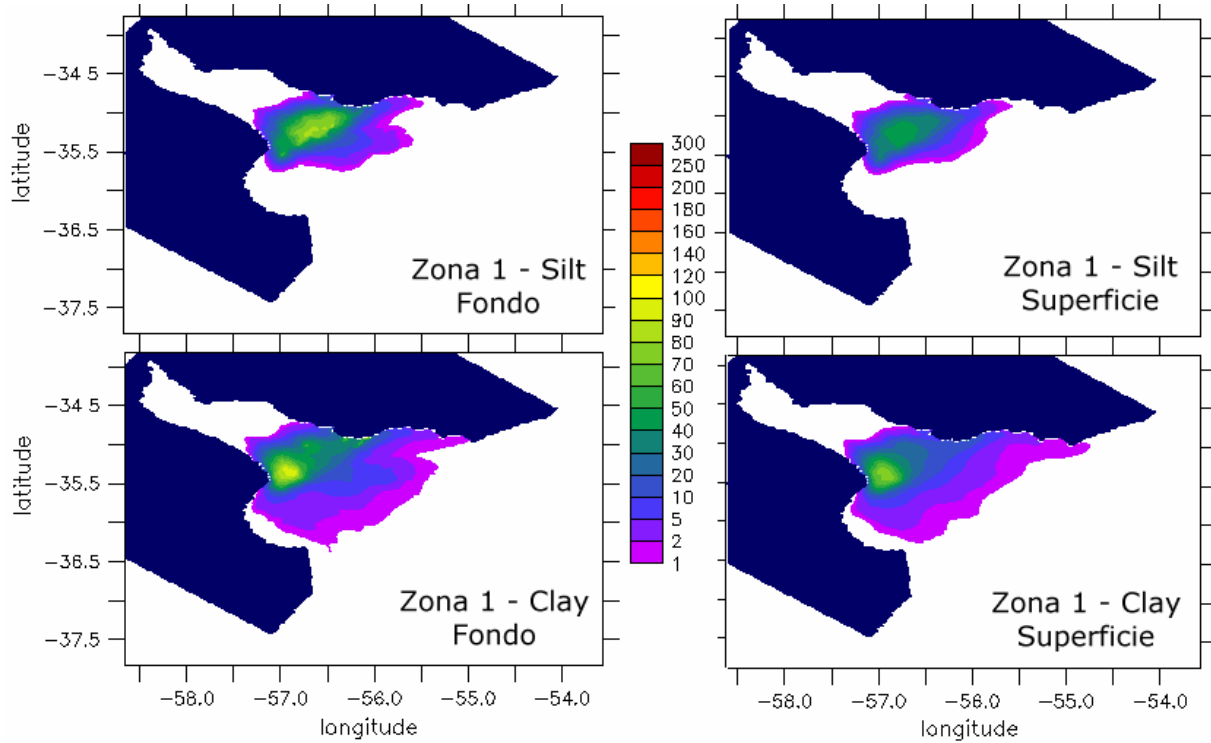


Figura 5.93: Distribución espacial de la concentración de sedimento en suspensión (mg/l) en el fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) para el limo (paneles superiores) y la arcilla (paneles inferiores) provenientes del fondo de la zona 1.

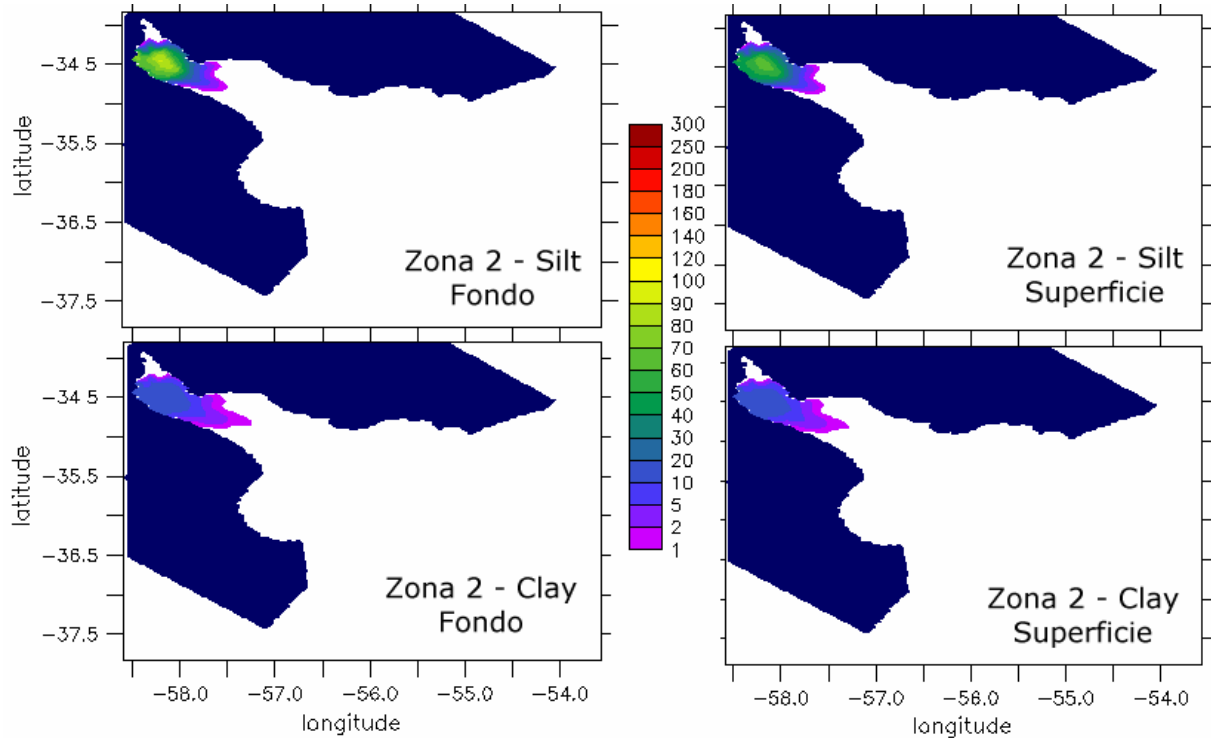


Figura 5.94: Distribución espacial de la concentración de sedimento en suspensión (mg/l) en el fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) para el limo (paneles superiores) y la arcilla (paneles inferiores) provenientes del fondo de la zona 2.

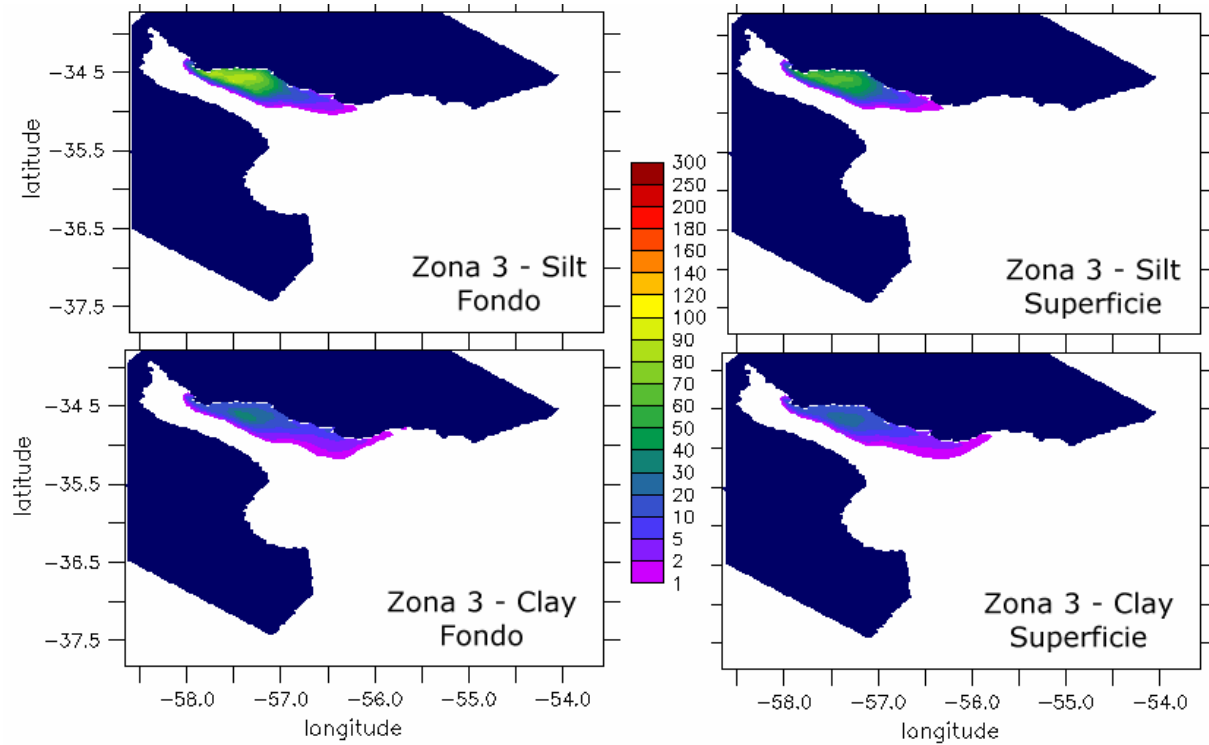


Figura 5.95: Distribución espacial de la concentración de sedimento en suspensión (mg/l) en el fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) para el limo (paneles superiores) y la arcilla (paneles inferiores) provenientes del fondo de la zona 3.

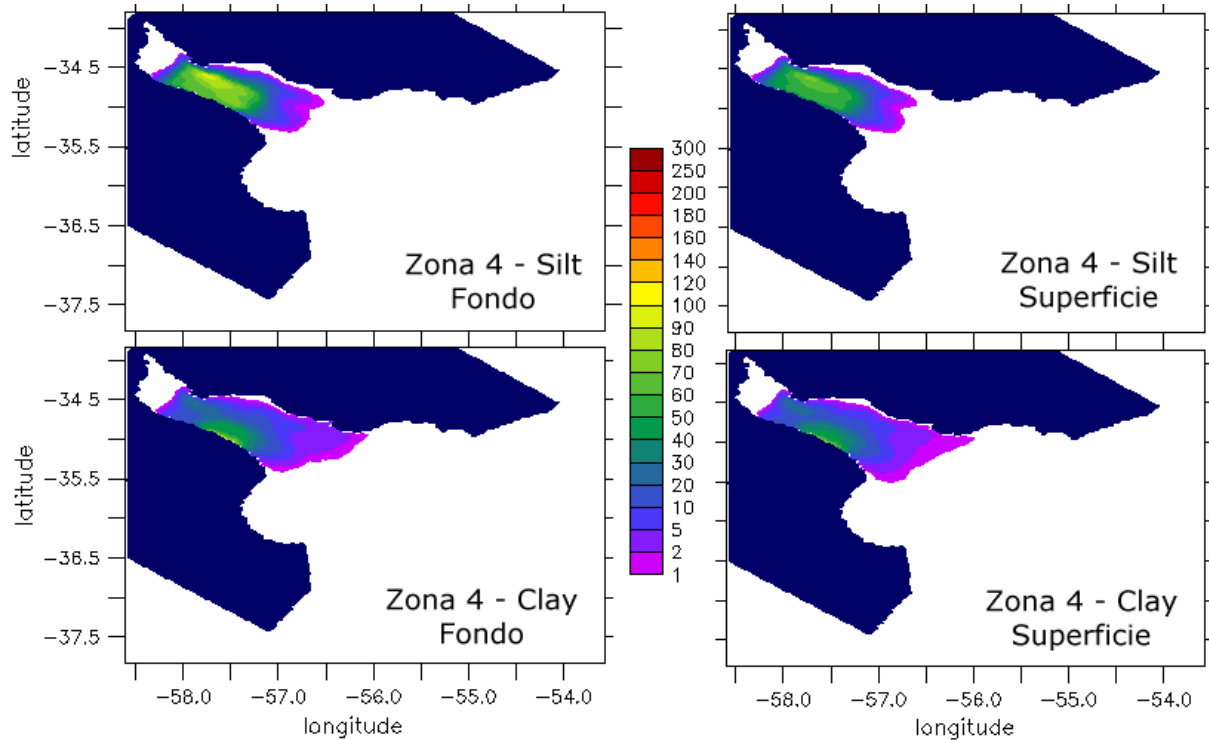


Figura 5.96: Distribución espacial de la concentración de sedimento en suspensión (mg/l) en el fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) para el limo (paneles superiores) y la arcilla (paneles inferiores) provenientes del fondo de la zona 4.

Los resultados obtenidos para el material de fondo de la zona 2 (Figura 5.94) muestran que el material erosionado y puesto en suspensión se transporta principalmente hacia la zona interior inmediata, es decir, las zonas 3 y 4, observándose mayor extensión de la pluma (y por tanto mayor influencia) sobre la zona sur del Río de la Plata intermedio superior (zona 4). Las arcillas en esta zona presentan menor porcentaje en la composición total pero se observa nuevamente alcanzan una extensión mayor a la observada en los limos. La evolución temporal muestra que durante los períodos de calma el material resuspendido permanece en la zona 2 y en situaciones de tormentas (acompañadas en general por condiciones de marea meteorológica) se produce la salida hacia la zona intermedia y un incremento de la cantidad de material en suspensión.

En la Figura 5.95 se presentan los resultados obtenidos para el sedimento de la zona 3. Se observa tanto los limos como las arcillas permanecen en suspensión principalmente en la zona 3, observándose valores bajos de concentración hacia la zona inmediata hacia el exterior, es decir, zona 5, lo que indica que el material en ciertas ocasiones alcanza la costa uruguaya sobre la zona intermedia. Es claro que no hay un transporte transversal de dicho material hacia por ejemplo la costa sur (zona 4). Analizando la variación temporal se observó que durante los períodos de marea hay un ciclo de resuspensión y deposición de material en la zona 3 que permanece acotado a la misma, mientras que durante las tormentas la cantidad de material puesto en suspensión aumenta y se observa mayor transporte asociado a incrementos en la descarga (generados por marea meteorológica) hacia la zona exterior.

En la Figura 5.96 se presentan los resultados obtenidos para el limo y la arcilla provenientes del fondo de la zona 4. Se observa que los materiales originarios de la zona 4 se encuentran en suspensión principalmente sobre dicha zona y sobre las zonas aledañas tanto hacia el interior (zona 2), hacia el norte (zonas 3 y 5), como hacia el exterior (zona 6). Se observa no se alcanza la zona costera uruguaya. El material arcilla presenta una zona de influencia más extendida, alcanzando excepcionalmente la zona del frente (zona 1). Al analizar el detalle de la evolución temporal se observó que durante los períodos de calma el material se resuspende y transporta en sentido longitudinal según las corrientes de marea hacia el interior y hacia el exterior, pero también se observó permanentemente una extensión de la pluma hacia la costa uruguaya, lo que indica una componente de transporte transversal. En los eventos de tormenta se observó mayor cantidad de sedimento en suspensión y debido a la mayor descarga que ocurre posteriormente a la misma por los niveles altos de marea meteorológica se observa que el material se transporta hacia la zona intermedia inferior. Este material podrá posteriormente ser resuspendido y transportarse en otro evento hacia la zona del frente.

Los resultados obtenidos para el material de fondo originario de la zona 5 (Figura 5.97) muestran que el mismo permanece acotado principalmente a la zona 5 y zonas aledañas sobre la costa uruguaya (zonas 3 y 1), con un leve transporte hacia la costa argentina. Valores bajos de concentración muestran que excepcionalmente durante ciertos eventos la arcilla de la zona 4 alcanza la zona exterior central del Río de la Plata (zona 8) y la costa uruguaya exterior (zona 9). La evolución temporal mostró que en situaciones de calma la dinámica del sedimento en la zona consiste en un ciclo de resuspensión, transporte longitudinal y deposición, gobernado por las corrientes de marea y con un transporte neto de material hacia el exterior (zona 1). Durante las tormentas se incrementa el material en suspensión y la consecuente pluma de descarga hacia la zona 1; según las características de la tormenta y del campo salino se observó eventualmente una descarga del material de la zona 5 hacia la zona costera uruguaya exterior.

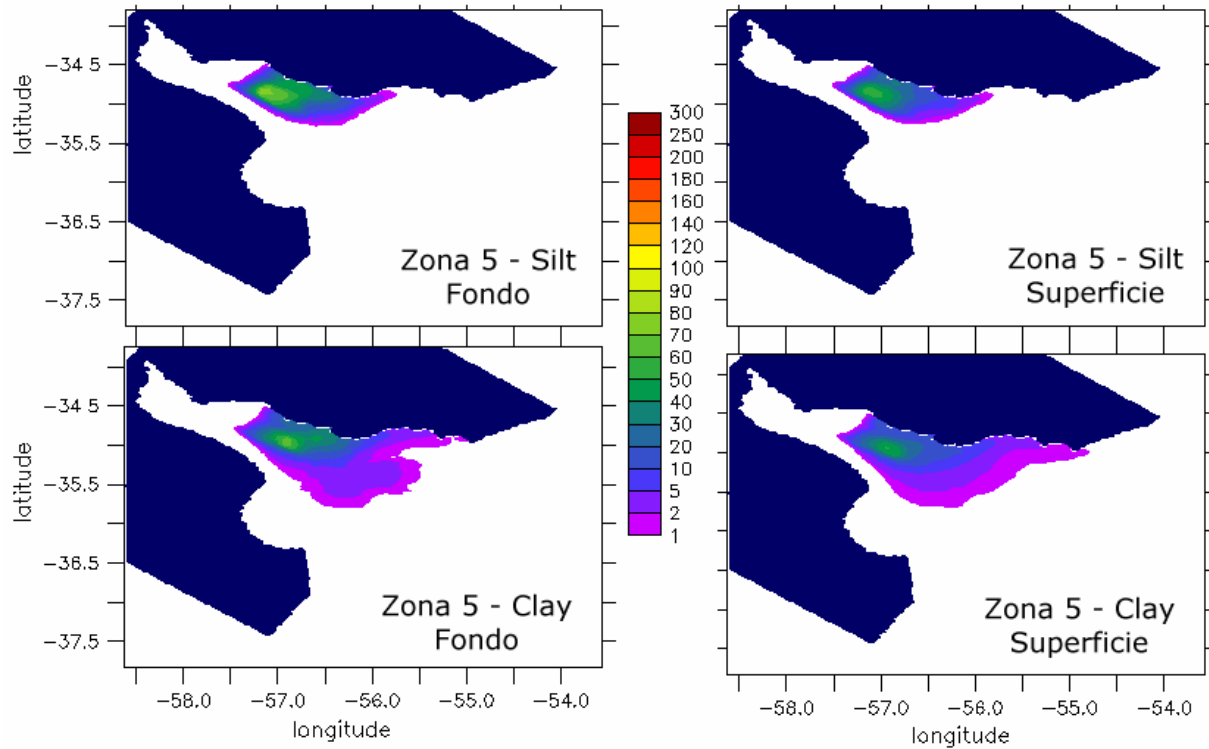


Figura 5.97: Distribución espacial de la concentración de sedimento en suspensión (mg/l) en el fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) para el limo (paneles superiores) y la arcilla (paneles inferiores) provenientes del fondo de la zona 5.

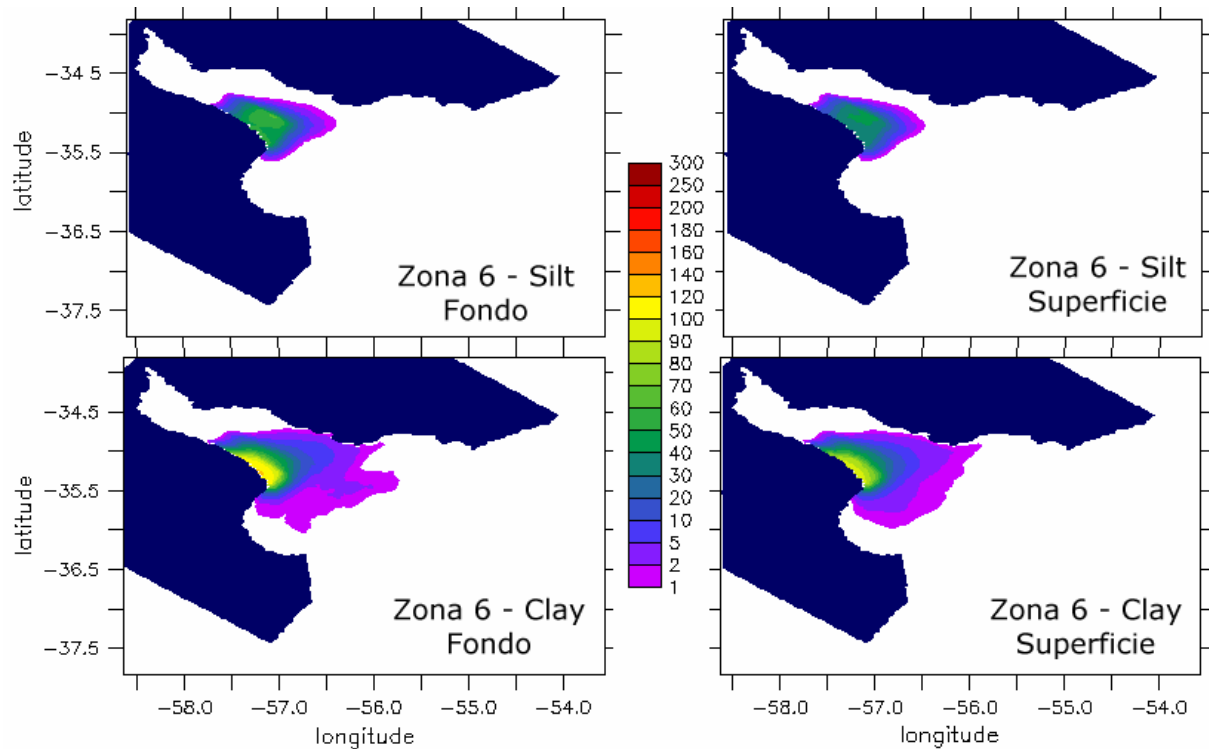


Figura 5.98: Distribución espacial de la concentración de sedimento en suspensión (mg/l) en el fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) para el limo (paneles superiores) y la arcilla (paneles inferiores) provenientes del fondo de la zona 6.

Los resultados obtenidos para el sedimento de fondo de la zona 6 (Figura 5.98) muestra una acumulación del material en suspensión en la propia zona 6, con leve intercambio por transporte hacia la zona 4 ubicada hacia la zona intermedia superior, y la zona 1 ubicada hacia el exterior. Se observa una mayor expansión por la zona central hacia el exterior, siendo limitado el transporte hacia el exterior por la zona sur del Río de la Plata. Esto se observó principalmente al analizar la evolución temporal; durante los períodos de calma el sedimento resuspendido por las corrientes de marea permanece en la zona transportándose según las corrientes en sentido longitudinal y depositando principalmente en la propia zona 6. Durante los eventos se observaron mayores descargas de material por la zona central intermedia y exterior.

En la Figura 5.99 se presentan los resultados obtenidos para la zona 7. Es importante aclarar que en la figura se presentan las plumas en un dominio acotado y por eso se observa un corte de las mismas hacia la zona sur. Se observa el material tipo limo en suspensión permanece acotado a la zona 7 principalmente con algo de transporte hacia la zona 6 por la zona costera argentina, y a las zonas 1 y 8. Se observa también una descarga neta de sedimento por la zona costera sur de la zona 7. La arcilla presenta el mismo comportamiento con una mayor extensión hacia las mismas zonas con mayor transporte en el fondo hacia la zona central del Río de la Plata. Analizando la variación temporal se observó que durante los períodos de calma sobre la zona de Punta Rasa y Punta Piedras en general hay una resuspensión permanente de material que se incrementa durante las tormentas, siendo el transporte neto de material de la zona 7 principalmente hacia el exterior por la zona costera sur, con muy leve intercambio hacia la zona central del Río de la Plata.

Los resultados obtenidos para el sedimento de fondo originario de la zona 8 (Figura 5.100) muestran que en suspensión tanto el limo como la arcilla permanecen en la misma zona pero también se transportan a una zona más amplia, incluyendo las zonas 1, 7, 9 y hacia el exterior del Río de la Plata. Incluso se observa cierto ingreso hasta la zona 6. Nuevamente se observa la zona de influencia de la arcilla es un poco mayor a la del limo, y se observan leves diferencias entre fondo y superficie. Analizando la variación temporal se observó que durante los períodos de marea prácticamente no hay resuspensión de material en esta zona. La misma ocurre en las tormentas. Mucho material se transporta y vuelve a depositar en la misma zona pero también parte del material es transportado por las mayores corrientes (tanto en fondo como en superficie) que existen en la zona exterior durante estos eventos, alcanzando la zona intermedia o la zona exterior según indican las plumas presentadas. La arcilla permanece más tiempo en suspensión y por tanto presenta mayores posibilidades de ser transportada por el flujo.

Los resultados obtenidos para el material de fondo de la zona 9 (Figura 5.101) muestran por un lado una gran concentración en la misma zona 9 pero a su vez un transporte hacia varias zonas aledañas tanto del limo como de las arcillas. Por una parte hay un transporte hacia la zona intermedia sobre la costa uruguaya (zona 1), hacia la zona central (zona 8) y la zona costera uruguaya exterior (zona 10). Este último caso indica una descarga de material por la costa norte hacia el Océano. Se observa una mayor influencia o transporte de las arcillas principalmente hacia la zona central exterior del Río de la Plata sobre el fondo. Las diferencias de concentraciones entre la superficie y el fondo responden a la estratificación vertical identificada anteriormente en este capítulo en esta zona. El análisis temporal mostró que durante los períodos de marea no hay casi intercambio entre la columna de agua y el material de fondo en esta zona, siendo durante los eventos de tormenta donde se produce la erosión y el posterior transporte del mismo, según el patrón anteriormente mencionado.

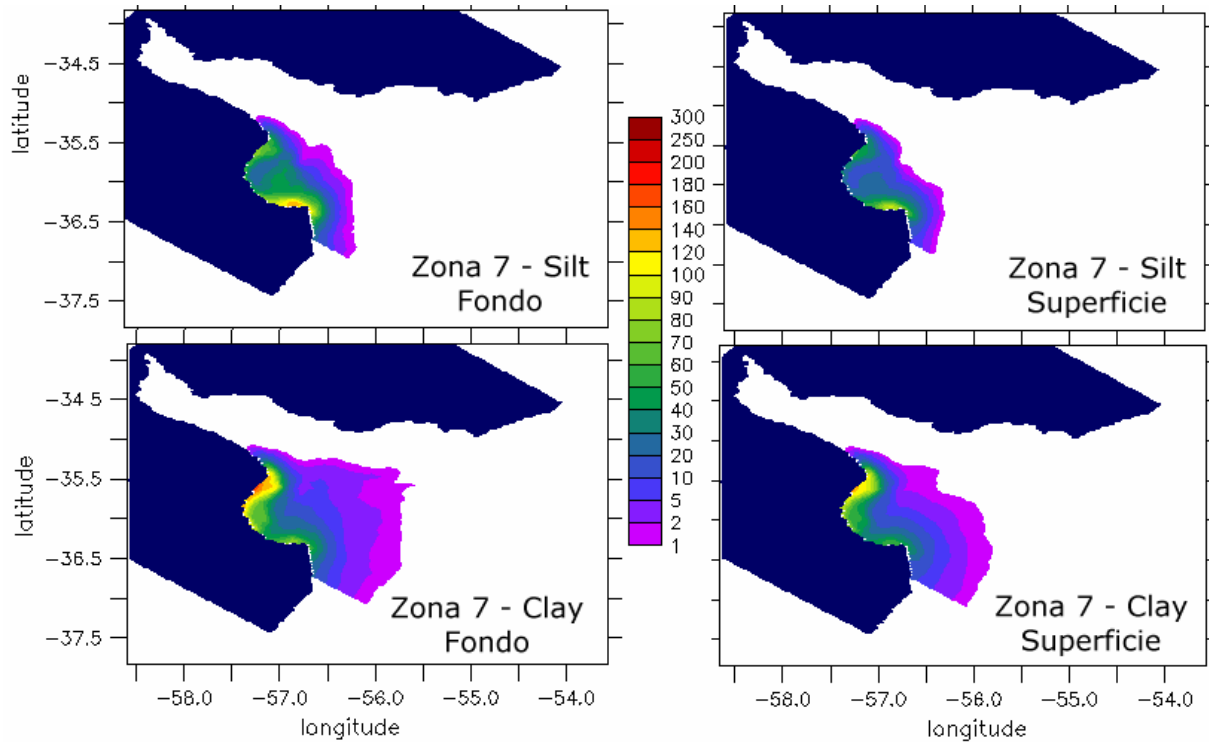


Figura 5.99: Distribución espacial de la concentración de sedimento en suspensión (mg/l) en el fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) para el limo (paneles superiores) y la arcilla (paneles inferiores) provenientes del fondo de la zona 7.

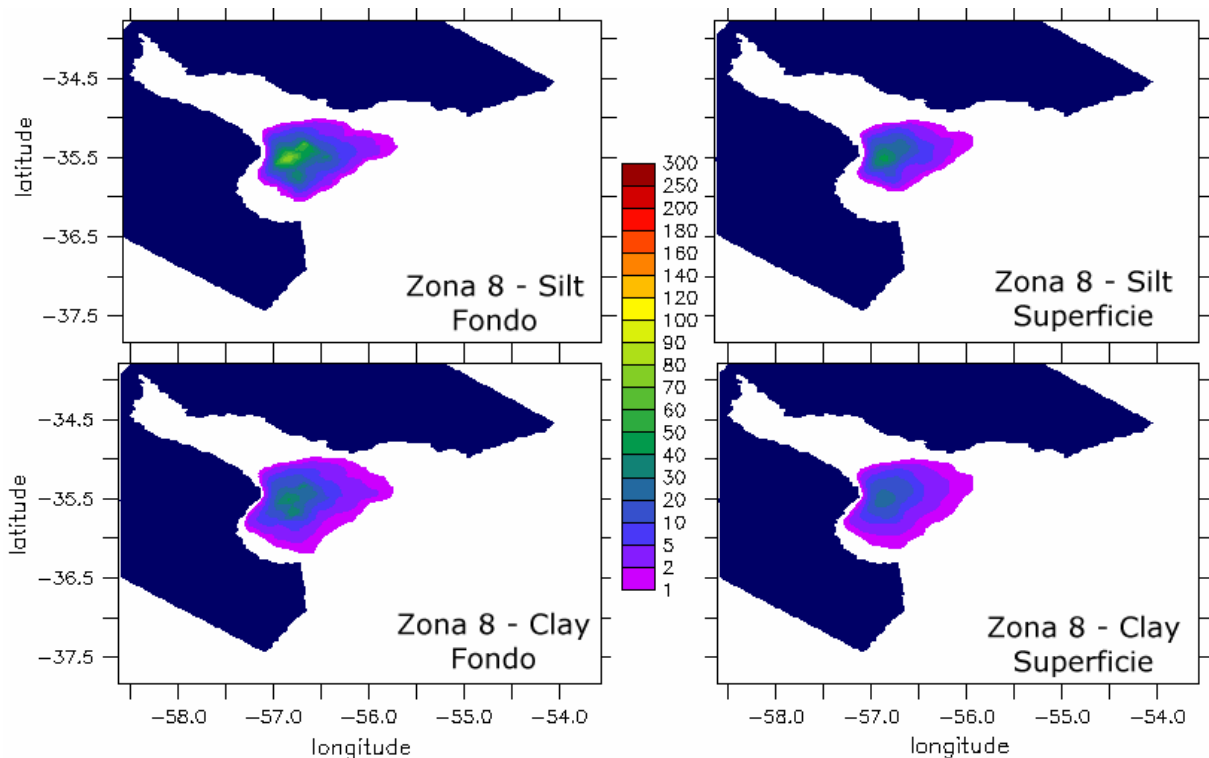


Figura 5.100: Distribución espacial de la concentración de sedimento en suspensión (mg/l) en el fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) para el limo (paneles superiores) y la arcilla (paneles inferiores) provenientes del fondo de la zona 8.

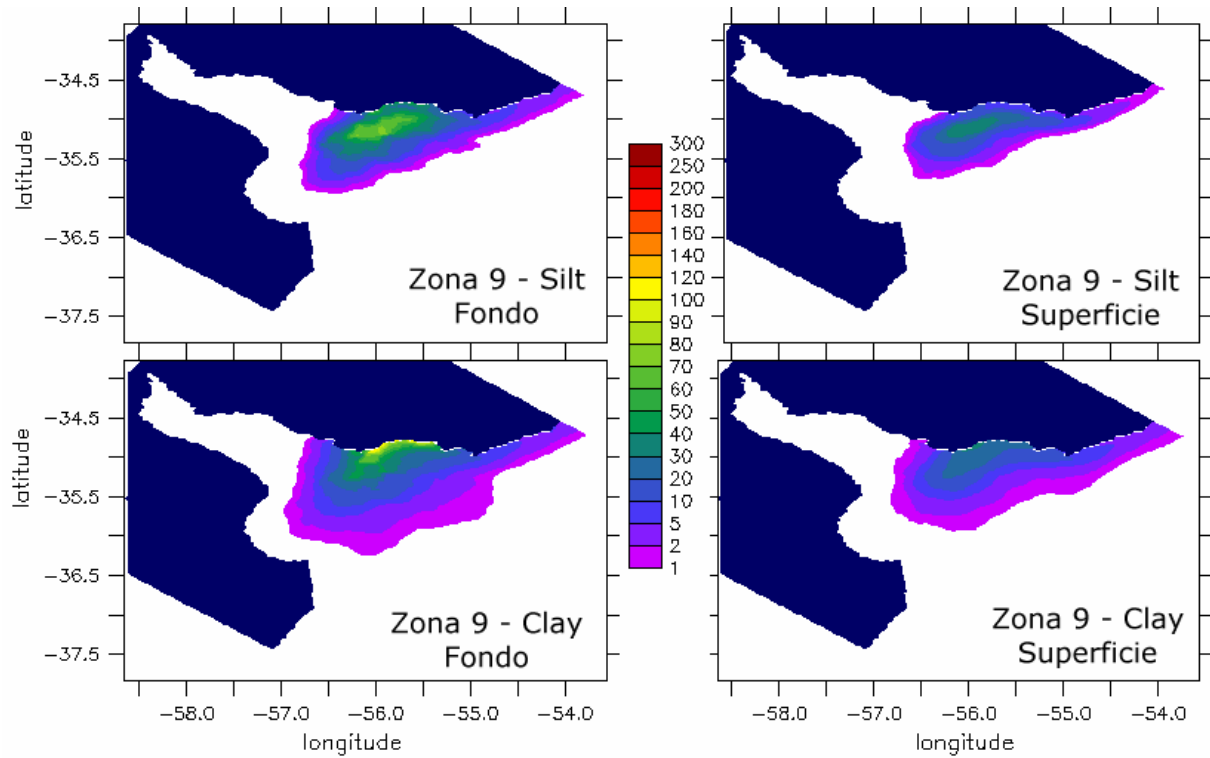


Figura 5.101: Distribución espacial de la concentración de sedimento en suspensión (mg/l) en el fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) para el limo (paneles superiores) y la arcilla (paneles inferiores) provenientes del fondo de la zona 9.

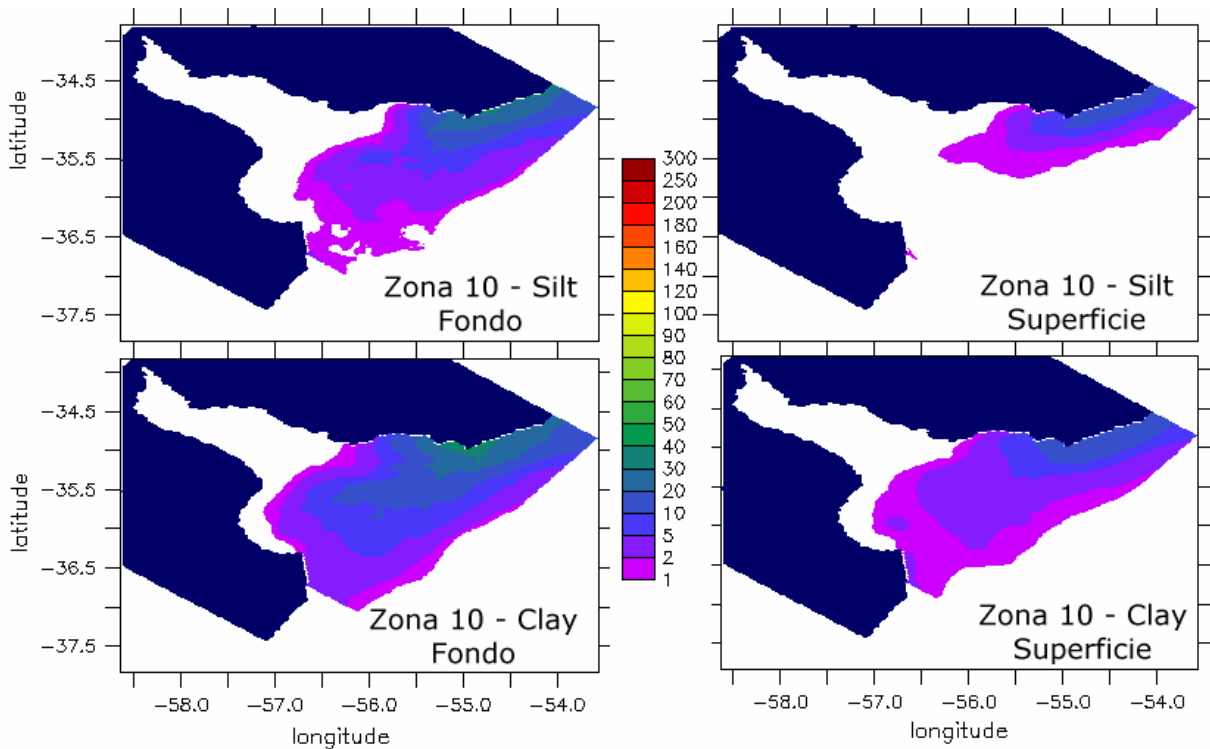


Figura 5.102: Distribución espacial de la concentración de sedimento en suspensión (mg/l) en el fondo (paneles izquierdos) y en superficie (paneles derechos) para el limo (paneles superiores) y la arcilla (paneles inferiores) provenientes del fondo de la zona 10.

Por último, en la Figura 5.102 se presentan los resultados obtenidos para el material de fondo de la zona 10. Se observa que el limo y la arcilla de dicha zona se encuentran en suspensión en una zona ampliamente mayor a la misma, lo que indica un gran transporte. Analizando la variación temporal se observó que estos procesos ocurren durante los eventos de tormenta, donde el material es resuspendido y luego transportado por las corrientes de fondo, y según las condiciones verticales es posible también un transporte de material en las capas superficiales. Se observa hay un transporte por la costa uruguaya hacia la zona 9, y un transporte hacia la zona central, alcanzando eventualmente incluso la zona 8 y la zona 7 de la Bahía de Samborombón. Esto indica un ingreso de material desde la zona exterior hacia el Río de la Plata durante los eventos extremos. Las arcillas sobre el fondo son las que presentan el mayor transporte.

5.4.2.1.2. Variación temporal

En esta sección se analiza para cada estación de control de dónde proviene el material en suspensión que se observa en cada una, es decir, como está conformado el sedimento en suspensión. Se utiliza como ejemplo el mes de setiembre de 2009, ya que durante el mismo ocurrieron varios eventos de tormenta en la zona intercalados entre los períodos de calma dominados por marea. Para cada estación se presenta la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión marcando las fracciones de la misma según la zona de origen del sedimento.

En la Figura 5.103 se presentan los resultados obtenidos para las estaciones interiores #1, #2, #3, #5 y #6 en la capa de fondo; los resultados en la capa de superficie muestran la misma composición, siendo las concentraciones levemente menores según los resultados anteriormente presentados. Las estaciones #1 y #2 son cercanas estando la primera ubicada hacia la costa argentina y la segunda hacia la costa uruguaya, ambas en la zona 2. En ambas se observa que predomina el limo resuspendido en la zona 2, seguido de la arcilla resuspendida en dicha zona, y también se observa un porcentaje pequeño del limo y de la arcilla proveniente de los aportes fluviales. En la estación #2 se observa además un leve porcentaje de material proveniente de la zona 4 (tanto limo como arcilla) ubicada en la zona intermedia del Río de la Plata, lo que muestra cierto ingreso durante el ciclo de marea de material de la zona 4 a la zona 2. La estación #3 (Pilote Norden) se ubica sobre la zona 4 y el material proveniente de la misma conforma la mayor parte del sedimento que se encuentra en suspensión (limo y arcilla). Se observa además una componente alta de limo y arcilla proveniente de la zona 2, y un aporte también del material en suspensión descargado por los tributarios. La estación #5 se ubica en la zona 3 cerca del límite con la zona 4 sobre el eje del Río de la Plata y la estación #6 se ubica en la zona 4. El limo de la zona 4 es el material predominante en ambas estaciones seguido por la arcilla de la zona 4. Se observa también en ambas estaciones un leve porcentaje de la arcilla descargada por los tributarios, no observándose limo proveniente de los mismos. En la estación #6 se observa además cierto porcentaje de material proveniente de la zona 2 (limo y arcilla), mientras que en la estación #5 solamente se observa arcilla de la zona 2 y en cambio se observa un leve porcentaje de material proveniente de la zona 3 (limo y arcilla).

En la Figura 5.104 se presentan los resultados obtenidos para las estaciones intermedias #7, #8, #9 y #10 para la capa de fondo, siendo similares los resultados en cuanto a composición obtenidos para la capa de superficie. La estación #7 se ubica en la zona 6 hacia la costa argentina muy cerca de la zona 4. Se observa el material en suspensión está compuesto por limo y arcilla de la zona 4, lo que muestra un transporte de material proveniente de dicha zona, con un alto porcentaje de limo y arcilla de la zona 6. Se observa también el porcentaje de dicho material varía durante el período analizado en función de las condiciones de marea o de tormenta.

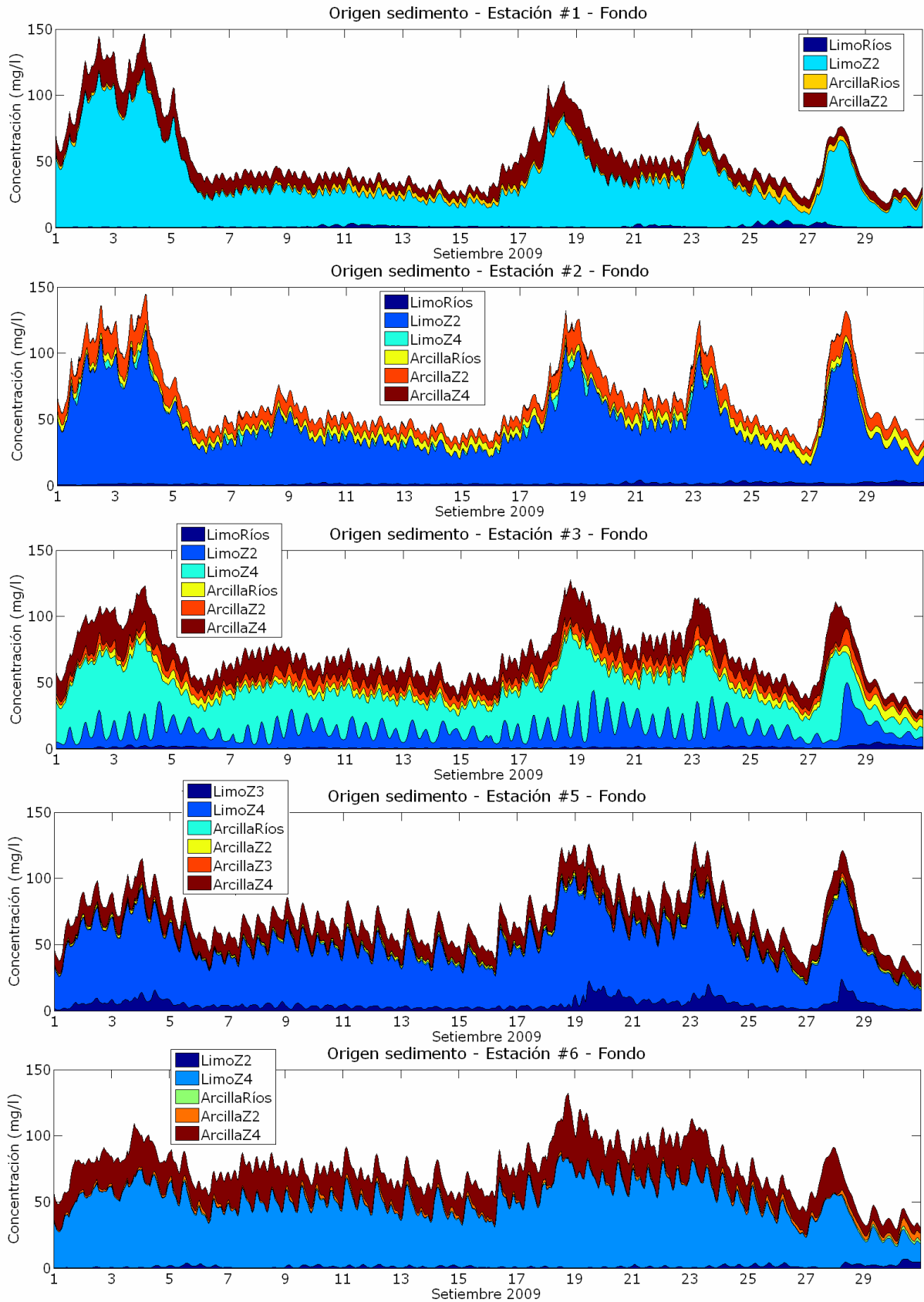


Figura 5.103: Variación temporal de la concentración de sedimento en suspensión diferenciando según la zona de origen en la capa de fondo en las estaciones interiores #1, #2, #3, #5 y #6. Setiembre 2009.

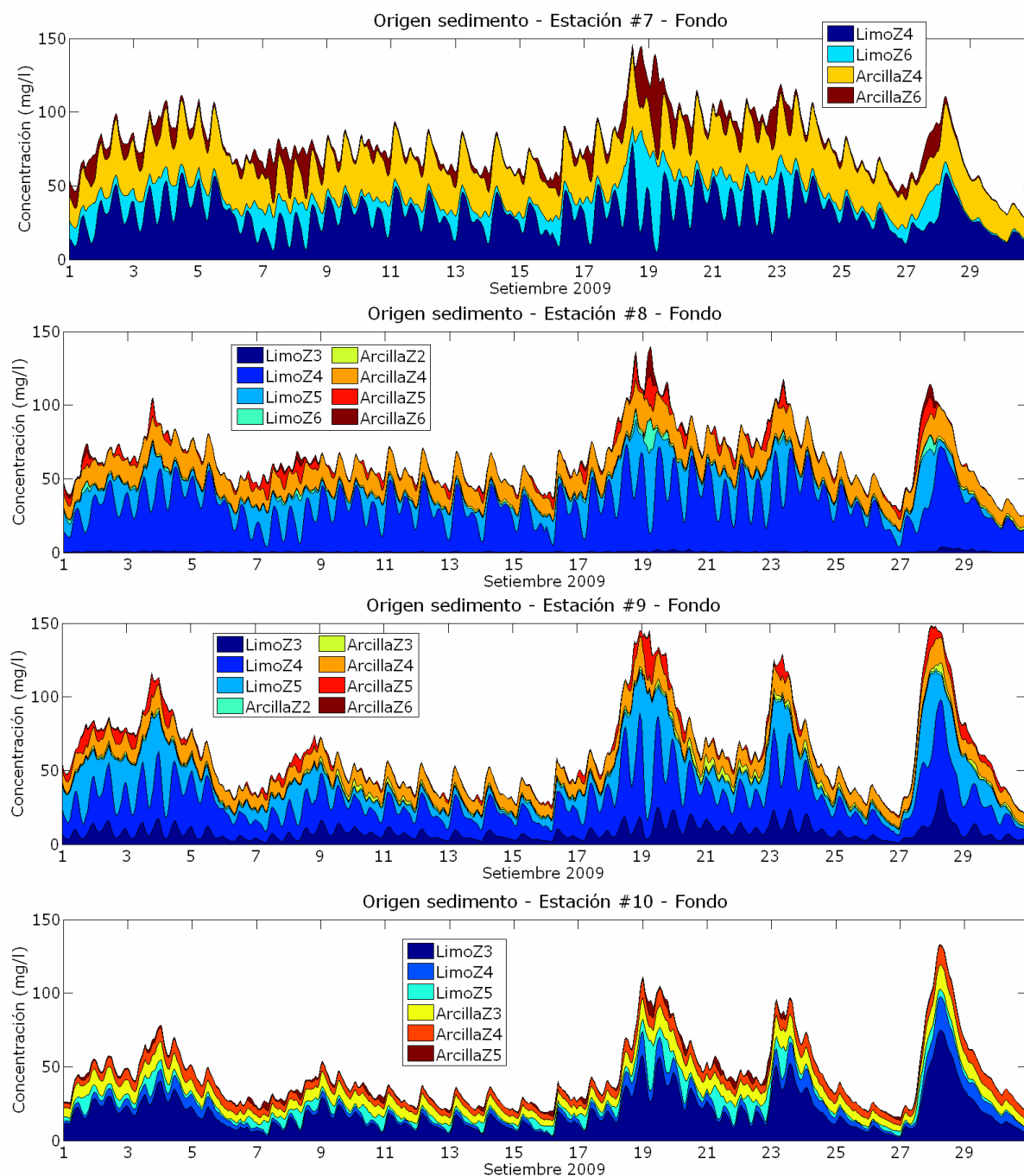


Figura 5.104: Variación temporal de la concentración de sedimento en suspensión diferenciando según la zona de origen en la capa de fondo en las estaciones intermedias #7, #8, #9 y #10. Setiembre 2009.

En la estación #8 ubicada sobre la zona 5 muy cerca al límite con las zonas 3, 4 y 6, se observa un alto porcentaje de limo y arcilla proveniente de la zona 4, cierto porcentaje de limo y arcilla de la zona 5, y leves porcentajes de material de la zona 6 principalmente durante períodos de incremento de concentración por tormentas. Se observan también muy bajos porcentajes de limo proveniente de la zona 3 y arcilla proveniente de la zona 2, resultado probablemente del transporte en base a ciclos de deposición en la zona 4 y resuspensión sucesivos. En la estación #9 ubicada entre el eje del Río de la Plata y la costa uruguaya sobre la zona 5 muy cerca del límite con la zona 3 se observa una mezcla de materiales (limo y arcilla) provenientes de las zonas 3, 4, 5, y arcilla proveniente de la zona 2 y de la zona 6. Por último, en la estación #10 ubicada

cerca de la costa uruguaya en la zona 5 muy cerca al límite de la zona 3 se observa principalmente material tipo limo de la zona 3, junto con material proveniente de las zonas 4 y 5.

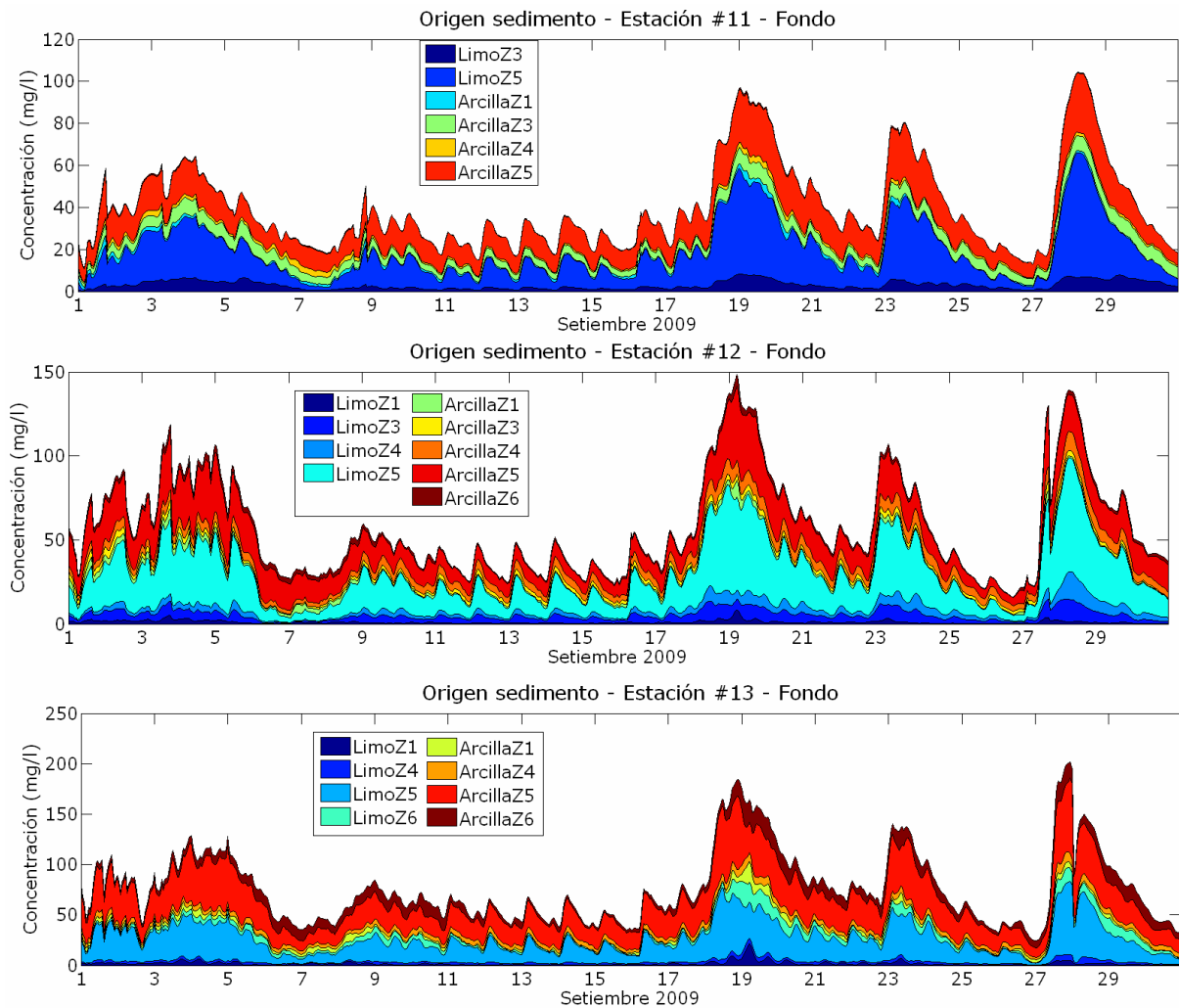


Figura 5.105: Variación temporal de la concentración de sedimento en suspensión diferenciando según la zona de origen en la capa de fondo en las estaciones intermedias #11, #12 y #13. Setiembre 2009.

Los resultados obtenidos en las estaciones de control #11, #12 y #13 de la zona intermedia se presentan en la Figura 5.105. Se observa en la estación #11, ubicada en la zona 1 cerca del límite con la zona 5, el mayor aporte proviene del material de la zona 5, tanto limo como arcilla, observándose también material transportado desde la zona 3. Muy bajos porcentajes se observan de material tipo arcilla de la zona 1 y de la zona 4. En la estación #12, también ubicada sobre la zona 1 cerca del límite con la zona 5, se observa la principal proporción de material proviene de la zona 5 (limo y arcilla). Además, se observan leves aportes de limo y arcilla de la zona 1 y de las zonas aledañas 3 y 4, y arcilla de la zona 5. En la estación #13 ubicada en la zona 5 sobre el eje del Río de la Plata se observa una gran proporción de limo y arcilla de la zona 5, y menores porcentajes de limo y arcilla de las zonas 1, 4 y 6, los cuales se incrementan principalmente durante los eventos. Los resultados obtenidos en las restantes estaciones de control de la zona intermedia, #14, #15, y #15bis (Torre Oyarvide) se presentan en la Figura 5.106. En la estación #14 ubicada sobre la zona 6 predomina el limo y la arcilla proveniente de dicha zona, observándose también aporte de material de la zona 1

(ubicada hacia el exterior) y de la zona 4 (ubicada hacia el interior) casi permanentemente, y algo de material proveniente de la zona 5 algunos instantes. En la estación #15 también ubicada en la zona 6 pero cercana a la costa argentina se observa que el material predominante son los limos y las arcillas de dicha zona, con aportes de limo y arcilla de la zona 1 de forma permanente, con aportes algunos instantes de material de la zona 4 (limo y arcilla), y aportes en algunos instantes con bajo porcentaje de material desde las zonas exteriores 7 y 8. Esto indica cierto ingreso de material desde la zona exterior a la zona intermedia. Por último, en la estación de control #15bis ubicada en la zona 6, además del material de dicha zona que predomina, se observa un aporte de material desde las zonas 1 y 4 aledañas de forma permanente, y un muy bajo porcentaje de arcilla de la zona 5 al inicio del mes.

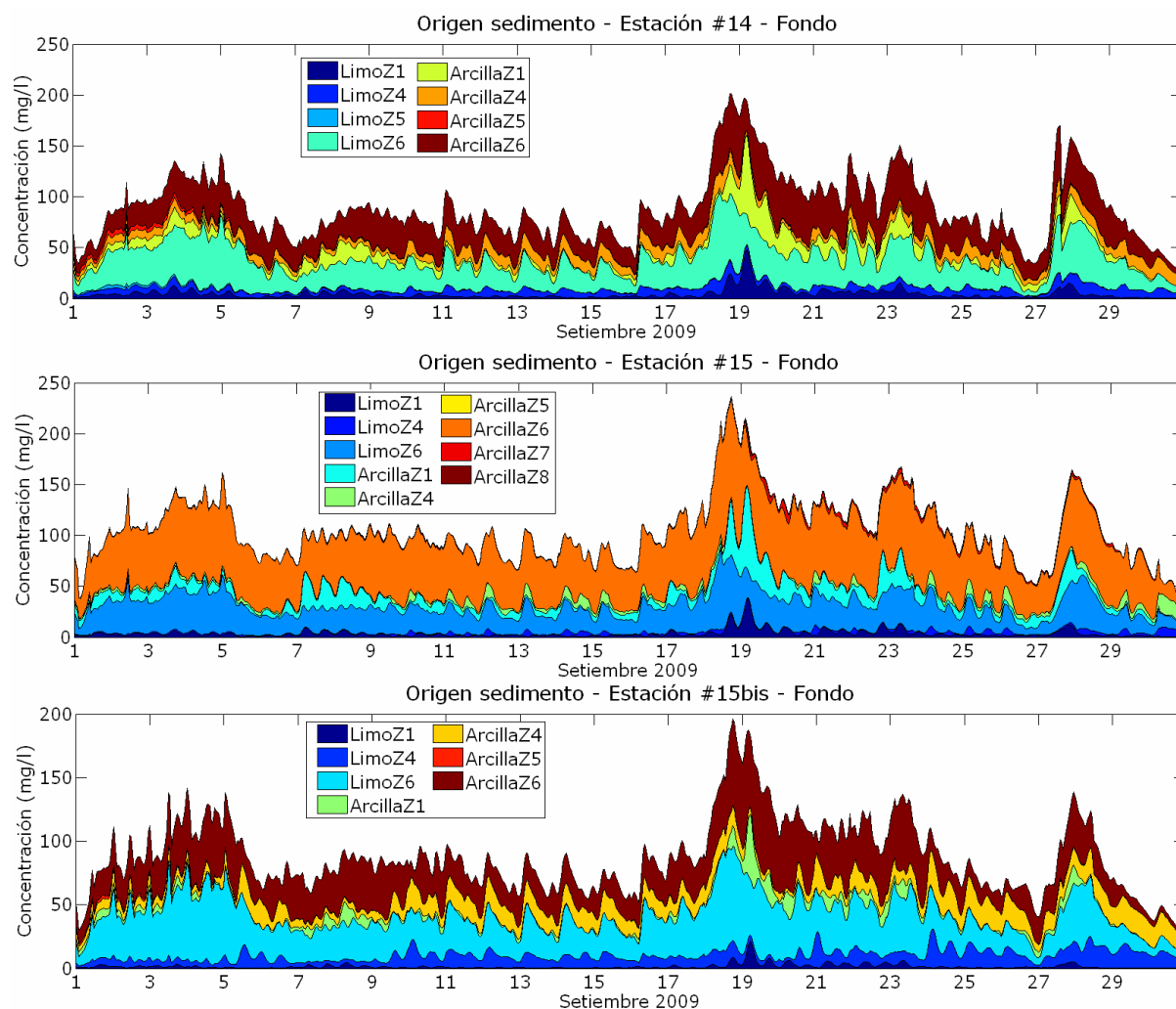


Figura 5.106: Variación temporal de la concentración de sedimento en suspensión diferenciando según la zona de origen en la capa de fondo en las estaciones intermedias #14, #15 y #15bis. Setiembre 2009.

En la Figura 5.107 se presentan los resultados obtenidos (tanto en la capa de fondo como en la de superficie) para la estación #16 ubicada en la zona 1. Se observa el material predominante es el correspondiente a su ubicación, es decir, limo y arcilla de la zona 1. Con aportes importantes permanentes se observa también material tipo arcilla proveniente de la zona 5 ubicada en la zona intermedia hacia la costa uruguaya y de la zona 8 del exterior. Con valores levemente menores se observan aportes de limo y arcilla de las zonas 4 y 6, y arcilla de la zona 7. Se observa además en la capa de superficie las

arcillas presentan componentes importantes del material en suspensión mayores a las de fondo en ciertos períodos, como por ejemplo alrededor del día 27. Los resultados obtenidos para la estación #17 ubicada sobre el eje del Río hacia el exterior también en la zona 1 se presentan en la Figura 5.108. Se observa que confluyen en esta estación material de diversas zonas. Por un lado predomina el limo y la arcilla de la zona 1, seguido del aporte levemente menor de limo y arcilla de la zona 8, y de arcilla de las zonas intermedias 5 y 6. Por último muy bajos aportes se observan de limo de la zona 6 y de la zona 9, y de arcilla de las zonas 4, 7, 9 y 10. Se observan diferencias en los materiales de menor porcentaje entre el fondo y la superficie, siendo más destacable el aporte en superficie del material de las zonas intermedias 5 y 6.

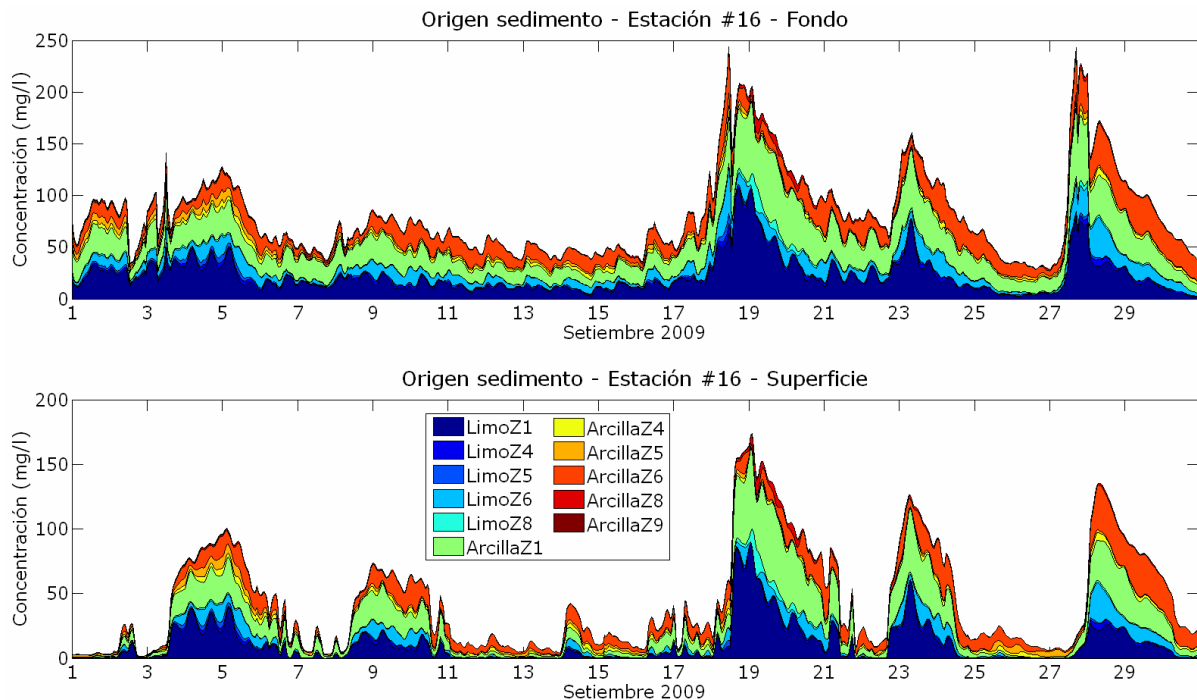


Figura 5.107: Variación temporal de la concentración de sedimento en suspensión diferenciando según la zona de origen en la capa de fondo (panel superior) y en la capa de superficie (panel inferior) en la estación #16. Setiembre 2009.

En la Figura 5.109 se presentan los resultados obtenidos para la estación #18 ubicada en la zona exterior central del Río de la Plata en la zona 9. Se observa en esta estación el sedimento en suspensión proviene de varias zonas, con un aporte importante de limo y arcilla de la zona 9, y con un comportamiento diferente en la capa de fondo y la capa de superficie. En el fondo, se observan proporciones similares de aporte de limo y arcilla de las zonas 1, 8, y 9; algo de aporte de arcilla de las zonas 5 y 6, y muy leves valores de sedimento tipo arcilla de la zona 4, 7 y 10. En superficie en cambio se observa mayor aporte en proporción de los materiales arcillosos de las zonas superiores 1, 4, 5 y 6. La gran variación temporal muestra los distintos tipos de transporte que pueden existir en la zona, los cuales generan plumas de sedimento en suspensión (principalmente arcilloso) de gran variabilidad.

Los resultados obtenidos en la estación exterior #19 se presentan en la Figura 5.110. Esta estación está ubicada en la zona donde no se ingresó material fino de fondo inicialmente en el modelo. Se observa que el modelo muestra aportes a dicha estación desde una gran diversidad de zonas, siendo principalmente del tipo arcilloso. En el fondo se observa un aporte permanente de limo de la zona 9 y arcilla de la zona 8, con menores proporciones de limo de la zona 8, limo de la zona 7 y arcilla de la zona 1. Aportes

menores se observan de material tipo limo de la zona 1 y, de las arcillas de las zonas 5, 6 y 7. En la superficie se observa también una gran mezcla de materiales destacándose principalmente los del tipo arcilloso.

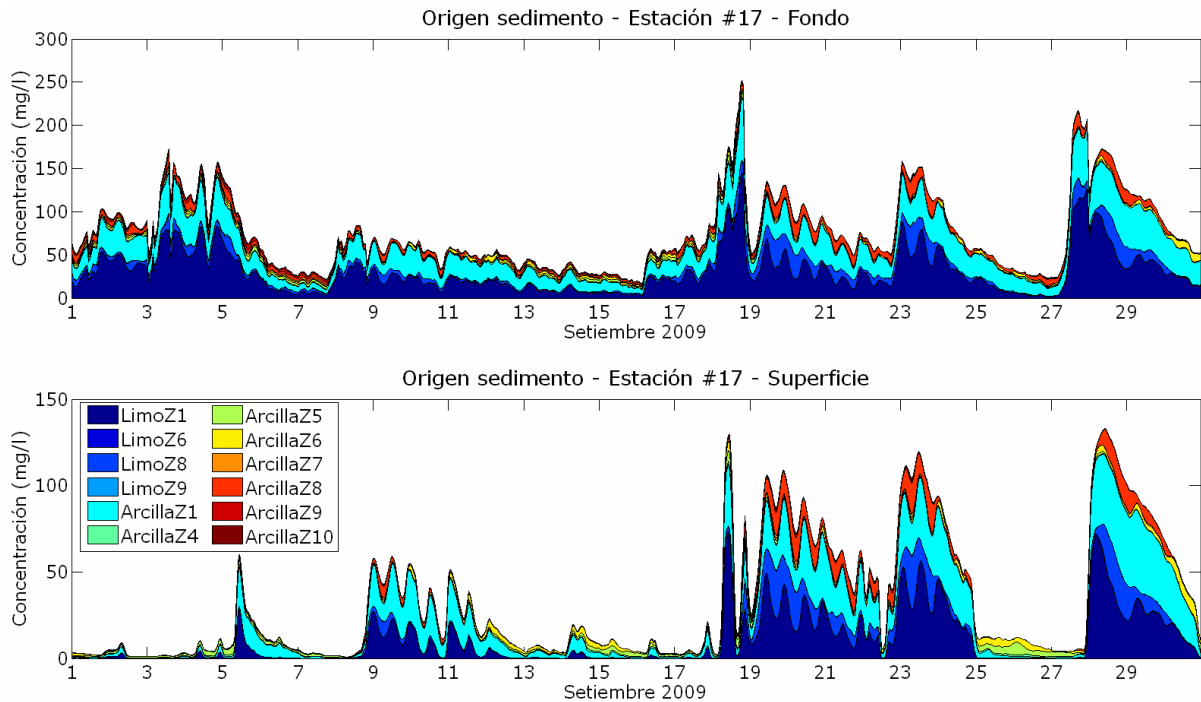


Figura 5.108: Variación temporal de la concentración de sedimento en suspensión diferenciando según la zona de origen en la capa de fondo (panel superior) y en la capa de superficie (panel inferior) en la estación #17. Setiembre 2009.

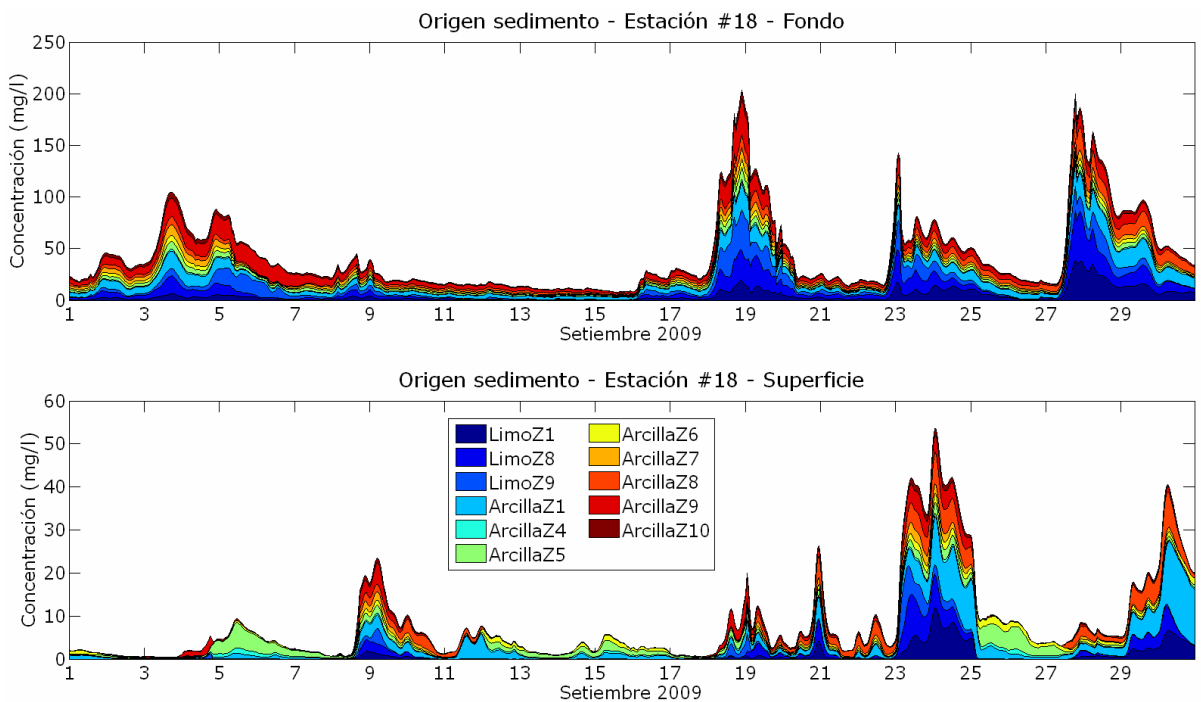


Figura 5.109: Variación temporal de la concentración de sedimento en suspensión diferenciando según la zona de origen en la capa de fondo (panel superior) y en la capa de superficie (panel inferior) en la estación #18. Setiembre 2009.

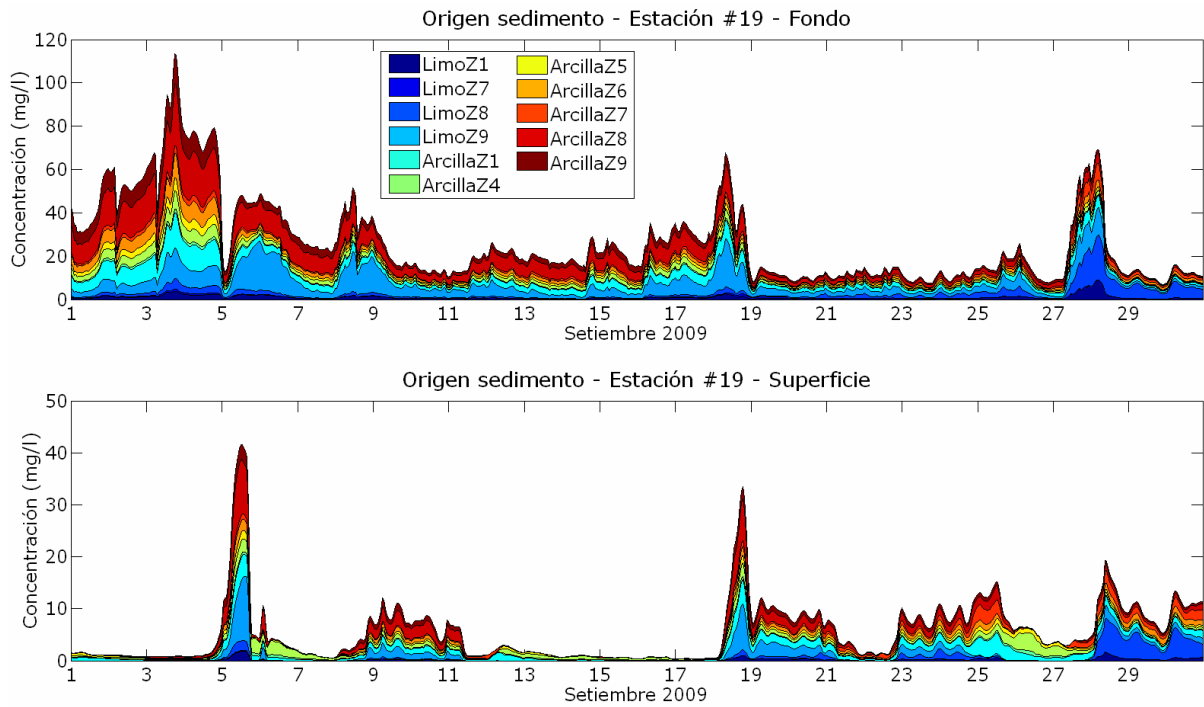


Figura 5.110: Variación temporal de la concentración de sedimento en suspensión diferenciando según la zona de origen en la capa de fondo (panel superior) y en la capa de superficie (panel inferior) en la estación #19. Setiembre 2009.

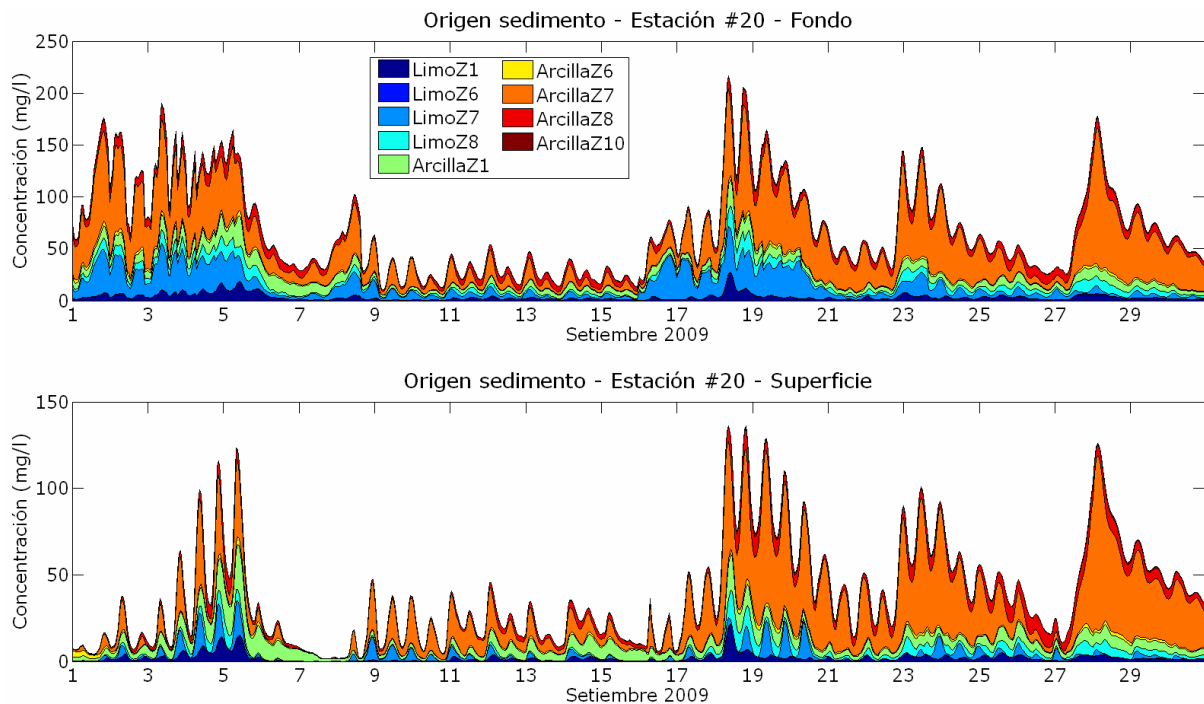


Figura 5.111: Variación temporal de la concentración de sedimento en suspensión diferenciando según la zona de origen en la capa de fondo (panel superior) y en la capa de superficie (panel inferior) en la estación #20. Setiembre 2009.

Los resultados obtenidos en la estación exterior #20 ubicada en la zona 7 se presentan en la Figura 5.111. Se observa el principal aporte corresponde al limo y a la arcilla de la zona 7. En menor proporción se observa el aporte de las arcillas y limos de las zonas 1 y 8, siendo muy bajos los aportes de limo y arcilla de la zona 6, y de la arcilla

de la zona 10. En superficie se observa mucha mayor proporción de los materiales arcillosos de la zona 7 y de las zonas aledañas mencionadas. Los resultados obtenidos en la estación #21 ubicada en el sector sur de la zona exterior en la zona 8 se presentan en la Figura 5.112. Se observa que el material está compuesto principalmente por limos y arcillas de las zonas 1 y 8. En porcentajes menores se encuentran arcillas de las zonas 6 y 7 en ciertas ocasiones y valores muy bajos se observan del limo de las zonas 6 y 7, y de las arcillas de las zonas 4 y 5. En la Figura 5.113 se presentan los resultados obtenidos en la estación #22 (Boya Oceanográfica) ubicada en la zona 9. Se observa el material tipo limo y arcilla de la zona 9 comprenden un gran porcentaje del material en suspensión en ésta estación tanto en fondo como en superficie. El resto de los aportes son variables, siendo los más relevantes el limo y la arcilla de la zona 1, limo y arcilla de las zonas 5 y 6, en menor proporción el limo y la arcilla de la zona 8, y con aportes muy menores de arcilla de las zonas 3, 7 y 10.

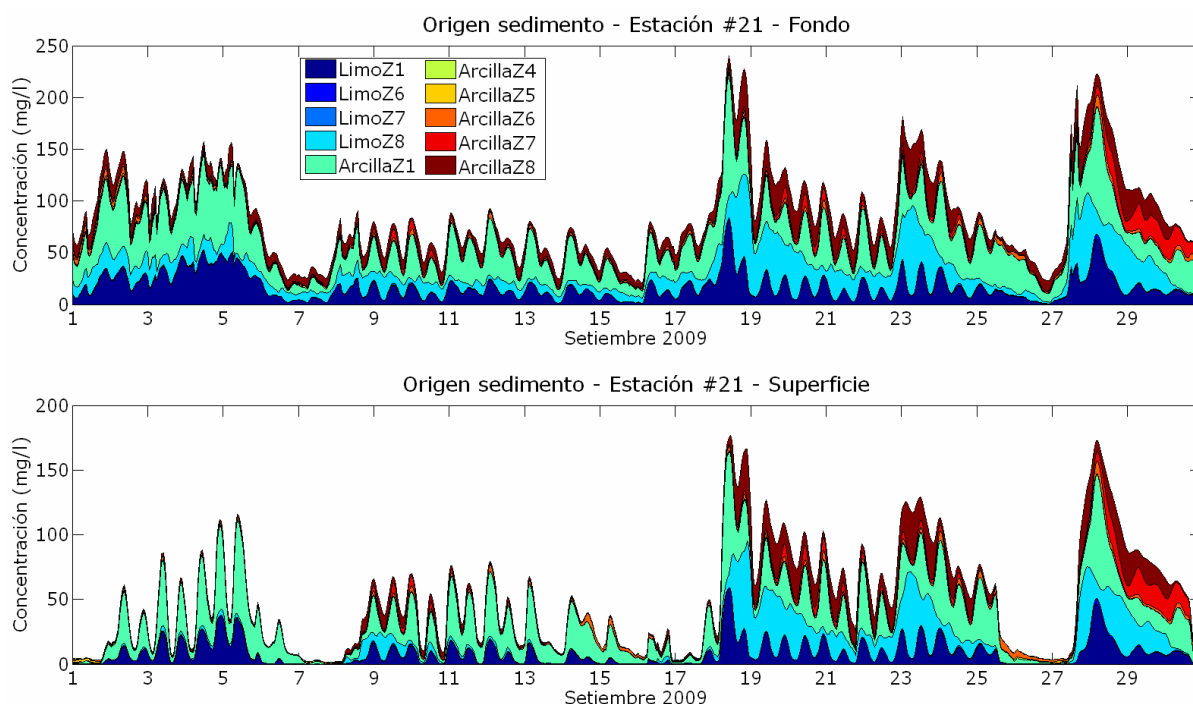


Figura 5.112: Variación temporal de la concentración de sedimento en suspensión diferenciando según la zona de origen en la capa de fondo (panel superior) y en la capa de superficie (panel inferior) en la estación #21. Setiembre 2009.

Los resultados obtenidos en la estación #23 ubicada en la zona 1 sobre la costa uruguaya se presenta en la Figura 5.114. Se observan aportes importantes de material de la zona 1 (limo y arcilla), seguidos por aportes de limo y arcilla desde la zona 5 ubicada en la zona intermedia contra la costa uruguaya. Se observa también un aporte de arcilla de la zona 9 ubicada hacia el exterior también sobre la costa uruguaya. Aportes menores se observan para el limo y arcilla de las zonas 3 y 4, y de arcilla de la zona 6. Los resultados obtenidos para la estación #24 ubicada sobre la zona 1 se presentan en la Figura 5.115. Los principales aportes a dicha estación provienen del limo y arcilla de la zona 1, siendo también importantes los aportes de limo y arcilla de las zonas 5 (zona intermedia) y 9 (zona exterior). Arcillas de las zonas más lejanas 3, 4 y 10 aportan fracciones muy bajas, como los limos de la zona 3. Se observan ciertas diferencias entre el fondo y la superficie, por ejemplo sobre el fondo el aporte de la arcilla de la zona 9 es mucho mayor al aporte de dicho material en la capa de superficie. En la estación #25 ubicada en la zona 9 (Figura 5.116) se observa una importante contribución del material

limo y arcilla de la zona 9 principalmente en el fondo, con aportes relevantes de limo y arcilla de la zona 1, y en menor proporción limo y arcilla de la zona 5, siendo aportes muy bajos los provenientes de las arcillas de las zonas 3, 4 y 6.

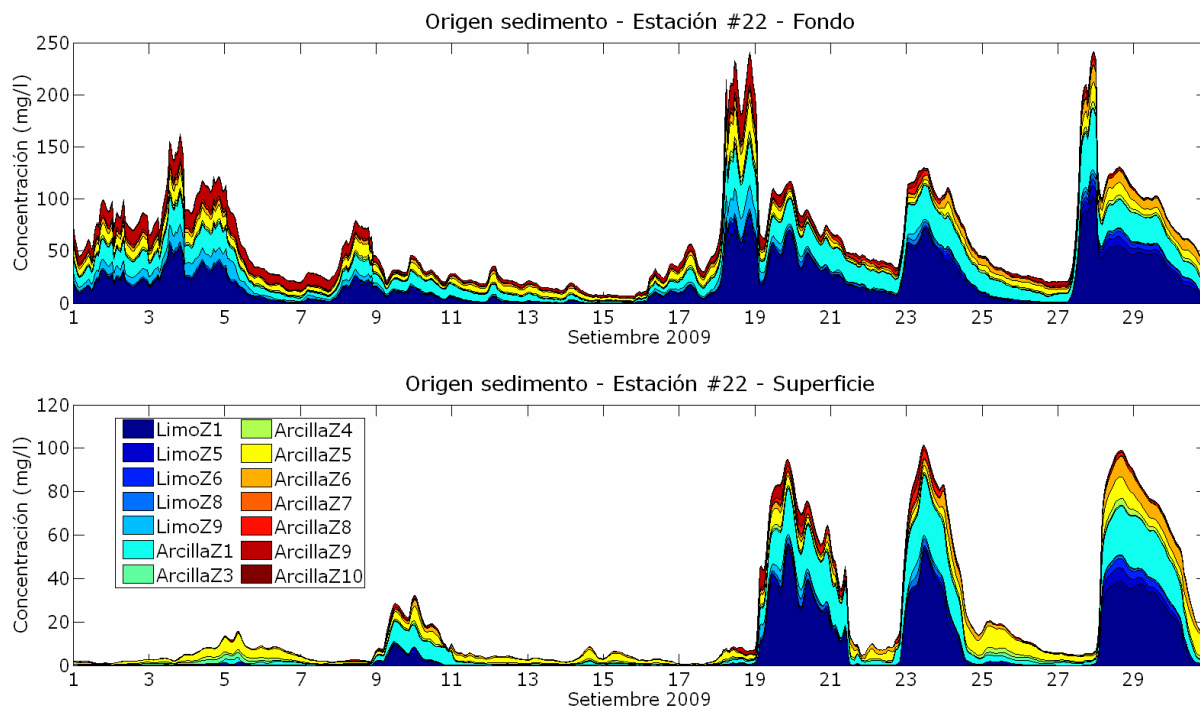


Figura 5.113: Variación temporal de la concentración de sedimento en suspensión diferenciando según la zona de origen en la capa de fondo (panel superior) y en la capa de superficie (panel inferior) en la estación #22. Setiembre 2009.

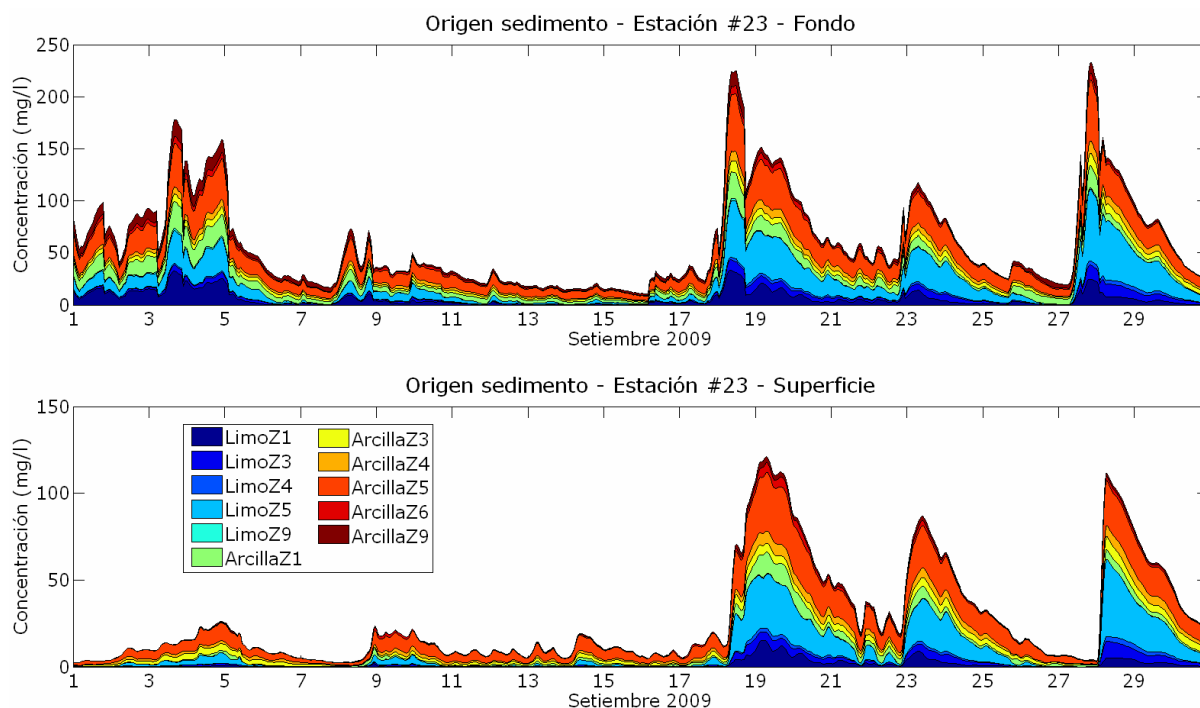


Figura 5.114: Variación temporal de la concentración de sedimento en suspensión diferenciando según la zona de origen en la capa de fondo (panel superior) y en la capa de superficie (panel inferior) en la estación #23. Setiembre 2009.

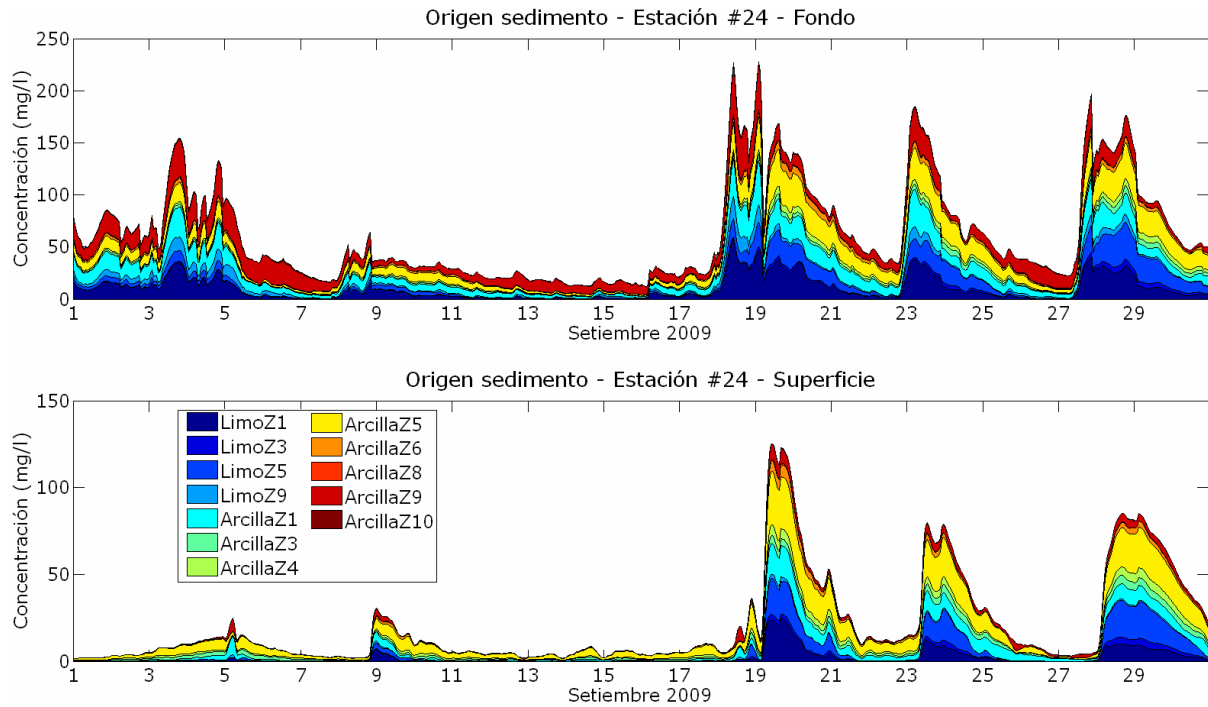


Figura 5.115: Variación temporal de la concentración de sedimento en suspensión diferenciando según la zona de origen en la capa de fondo (panel superior) y en la capa de superficie (panel inferior) en la estación #24. Setiembre 2009.

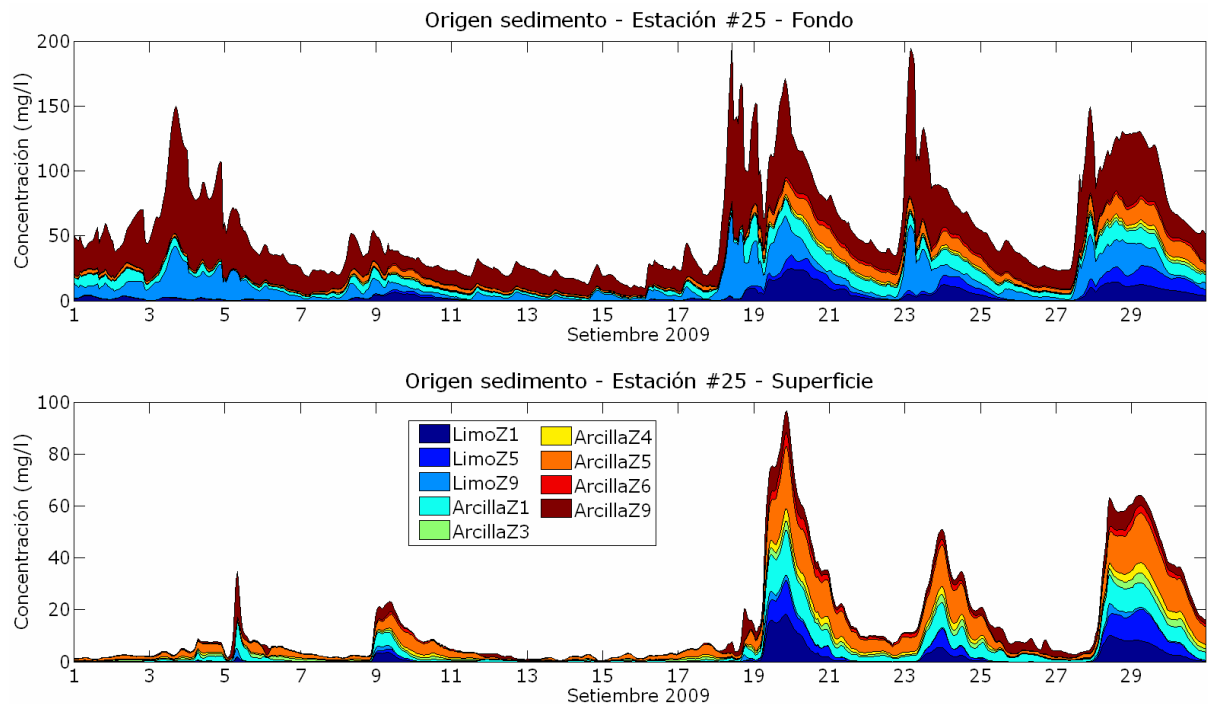


Figura 5.116: Variación temporal de la concentración de sedimento en suspensión diferenciando según la zona de origen en la capa de fondo (panel superior) y en la capa de superficie (panel inferior) en la estación #25. Setiembre 2009.

Por último, en la Figura 5.117 se presentan los resultados obtenidos en la estación #26 ubicada en la zona 9. Se observa el mayor aporte proviene del limo y arcilla de la zona 9 en fondo y superficie, con aportes menores de limo y arcilla de la zona 1, y arcilla de la zona 5, y un muy bajo aporte de arcilla de la zona 10. En esta estación se

observa claramente como luego de los eventos de resuspensión se observa el aporte de arcilla de la zona lejana 5 ubicada en la zona intermedia del Río de la Plata, principalmente en la superficie.

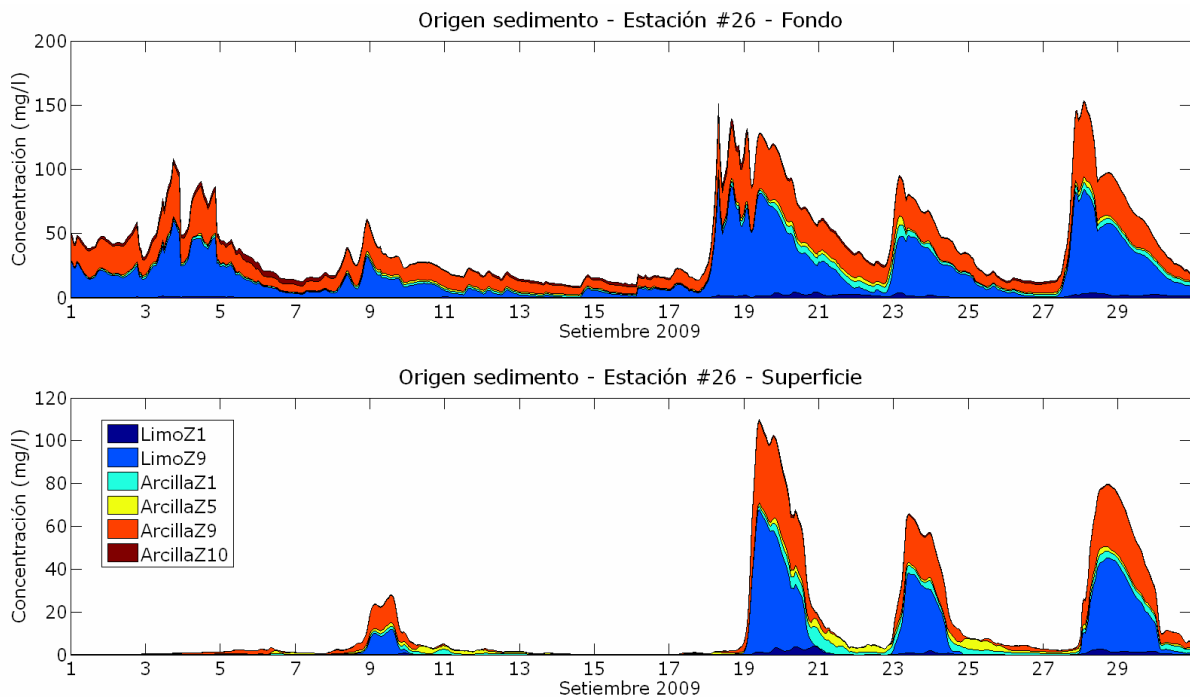


Figura 5.117: Variación temporal de la concentración de sedimento en suspensión diferenciando según la zona de origen en la capa de fondo (panel superior) y en la capa de superficie (panel inferior) en la estación #26. Setiembre 2009.

5.4.2.2. Sedimento de fondo

Con el objetivo de complementar los análisis anteriores respecto al transporte en suspensión del sedimento de fondo de las 10 zonas definidas, se analiza en este punto como evoluciona la concentración del depósito formado en el fondo durante los 10 meses simulados. De esta manera se determina dónde se deposita el material erosionado de cada zona durante dicho período. Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 5.118, 5.119 y 5.120. En las mismas se presenta el porcentaje promedio del material tipo limo y arcilla proveniente de cada zona en el depósito de fondo generado durante el mes de octubre 2010. También se presentan los resultados para el material tipo limo y arcilla descargado por los tributarios; complementando los resultados ya presentados anteriormente en este capítulo.

Se observa que el material en suspensión que ingresa a través de los tributarios deposita principalmente en la zona inmediata a su desembocadura, en el Río de la Plata interior. Se observan también porcentajes bajos en la zona intermedia superior principalmente del material arcilloso. Del material resuspendido de la zona 1 (frente) se observa que hay deposición del mismo en la propia zona 1 con bajos porcentajes hacia la zona intermedia siendo mayores los porcentajes hacia la zona exterior. Se observan mayores concentraciones en las zonas aledañas exteriores (zonas 7, 8 y 9), siendo mayor la extensión que se observa hacia la costa uruguaya que hacia la costa argentina.

El material erosionado de la zona 2 genera cierto depósito en la propia zona 2 en el cual el porcentaje de dicho material es elevado (tanto en limo como en arcilla), y se observa también aporta al depósito de la zona intermedia superior de las zonas 3 y 4. El material erosionado de la zona 3 (zona intermedia superior contra la costa uruguaya)

forma la mayor parte del depósito generado en la propia zona 3 sobre la costa uruguaya, y aporta al depósito generado en la zona 5 ubicada hacia aguas abajo sobre la costa uruguaya. Se observa que no hay intercambio en la sección transversal no encontrándose material de fondo sobre la costa argentina proveniente de la zona 3.

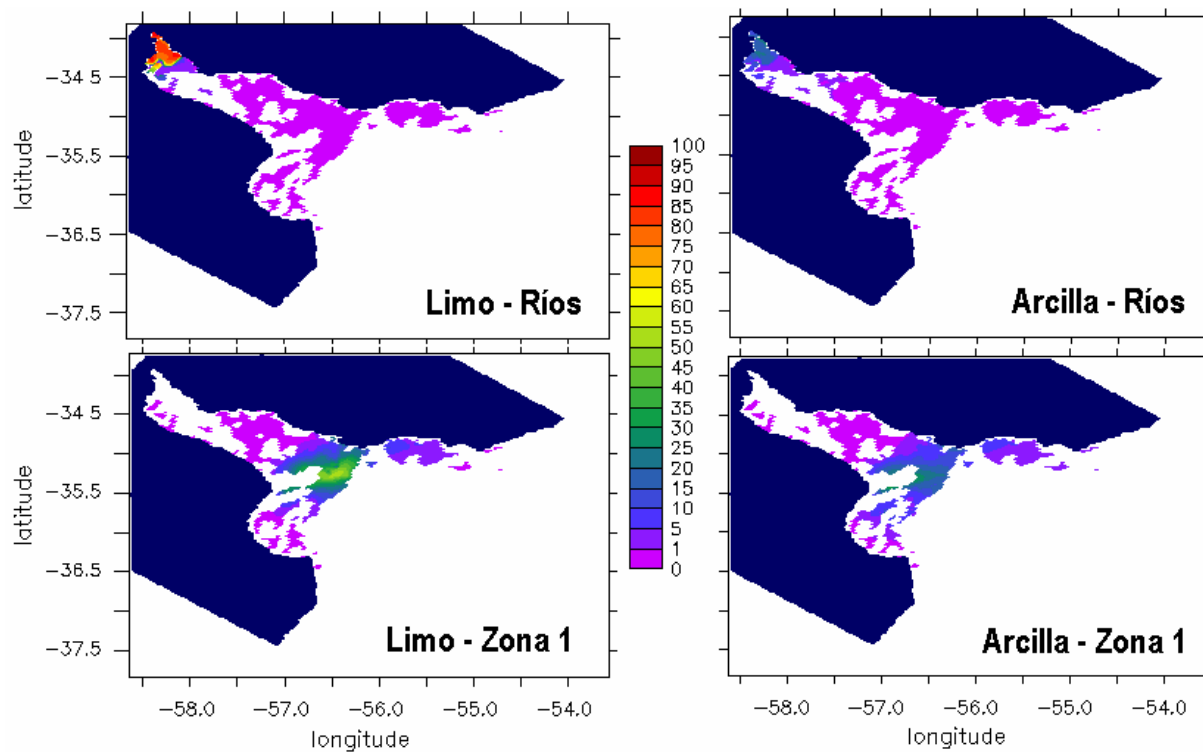


Figura 5.118: Porcentaje de los materiales tipo limo y arcilla provenientes de los ríos y de la zona 1 en el depósito de sedimento de fondo generado. Valores medios octubre 2009.

El material de fondo erosionado de la zona 4 en cambio presenta una mayor extensión en el depósito, observándose en la propia zona 4 con altos porcentajes pero también en las zonas 3, 5, 6 y hasta la zona 1. El material proveniente de la zona 5 se encuentra en el depósito de dicha zona y en el depósito generado en la zona 1 del frente, lo que indica un aporte importante del material de la zona 5 al material de la zona 1, tanto en limo como en arcillas. Se observa incluso el material de la zona 5 se encuentra en la zona exterior 9. El material erosionado de la zona 6 se observa principalmente en el depósito de dicha zona y en la zona 1 (parte central); las arcillas arriban hasta las zonas exteriores 7, 8 y 9, con mayor desarrollo por la zona norte que la zona sur del Río de la Plata.

El material erosionado de la zona 7 (Bahía de Samborombón) genera la mayor parte del depósito de la misma zona, con algo de aporte a la zona 1 y zona 8 aledañas. El material de la zona 8 también queda acotado a la zona 8 principalmente, generando el depósito de la misma, y aportando levemente al depósito de la zona 7 y de las zonas 1 y 9 aledañas. El material de fondo erosionado de la zona 9 se observa principalmente en el depósito generado hacia el exterior de la zona 9, con leves porcentajes de aporte a la zona 1. Por último, se observa que el material erosionado de la zona 10 exterior forma parte del depósito de fondo de la zona 9; también se observan bajos porcentajes de aporte de arcilla a las zonas 7 y 8.

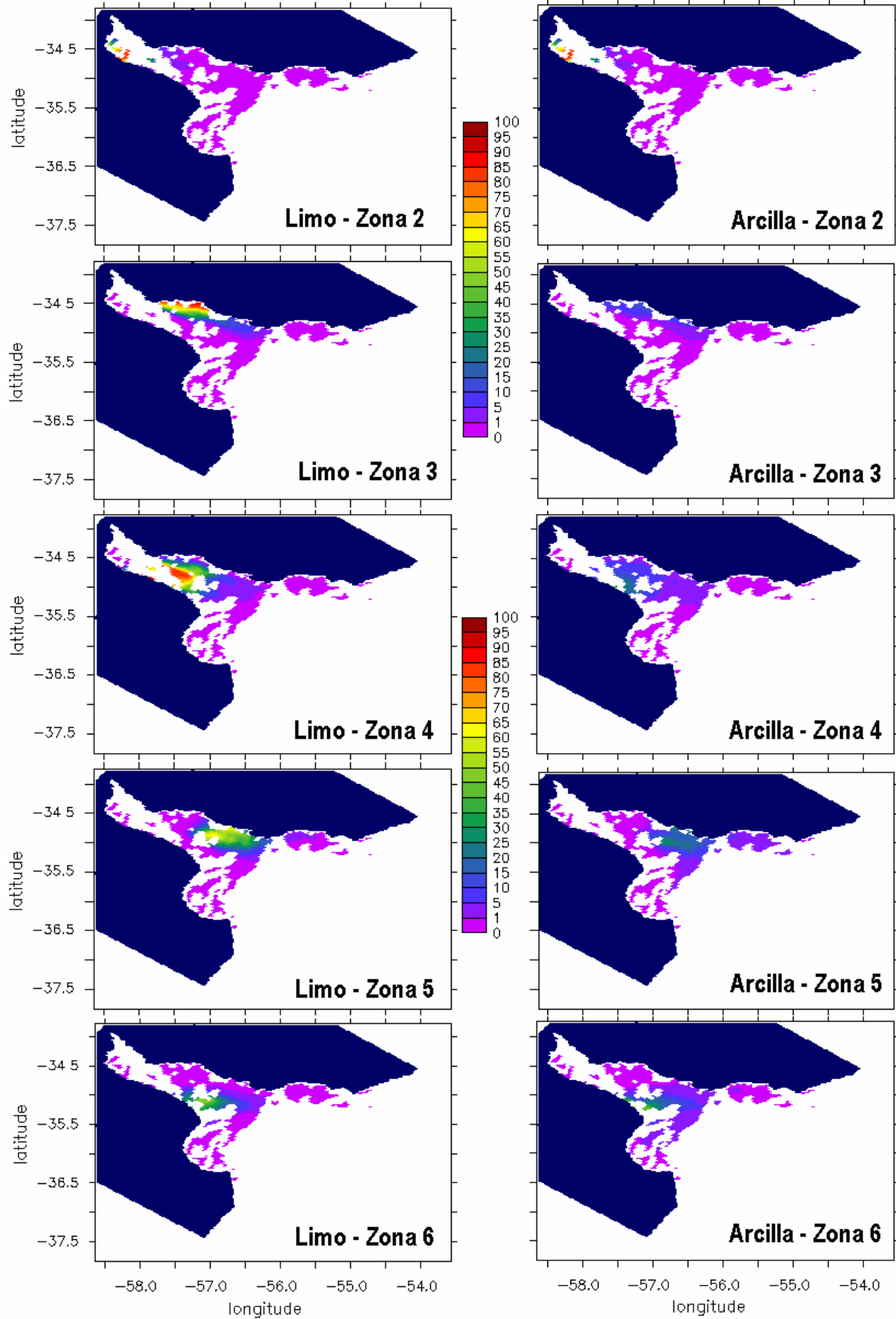


Figura 5.119: Porcentaje de los materiales tipo limo y arcilla provenientes de las zonas 2, 3, 4, 5 y 6 en el depósito de sedimento de fondo generado. Valores medios octubre 2009.

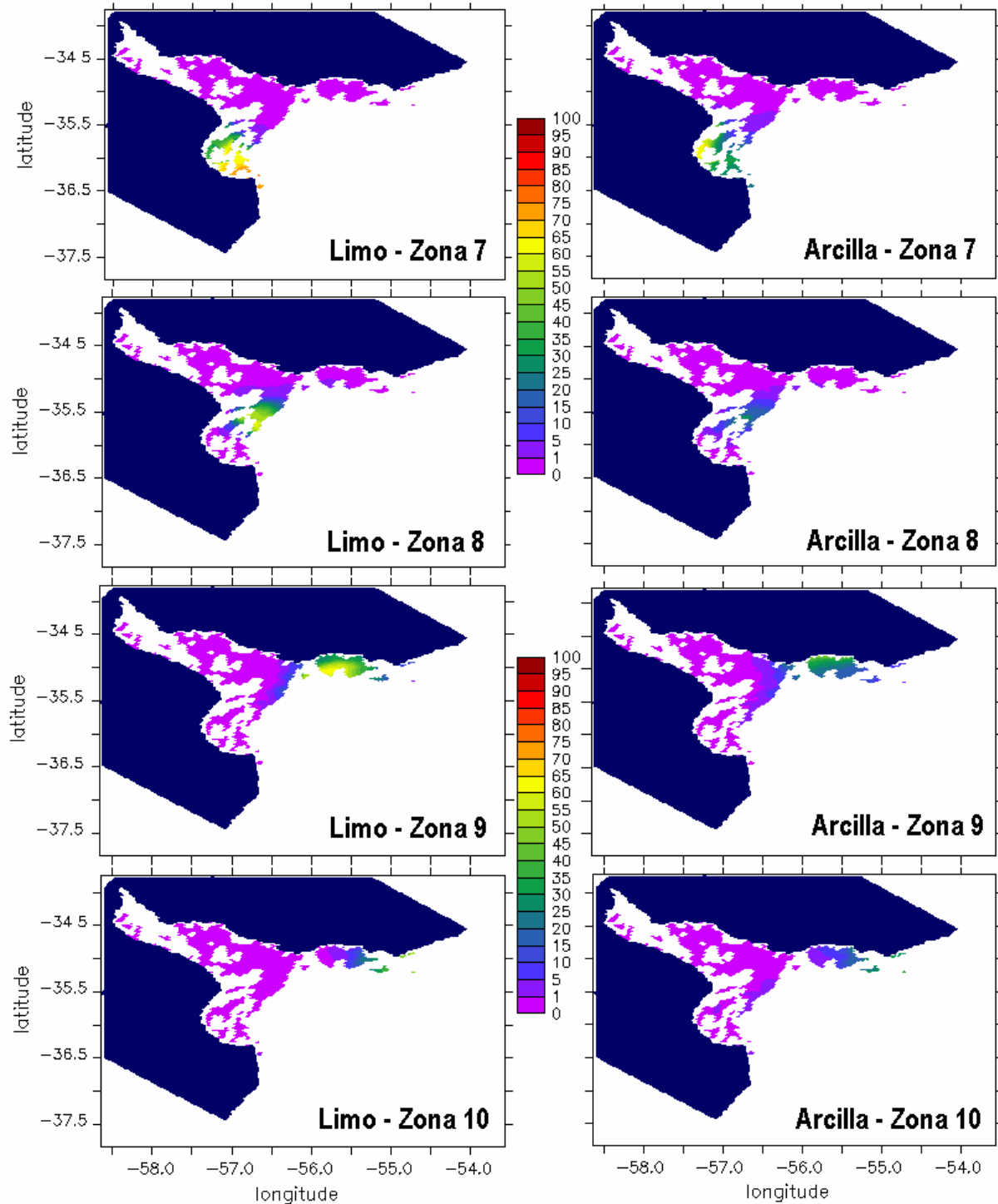


Figura 5.120: Porcentaje de los materiales tipo limo y arcilla provenientes de las zonas 7, 8, 9 y 10 en el depósito de sedimento de fondo generado. Valores medios octubre 2010.

5.4.3. Síntesis

El análisis presentado ha permitido aclarar ciertos aspectos que habían sido identificados originalmente en la primera sección de este capítulo, en relación a de dónde proviene el material en suspensión que se observa en cada zona del Río de la Plata, y hacia dónde va el sedimento de fondo erosionado en las distintas partes del mismo. Justamente los primeros análisis permitieron generar la zonificación del Río de la Plata en la cual se basa este análisis, donde se definieron 10 zonas de dinámica diversa buscando encontrar elementos comunes en los patrones de transporte del sedimento

erosionado de las mismas. Además, se buscó identificar cómo son las interacciones entre las distintas zonas para determinar los intercambios de material en el Río de la Plata que surgen producto de la compleja dinámica de sedimentos finos en la zona.

Los resultados obtenidos muestran que el material de la zona interior y de los tributarios aporta a la zona intermedia superior. En la zona intermedia del Río de la Plata hay un intercambio de material entre la zona sur hacia la zona norte, y desde la zona norte hacia la zona exterior, no observándose intercambio desde la zona norte hacia la zona sur. El intercambio por la zona norte continúa entre el frente hacia el exterior, siendo además incrementado por aportes desde la zona central exterior. La zona del frente también aporta a la zona intermedia en toda la sección transversal pero con mayor intensidad sobre la costa norte. La zona exterior sur (Bahía de Samborombón) presenta leve intercambio con la zona central exterior. Se observa un flujo de descarga de los sedimentos por las zonas costeras sur y norte en el exterior del Río de la Plata. Estos flujos se presentan sintéticamente mediante flechas (cuyo objetivo es representar sentidos y no intensidades) en la Figura 5.121.

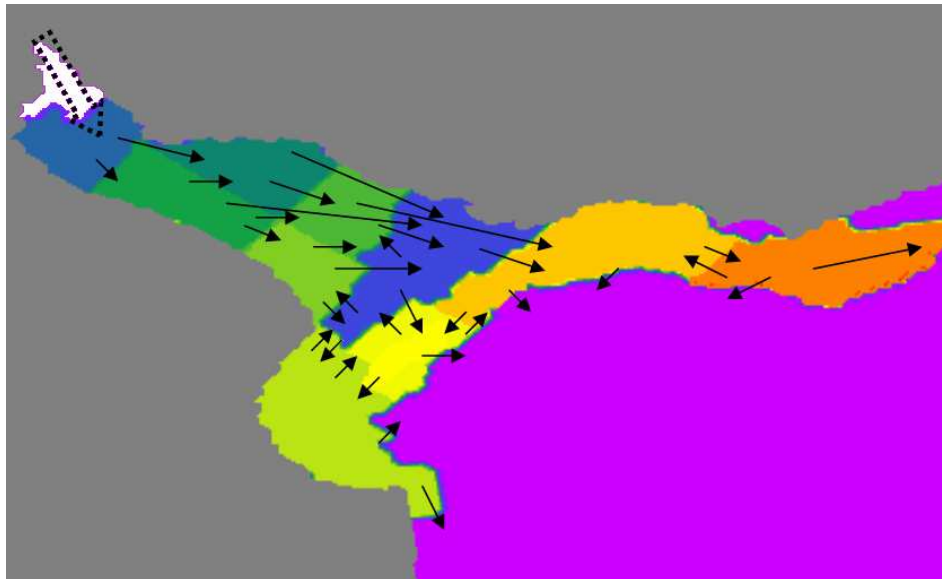


Figura 5.121: Esquema del sentido del transporte neto del sedimento fino de fondo proveniente de las diversas zonas del Río de la Plata y de la descarga de los tributarios.

5.5. DISCUSIÓN GENERAL

Se realizaron diversos análisis a los resultados obtenidos con el modelo con el objetivo de identificar las principales características de la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata. La gran variabilidad temporal de la misma generó que fuera necesario el análisis en diversas escalas temporales. Por otra parte, la gran variabilidad espacial observada generó la necesidad de analizar campos espaciales también en diversas escalas temporales. Durante los diferentes análisis se fueron identificando nuevos elementos, y aclarando otros. En esta sección se pretende realizar una discusión y una síntesis general de los elementos encontrados.

En primer lugar es claro que la dinámica de sedimentos finos está gobernada por dos tipos de forzantes hidrodinámicos diferentes en escala temporal y espacial, las mareas y las tormentas, y ésta responde de manera diferente según esté actuando uno u otro (o ambos). Esto genera una primera clasificación de la dinámica de sedimentos finos en todo el Río de la Plata, lo que se denominaron en este trabajo condiciones de calma (sin oleaje de tormenta) y lo que se denominaron condiciones de tormenta (con oleaje de

tormenta). Así, los procesos de resuspensión, transporte y deposición, serán diferentes según las condiciones predominantes.

Por otra parte, el Río de la Plata es muy extenso y los mecanismos de transporte de sedimento presentan una zonificación importante asociada a las diversas condiciones hidrodinámicas condicionadas por la geometría y batimetría. Es clara la división que existe en cuanto a procesos entre la zona interior-intermedia y la zona exterior del Río de la Plata, cuya división es lo que se denomina zona del frente, una zona donde coincide una gran expansión de la sección, y un incremento de la profundidad. Esto genera que el campo salino que ingresa desde el Océano llegue hasta dicha zona, con mayor intensidad en las zonas profundas donde la estratificación salina es más marcada. Esto determina que las velocidades residuales en la zona intermedia sean de características bidimensionales típicas de una descarga fluvial (transporte neto hacia el exterior), mientras que el flujo residual en la zona exterior presenta patrones más complejos de características tridimensionales, con flujo mayormente entrante hacia el continente en las zonas profundas y un flujo de descarga por las zonas poco profundas costeras principalmente; con una zona de corriente residual casi nula en la zona del frente.

Combinando estas dos clasificaciones es posible resumir las principales características de la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata de la siguiente forma:

1) En la zona *interior-intermedia* las condiciones de marea (*calma*) semidiurna genera cuatro ciclos diarios (dos más intensos) de erosión, transporte y sedimentación del sedimento tipo limo (predominante en la zona) y de la arcilla, generando un valor de base de concentración de sedimento en suspensión en toda la columna de agua que fluctúa según la marea. El aporte de sedimento fino de los tributarios básicamente deposita en la zona interior cerca de la desembocadura generando el avance del delta. En estas condiciones las concentraciones en suspensión más elevadas se observan hacia el límite de la zona sobre la costa argentina, siendo en las restantes partes de la zona intermedia mayores en general sobre la costa argentina que sobre la costa uruguaya. Por otra parte, sobre la costa uruguaya se observa menor fluctuación diaria en la concentración, caracterizada básicamente por un pico diario debido a la mayor asimetría de marea en contraste con la zona sur donde se observan dos picos bien marcados. En estas condiciones el intercambio permanente con el sedimento de fondo genera que haya una variación leve del espesor del mismo con un patrón espacial caracterizado por erosión sobre la costa argentina y deposición en la costa uruguaya. El transporte neto de material (acumulado en los diversos ciclos cortos de resuspensión y sedimentación) en la zona es hacia la zona del frente donde tanto las bajas corrientes residuales como el campo salino dificultan la descarga principalmente por la zona sur, generando deposición de material en la zona del frente y un leve avance de la pluma superficial de poca concentración por la zona costera uruguaya.

2) En la zona *exterior* durante condiciones de *calma* y predominio de la marea podemos diferenciar dos situaciones según el origen del material. Por un lado en estas condiciones de calma el flujo no tiene capacidad para resuspender material de fondo y por tanto la dinámica de sedimentos es muy débil; solamente se observa resuspensión de material de fondo en el ciclo de marea en la zona del frente contra la costa argentina y en la zona sur de la Bahía de Samborombón. En estas condiciones habitualmente el campo salino presenta estratificación y por tanto en la mayor parte de la columna de agua no se observa sedimento en suspensión. El sedimento de fondo no presenta casi variación en composición y en espesor. Sin embargo otra situación ocurre en la zona exterior cuando se tienen condiciones de calma pero posteriores a una tormenta, y por tanto en la zona exterior se encuentra material que arribó a la zona o que se erosionó durante la tormenta. En estas condiciones la dinámica en la zona muestra una gran deposición de

material en la zona del frente, y en las zonas costeras según el tipo de tormenta que haya ocurrido. Las arcillas que arriban a la zona exterior y permanecen en suspensión en general se transportan por los distintos patrones de flujo residual de la misma. Estos muestran un transporte de descarga más intenso por la zona costera uruguaya del material más fino que arriba a la zona, con cierta descarga por la zona central, y un menor transporte neto por la zona de Samborombón.

3) Durante las **tormentas** en la zona **interior-intermedia** del Río de la Plata se observan concentraciones de sedimento en suspensión mayores al valor de base característico de las condiciones de calma, pudiendo incluso las concentraciones más grandes ocurrir hacia la costa uruguaya y no en la costa argentina, dependiendo de la intensidad de la tormenta. En estas condiciones todos los procesos identificados durante las calmas se intensifican, observándose descensos importantes del espesor del sedimento del fondo producto de las fuertes erosiones. Además, se observa un transporte intenso de sedimento en suspensión manteniendo el patrón observado en condiciones de calma, es decir, desde la zona interior hacia la costa uruguaya y desde la costa intermedia argentina también hacia la costa uruguaya, lo que genera arribe mucho sedimento en suspensión hacia la zona del frente. Dependiendo del tipo de tormenta y de las condiciones de estratificación en la zona exterior, el material avanzará por la costa uruguaya o por la costa argentina, observándose en todas las condiciones un avance del frente de turbidez en toda la sección en relación a las condiciones de calma.

4) En la zona **exterior** durante las **tormentas** se produce una dinámica de sedimento intensa, compleja y de gran escala espacial. Estas situaciones cambian todos los patrones observados en esta zona en condiciones de calma, en cuanto a patrones de erosión, deposición, concentraciones en suspensión, etc. Las tormentas generan resuspensión en gran parte de la zona exterior lo que implica mucha cantidad de sedimento en suspensión y por tanto un incremento muy alto de las concentraciones (principalmente en la capa de fondo) respecto al valor de base. Durante las mismas se erosiona material depositado en el frente proveniente de la zona intermedia según la dinámica de calma. Se observan patrones espaciales con mayores concentraciones en general en la zona inmediata al frente y en las zonas costeras. Dependiendo de las condiciones de estratificación el sedimento resuspendido podrá mezclarse en toda la columna de agua, incluso con el sedimento que proviene de la zona intermedia. Se observan dos situaciones bien diferenciadas con una gran descarga por la zona costera uruguaya de sedimento o descarga por la costa argentina según las tormentas provengan del sector Oeste o sean sudestadas, principalmente. Luego de estas condiciones de fuerte resuspensión permanece en suspensión mucho sedimento de fondo, y las condiciones de calma posteriores a la misma, serán las que determinen el flujo de sedimentos en la zona.

Los patrones descriptos para las condiciones de calma coinciden con los resultados obtenidos del análisis de las medidas de las campañas oceanográficas del Proyecto FREPLATA-FFEM realizadas básicamente en condiciones de calma. Los patrones descriptos para las condiciones de calma y de tormenta, en la zona interior, intermedia, y exterior también coinciden con los descriptos a partir de las series de medidas continuas de turbidez en Pilote Norden, Torre Oyarvide y la Boya Oceanográfica. La dinámica mencionada genera un patrón de deposición y generación de sedimento de fondo que condice con la composición determinada a partir de las muestras de sedimento de fondo extraídas en las campañas y analizadas en laboratorio, que muestran mayor contenido de arcilla hacia la zona del frente y zona exterior.

Esta dinámica diferenciada en la zona interior-intermedia y exterior, podría explicar lo planteado en el Capítulo 2 en relación a la diferenciación de texturas de material y diverso origen. Básicamente a la zona del frente (zona 1) arriba sedimento

fino que ha sido descargado por los tributarios y se ha transportado mediante ciclos sucesivos de marea, con un patrón que se mantiene durante las tormentas pero de mayor intensidad, el cual deposita al encontrarse con el frente salino y corrientes residuales bajas. No obstante este depósito durante las tormentas vuelve a ser resuspendido y sujeto a patrones de flujo totalmente diferentes a los anteriores, pudiendo ingresar nuevamente a la zona intermedia, o ser trasladado por las corrientes de descarga por las zonas costeras o permanecer en zonas de flujo residual bajo, e interactuar incluso con el sedimento que proviene durante las tormentas de la zona intermedia o incluso de la zona exterior.

Los patrones de erosión y deposición a largo plazo obtenidos, muestran una tendencia a que cierto material se acumule en la zona intermedia superior contra la costa uruguaya principalmente, lo que significa que el ingreso de material a la misma (proveniente de la zona interior y de la zona costera argentina aledañas) es mayor que la salida de material desde dicha zona (que se transporta y deposita principalmente sobre la zona intermedia y el frente contra la costa uruguaya). Otra zona de acumulación es el frente de turbidez también sobre la zona costera uruguaya principalmente. Esta zona recibe material desde la zona costera uruguaya intermedia como se mencionó recién, de la zona intermedia contra la zona argentina, y también aportes de la zona exterior principalmente de la costa uruguaya. Finalmente se observa acumulación en las zonas costeras uruguaya exterior, en la zona central exterior y costa argentina exterior. El material de la primera proviene básicamente del transporte del material de la zona intermedia y del frente, mientras que el material acumulado en la segunda proviene de la zona del frente y el material acumulado en la tercera proviene de la zona central exterior del Río de la Plata y de la zona intermedia contra la costa argentina. Esto muestra un avance sucesivo de los sedimentos finos desde la zona interior-intermedia hacia la zona exterior.

Capítulo 6

6. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

Se han presentado en este documento las tareas y los análisis desarrollados para alcanzar el objetivo general definido para este trabajo, comprender los principales aspectos de la dinámica global de sedimentos finos del Río de la Plata y sus factores determinantes, identificando las principales estructuras de transporte y la zonificación de los mismos. El estudio se realizó en base al desarrollo y ajuste de un modelo numérico de sedimentos finos implementado en la zona de estudio, el modelo MARS3D de IFREMER. En este capítulo se sintetizan los principales aspectos desarrollados durante la tesis, planteando dificultades encontradas y propuestas a desarrollar a futuro, de manera de continuar con el proceso de mejora del conocimiento de la dinámica de éste cuerpo de agua tan complejo, particular y relevante, como es el Río de la Plata.

La estrategia metodológica aplicada en este estudio tuvo como base la implementación, y ajuste de un modelo numérico de sedimentos finos confiable y de avanzada en la zona de estudio (Capítulo 4). Para esto fue necesario previamente analizar la información de campo disponible para conocer aspectos básicos de la dinámica, y para utilizarla en el desarrollo del modelo numérico (Capítulo 2). Además, como el modelo de sedimentos finos depende directamente de las condiciones hidrodinámicas fue necesario implementar y ajustar un modelo tridimensional baroclínico de marea en la zona y un modelo de oleaje, determinando también las tensiones de corte de fondo impuestas por ambos forzantes (Capítulo 3). Como resultado de todo este proceso se cuenta actualmente con un modelo completo, lo suficientemente testeado y ajustado, para ser utilizado como generador de información, y para mejorar el conocimiento de los principales aspectos de la dinámica de sedimentos finos (Capítulo 5).

Es importante destacar que ha sido posible realizar este estudio gracias a la gran cantidad de información de campo de calidad surgida en el Proyecto FREPLATA-FFEM. La importancia de contar con medidas de campo en estudios de procesos físicos como éste es evidente, pero se considera que es más importante que las medidas sean de calidad que la cantidad. El gran tamaño del Río de la Plata y la diversidad zonal de su dinámica hace que sea muy difícil contar con información completa del mismo. No obstante la estrategia aplicada en dicho Proyecto, en el cual se combinaron mediciones continuas con mediciones discretas, se considera fue exitosa. En este estudio se procesaron y estudiaron en detalle todas las medidas vinculadas a los sedimentos finos obtenidas en el Proyecto, de forma de obtener la mayor información de los datos. Con esto se obtuvo un conocimiento inicial de muchos aspectos relevantes concretos sobre la dinámica de sedimento fino en el Río de la Plata.

Luego del estudio y análisis de los resultados obtenidos en este trabajo, la evaluación que surge de las mediciones es diversa. Por un lado se considera que la red de monitoreo definida fue acertada, ya que con la misma se captaron verdaderamente los principales elementos de la dinámica de sedimentos finos, y por eso se mantuvo la red de

monitoreo para analizar los resultados del modelo. La información obtenida, más allá de ser puntual, permitió contar con una descripción general de la situación, imprescindible a la hora de evaluar el modelo. La principal debilidad encontrada fue que no se realizó una calibración en campo de los sensores de turbidez del CTD, lo que agregó un elemento de duda a los valores cuantitativos. Debido a la complejidad y variabilidad de la dinámica, y al esfuerzo que implicó la realización de las campañas oceanográficas (de varios días de duración) podría considerarse suficiente la información recolectada de esa manera hasta el momento. Se considera que los esfuerzos en cambio deberían enfocarse en la realización de mediciones continuas, como las que se realizaron en los puntos fijos de Pilote Norden, Torre Oyarvide y en la Boya Oceanográfica. A pesar del gran esfuerzo que se realizó para depurar y procesar dichas mediciones, la información que se obtuvo tiene un gran valor, debido principalmente a la gran variabilidad temporal (condiciones de calma y condiciones de tormentas variables según los vientos) de los procesos físicos en el Río de la Plata, y a la variabilidad espacial. La definición de la posición de la Boya Oceanográfica también fue un acierto, y se considera muy importante que puedan mantenerse las mediciones en la zona. No obstante del análisis de las mediciones surgen muchos aspectos para mejorar. En el caso de la Boya el movimiento de la misma (y por tanto de las mediciones de los equipos ADCP y SMATCH instalados) con la superficie libre es una gran debilidad y por tanto es un aspecto a mejorar en nuevas etapas de medición. Por otra parte, también para los SMATCH, debe realizarse la calibración de los sensores de turbidez para poder inferir correctamente valores de concentración de sedimento en suspensión. Además, sería importantísimo incorporar mediciones de las variables hidrodinámicas, corrientes y oleaje en los puntos fijos, avanzando en el ajuste de las señales de los equipos acústicos para obtener perfiles de turbidez, principalmente en la zona exterior donde se observa estratificación vertical. Por último, se considera importantísimo garantizar un monitoreo simultáneo de ciertas variables, siendo las mínimas en la zona exterior turbidez y salinidad (medida a través de la conductividad y temperatura), y perfil de corrientes y oleaje.

Otra componente relevante de este estudio fue la implementación, calibración y validación del modelo hidrodinámico de marea MARS y del modelo de oleaje SWAN. Para resolver el campo hidrodinámico de marea (astronómica y meteorológica) se utilizó el modelo numérico MARS implementado en dos dominios encajados. El primero, implementado en versión bidimensional integrada en vertical denominado rank0, incluye la zona del Atlántico Sur, y el segundo nivel, que se trata de un modelo bidimensional denominado rank1, incluye la zona del Río de la Plata y la zona de plataforma (Frente Marítimo). Para la hidrodinámica del oleaje se utilizó el modelo SWAN implementado en el mismo dominio (y misma grilla) que el segundo nivel del modelo MARS. Esto se considera fue una estrategia muy acertada, recomendada por los investigadores de IFREMER, ya que se evitaron interpolaciones adicionales entre la grilla del SWAN y la grilla del MARS al momento de determinar las tensiones de corte de fondo para ser utilizadas en el modelo de sedimentos finos. El modelo de marea es forzado por el modelo global astronómico FES2004 en el primer dominio rank0 y por los forzantes atmosféricos obtenidos de campos de diversos Re-análisis. El dominio rank1 es forzado por la marea astronómica y meteorológica proveniente del dominio rank0, por los caudales fluviales y por los vientos. El modelo SWAN es forzado también por el viento (proveniente de Re-análisis) y por la información de oleaje global obtenida del modelo WW3 implementado por IFREMER a escala planetaria.

Ambos modelos fueron testeados y ajustados con gran cantidad de información de campo de las variables vinculadas (niveles, corrientes, salinidad y parámetros de oleaje) en la mayor parte del Río de la Plata. Se destaca la importancia del viento local como forzante de la hidrodinámica de marea principalmente a través de la influencia sobre el campo salino (y por tanto sobre las corrientes por densidad generadas), y del oleaje en

todo el dominio rank1, y del viento remoto a escala del Atlántico Sur para forzar los eventos de marea meteorológica. En este sentido se utilizaron tres fuentes diferentes de vientos de re-análisis, para los cuales se obtuvieron diferentes calibraciones del modelo. La mayor calidad se obtiene con los vientos tipo CEP (información del ECWMF) como forzantes locales, tanto para el oleaje como para el modelo hidrodinámico de marea. Los resultados obtenidos y presentados en este trabajo mostraron que los modelos de marea y oleaje ajustados representan de manera correcta las principales características de la hidrodinámica en la zona de estudio. Se considera que para el nivel de resolución del dominio rank1 el estado de desarrollo de ambos modelos alcanzó un nivel de calidad suficiente para avanzar a la etapa de modelación de sedimentos finos.

A partir de la determinación de los forzantes se determinaron las tensiones de corte de fondo generadas por los mismos sobre el fondo y que por tanto determinan la resuspensión del material de fondo en el modelo. A través de la tensión de corte de fondo del oleaje se representa el único efecto del mismo sobre los sedimentos finos incluido en este estudio. En cambio, en cuanto a la hidrodinámica de marea, el flujo generado por la misma influye también en el transporte de sedimentos finos y en la velocidad de caída, además de la representación de los procesos de intercambio con el fondo. Más allá de los tests básicos realizados se utiliza una aproximación para el cálculo de las tensiones de corte de flujo de marea, de oleaje y del flujo combinado, siendo éste un elemento a mejorar en el futuro a medida que se genere mayor información del tema, por la gran dependencia de la dinámica de sedimentos finos con las tensiones de corte de fondo. Una vez determinada la tensión de corte de fondo total se realizó un análisis de la variabilidad temporal y espacial de la misma, encontrando que las diferencias en escala temporal de las mareas en relación a las del oleaje de tormenta genera una gran variabilidad temporal de la tensión de corte de fondo. Además, se observó que hay una zonificación marcada en el Río de la Plata en lo que respecta a las tensiones de corte generadas en el fondo por el flujo. En la zona interior e intermedia dominan las mareas y por tanto las tensiones de fondo permanentes (principalmente sobre la costa argentina), y en cambio en la zona exterior la dinámica es muy diferente, con valores muy bajos de tensiones generadas por corrientes casi permanentemente pero que durante los eventos de tormenta se incrementan fuertemente.

Las variaciones temporales observadas en las tensiones de corrientes y de oleaje, y por tanto en las tensiones totales resultantes, y la gran variabilidad espacial de las mismas en la zona de estudio, generan una gran complejidad en la dinámica de sedimentos finos en la zona. Esto generó en parte que la etapa de ajuste y calibración del modelo de sedimentos finos fuera sumamente extensa y compleja. La estrategia general utilizada consistió en simplificar lo más posible los procesos para resolver las cuestiones básicas del sistema. En este sentido se decidió por ejemplo no incluir el proceso de consolidación del sedimento de fondo en el modelo, a pesar de los avances que se realizaron en el estudio de dicho proceso en laboratorio. Por otra parte, se consideró que la erosión del material de fondo, representada en el modelo por la tensión crítica de erosión y la tasa de resuspensión, no depende del tipo de material de fondo y por tanto dichos parámetros son uniformes en todo el dominio de cálculo.

A pesar de las simplificaciones realizadas se considera que el modelo ajustado logra representar las principales características de la dinámica de sedimentos finos en la zona de estudio. Las comparaciones con las medidas presentadas muestran que el modelo reproduce correctamente los valores de base de concentración de sedimento en suspensión en la zona interior e intermedia durante los períodos de calma, así como también los incrementos y posteriores descensos de concentración que ocurren en dichas zonas durante las tormentas. En la zona exterior el modelo representa en general la estratificación vertical dominada por la estratificación salina, así como también los

eventos de altas concentraciones en suspensión generados por tormentas. Se optó por seleccionar una parametrización final que no exceda los picos de sedimento en suspensión medidos durante los eventos máximos para no sobrevalorar la cantidad de sedimento puesto en suspensión en el modelo.

Como se mencionó en la síntesis del Capítulo 4 varios elementos claves del modelo MARS y de la implementación realizada permitieron la obtención de buenos resultados a pesar de las simplificaciones realizadas. La diferenciación del material tipo limo y arcilla con diferentes leyes de velocidad de caída, y la utilización de la condición inicial de composición de sedimento de fondo que incluyó la información histórica son las principales. El modelo a partir de dicha condición inicial, y de la dinámica que resuelve, determina la evolución del sedimento de fondo, tanto en espesor como en composición. Esta componente del modelo se controló con datos de composición de sedimento de fondo medidos mostrando que el modelo representa correctamente la variación espacial del sedimento de fondo, lo que a su vez es un chequeo indirecto positivo de la representación de la dinámica de sedimentos en la columna de agua.

Por otra parte, se ha observado con el modelo el predominio que tienen los procesos de intercambio con el sedimento de fondo, erosión y deposición, en la dinámica de sedimentos finos en todo el Río de la Plata. Ha sido entonces relevante la incorporación en el modelo de sedimentos de las tensiones de corte generadas tanto por el forzante de marea como las generadas por el oleaje en la zona, determinantes en el proceso de erosión. Es posible afirmar luego de este estudio que en cualquier trabajo vinculado con la dinámica de sedimentos finos en cualquier zona del Río de la Plata debe incluirse el efecto del forzante oleaje. Los valores máximos de concentración en la columna de agua están determinados por la resuspensión de material de fondo por el oleaje de tormenta, mientras que la marea determina el valor de base permanente solamente.

Un punto a destacar es que se obtuvieron resultados favorables simplificando la dinámica dada por los procesos de erosión y deposición tradicionalmente considerados. Considerando en el modelo MARS ambos procesos por separado (para la resolución espacial considerada) no fue posible representar a la vez los incrementos de concentración en suspensión durante eventos de fuerte resuspensión junto con la posterior caída post evento. Esto significa que el modelo no fue capaz de reproducir la erosión y la deposición posterior simultáneamente; si se ajustaba la erosión entonces posteriormente quedaba mucho sedimento en suspensión sin depositar, y para representar los valores bajos post evento no se lograba erosionar lo suficiente durante el evento. Ambos procesos pudieron representarse cuando se impuso una alta tensión de corte de deposición, lo que indirectamente elimina la diferenciación de ambas etapas en las escalas temporales consideradas, y solamente considera un balance global en el cual hay erosión de material de fondo siempre y cuando se supere cierto umbral de tensión de corte, y siempre y cuando se supere el flujo de deposición existente dado por la velocidad de caída y la concentración. Esta parametrización obtenida es consistente con lo que mencionan Winterwerp and Kesteren (2004) en relación a que la deposición depende solamente del flujo de sedimentación en la capa cercana al fondo dado por la velocidad de caída y la concentración cerca del fondo.

La herramienta desarrollada fue utilizada extensamente para obtener información de la dinámica de sedimentos finos, analizando por un lado procesos de manera individual y por otro de manera integrada. Se estudiaron escalas cortas diarias y escalas anuales, determinando incluso la evolución del sedimento de fondo durante 4 años. Continuamente se buscó comprender los procesos espaciales, para lo cual se calcularon diversos campos espaciales estadísticos para conocer el comportamiento tanto del sedimento en suspensión como del sedimento de fondo. En el Capítulo 5 se

resumieron los principales elementos de la dinámica, siendo importante diferenciar según las condiciones sean de calma o de tormenta, ó según se trate de la zona intermedia o de la zona exterior. Un aspecto relevante es que la dinámica de sedimentos finos en el Río de la Plata no es homogénea en el mismo, sino que presenta diversos procesos dominantes y características, según la diferenciación planteada. Esto significa que estudios de la misma en el área podrán utilizar diversas estrategias en base a en qué zona se esté trabajando, y según qué elemento sea de interés. Se considera que este estudio aporta elementos de la dinámica global en todo el Río de la Plata que serán guía ó base para estudios específicos posteriores en zonas de interés, como pueden ser las zonas de dragado, o de importancia ecológica particular, entre otros.

Como elemento sintetizador del estudio, se propone un modelo conceptual de la dinámica global de los sedimentos finos en el Río de la Plata, que reúne los principales elementos presentados y analizados en este trabajo. Como se presentó en el Capítulo 2, las mediciones de composición de sedimento de fondo permitieron generar un diagnóstico y caracterización del mismo, además de la constatación y actualización de la información histórica. Existe una clara variabilidad espacial en la composición de finos en el Río de la Plata, en la zona interior e intermedia predominan los materiales limosos (con mayor contenido de arena en la zona interior y mayor contenido de arcilla en la zona intermedia), y en la zona exterior el sedimento es un barro con alto contenido de limo y de arcilla. En el diagrama de composición de Flemming II generado fue posible identificar una banda asociada a los tipos D-II (barro muy limoso ligeramente arenoso) y E-II (limo ligeramente arcilloso), que corresponden a la zona interior e intermedia del material de fondo del Río de la Plata, y otro grupo de datos que corresponden a la zona exterior que se caracterizaron como del tipo E-III limo arcilloso. Se planteó (según bibliografía) que ésta diferenciación del material de fondo indicaría que estos dos grupos de sedimento tendrían un origen diferente, o comportamientos distintos de la dinámica en estas áreas que repercuten en la composición del material de fondo. Con todos los elementos presentados en este estudio podría afirmarse que la segunda hipótesis es la correcta. Por un lado no hay otra fuente u origen de sedimentos finos que no sea el origen fluvial de los tributarios. Imaginando una dinámica de muchos años con los patrones de transporte obtenidos en este trabajo el material fino de los ríos puede arribar a la zona del frente y a la zona exterior, donde justamente la textura del material indicaría un comportamiento diferente.

Según los análisis presentados, podríamos resumir qué sucede con el material fino descargado por los tributarios de la siguiente manera:

1) Parte del material fino que ingresa con los tributarios deposita en la zona inmediata a las desembocaduras, incrementando el depósito de Playa Honda, y parte del mismo permanece en suspensión, ingresando a la zona 2 (zona interior del Río de la Plata) donde comenzaría a estar sujeto a la dinámica formada por varios ciclos diarios de transporte, sedimentación, y resuspensión sucesivos que ocurren en la zona.

2) Así, parte del material que ingresó en la zona 2 quedará en el fondo pero parte también avanzará a la zona 4 (zona intermedia superior contra costa argentina), y parte avanzará hasta la zona 3 (zona intermedia superior contra la costa uruguaya). Parte de dicho material formará el depósito de la zona 3, que en términos de unidades morfológicas se conoce como el Banco Grande de Ortiz. El material que arribe a la zona 4 en cambio probablemente vuelva a ser resuspendido y arribe quizás a la zona 6 (zona intermedia inferior contra costa argentina) o a la zona 5 (zona intermedia inferior contra costa uruguaya).

3) El intenso transporte neto de la zona intermedia contra la costa uruguaya generará que muy probablemente el material que arribe a la zona 5 vuelva a ser

resuspendido ingresando nuevamente a los ciclos de transporte, sedimentación, y nuevamente erosión, los cuales serán acelerados por el aporte de las tormentas en la zona. Así, luego de probablemente varios años, el material descargado por los tributarios arribará a la zona 1, es decir, a la zona del frente.

4) Gran parte del material que llegue al frente permanecerá ahí como elemento constitutivo del fondo barroso que existe en la zona, ya que la misma presenta características de zona de deposición. Otra parte del sedimento podrá durante alguna tormenta, volver a ser resuspendido y pasar a estar en suspensión. Sin embargo, ahora en esta zona el sedimento en suspensión estará sujeto a una dinámica totalmente diferente a la que se encontraba en la zona interior e intermedia. Por un lado ahora el agua ya no es dulce, sino salobre con distintos grados en función de la dinámica del frente salino, y el material muy fino arcilloso reaccionará frente a dichos cambios en el medio, y al mayor contenido de materia orgánica que se encuentra en la zona. Además, ahora el sedimento encontrará flujos residuales diferenciados en la columna vertical que generan transportes horizontales del material fino diferentes, e incluso alguna parte del sedimento podrá volver a ingresar a la zona intermedia por el fondo, estando entonces sujeto a su dinámica conocida. Podrán ahora aparecer procesos de floculación que generen flocs de materiales provenientes quizás del exterior por resuspensión en eventos anteriores. Además, debido a las mayores profundidades el sedimento que haya sido mezclado en la columna de agua probablemente permanezca en suspensión más tiempo que el que permanecía en la zona intermedia.

5) Regulado por esta dinámica el sedimento podrá salir de la zona 1, y quizás depositar finalmente en la zona 9 sobre la costa uruguaya, o en la zona 7 sobre la costa argentina, o en la zona 8 central exterior del Río de la Plata. Parte de dicho material, no será resuspendido en la próxima tormenta, y pasará a formar parte del material de fondo de la misma, sujeto a los procesos de consolidación del suelo, los cuales dependerán de la mezcla con los otros materiales finos que arriben a la misma área, tanto en composición como en concentración, de las condiciones de salinidad, de las condiciones hidrodinámicas en la columna de agua, entre otros. Finalmente parte de dicho material sí volverá a ser resuspendido por alguna nueva tormenta severa en la zona, y mediante ciclos de transporte, sedimentación, y resuspensión a una escala mayor a la diaria, o sea, a la escala de tormentas (entre 5 y 8 días habitualmente), podrá finalmente salir en suspensión del Río de la Plata, probablemente por la zona costera uruguaya ó zona costera argentina, donde estará sujeto a una dinámica oceánica mucho más agresiva y fuerte, mediante la cual quizás siga avanzando.

Estos elementos presentados se consideran son base para los estudios de gestión ambiental en el Río de la Plata, en cuanto al manejo de los contaminantes adsorbidos en los sedimentos finos, y la relación con las pesquerías y su comportamiento. En este sentido, se considera hay un aporte de este trabajo a dichas áreas del conocimiento más allá del avance realizado en relación a la dinámica de sedimentos finos en sí misma.

Finalmente, se considera importante incluir en este capítulo final los pasos a desarrollar en el futuro vinculados al tema. Pienso en primer lugar que la herramienta generada debe ser utilizada en su estado actual para analizar nuevos elementos y mejorar la caracterización básica realizada en este estudio. A partir de esta primera etapa o estado de desarrollo del modelo se deberían ir posteriormente incorporando nuevos avances. Considero que el grupo de investigadores del CIMA, INA, IMFIA e IFREMER, que trabajaron en conjunto durante el Proyecto FREPLATA-FFEM, iniciador de este trabajo de tesis, deberían continuar trabajando juntos en base al desarrollo de nuevos elementos partiendo del estado actual del modelo. Como principal elemento a incorporar se destaca agregar la representación del proceso de consolidación (realizando previamente una calibración del modelo de consolidación representando los datos

obtenidos de los ensayos realizados en laboratorio), y de su efecto sobre la tensión de corte crítica de erosión del sedimento de fondo. De esta manera se espera diferenciar procesos de resuspensión de material en la zona exterior principalmente donde el sedimento arcilloso de la zona exterior puede presentar cierta consolidación entre un evento de tormenta y otro. Como una segunda etapa se presentende avanzar en un segundo nivel de resolución enfocado sobre la zona de mayor dinámica incluyendo los canales de navegación.

Más allá de los avances en el modelo de sedimentos finos planteados, y de la necesidad de continuar realizando mediciones de campo como se mencionó anteriormente, se considera importante también en el futuro cercano avanzar en los siguientes aspectos:

1) Incorporar en el modelo desarrollado información de imágenes satelitales como medidas indirectas de campo que puedan mejorar la comprensión y ajuste de la distribución espacial de los procesos vinculados a los sedimentos finos en el modelo. Esta fuente de información es de un gran potencial pero deben realizarse trabajos específicos para la calibración de las imágenes, con recolección de medidas de campo de calidad idóneas para ello. La experiencia adquirida en el Proyecto FREPLATA-FFEM muestra que más allá del acceso a las imágenes para considerar la información cómo válida es importante planificar con cuidado el trabajo de ajuste y calibración de las imágenes para obtener información cuantitativa, sino solamente las imágenes sirven para realizar análisis cualitativos. Se espera en el corto plazo contactarse con grupos especializados en el tema para definir lineamientos a seguir en esta línea.

2) Estudiar en detalle la dinámica del campo salino que muestra el modelo durante los dos años simulados. Más allá de estudios generales de la dinámica del campo salino no existen en el área estudios en detalle en base a modelos tridimensionales hasta el momento, debido principalmente a la falta de mediciones continuas que permitan el ajuste. En este trabajo se calibró el modelo hidrodinámico para representar los principales medidas de salinidad, debido a la importancia del campo salino en las corrientes y en la dinámica de sedimentos finos. De esta manera se cuenta con el modelo hidrodinámico de corta escala temporal tridimensional más completo generado en el área. A pesar de que en este trabajo se analizaron ciertos aspectos del campo salino por la relevancia para la dinámica de sedimentos hay todavía mucho para avanzar en base a ésta información generada. Se considera muy importante realizar un estudio completo de los diversos patrones de distribución de salinidad que se encuentran en la zona, analizando la dependencia con el viento por ser el principal forzante, pero también con los caudales, marea, etc. Parecería viable realizar una caracterización completa de las variaciones verticales de salinidad en las diversas zonas del Río de la Plata, obteniendo por ejemplo porcentajes de frecuencia asociados a las diversas situaciones.

3) En relación a los modelos hidrodinámicos habría que avanzar en diversos aspectos. El más importante sería contrastar el modelo SWAN con medidas de oleaje en la zona intermedia del Río de la Plata. No se tiene conocimiento de que se hayan realizado medidas continuas de oleaje en la zona, por lo que sería bueno trabajar con los organismos competentes para generarlas. No obstante se podría comenzar con considerar información satelital de las características del oleaje para evaluar el modelo en dicha zona. Respecto al modelo hidrodinámico de marea se considera que se alcanzó una calidad del mismo suficiente, y no se destaca ninguna debilidad, más allá de avances razonables como por ejemplo una mejora en la resolución espacial o la comparación y evaluación de la calidad del modelo con nuevas medidas de campo que surjan en zonas por ejemplo no chequeadas. No obstante, sí se considera importante continuar con el análisis de las tensiones de corte de fondo, y el estudio que contempla su determinación en base a los perfiles de corrientes y el oleaje.

Capítulo 7

7. BIBLIOGRAFÍA

Acha, E. M., Mianzan, H.; Guerrero, R.; Carreto, J.; Gilberto, D.; Montoya, N.; Carignan, M. (2008). An overview of physical and ecological processes in the Río de la Plata Estuary. *Continental Shelf Research* 28 (2008) 1579-1588.

Arakawa, A., Lamb, V. R. (1977). Computational design of the basic dynamical process of the UCLA General Circulation Model. In "Methods in Computational Physics". Vol 17.

Ardhuin, F., Rogers, E., Babanin, A. V., Filipot, J. F., Magne, R., Roland, A., Van der Westhuysen, A., Queffelec, P., Lefevre, J.M., Aouf, L. and Collard, F. (2010) Semiempirical Dissipation Source Functions for Ocean Waves. Part I: Definition, Calibration, and Validation. *Journal of Physical Oceanography*, 40, 1917–1941.

Been, K., Sills, G. (1981). Self-weight consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study. *Geotechnique* 31, N° 4, 519-535.

Bellón, D., Pedocchi, F., Piedra-Cueva I (2010). Determinación de concentraciones de sedimentos en suspensión a partir de perfiladores de corriente acústicos en la costa de Montevideo, Uruguay. *Memorias del XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Punta del Este, Uruguay, 2010.

Blumberg, A. F., Mellor, G. L. (1987). A description of three dimensional coastal ocean circulation model. In N. Heaps (Ed), *Three Dimensional Coastal Ocean Models*, American Geophysical Union, Washington, DC.

Blumberg, A. F., Khan, L. A.; St. John, J. P. (1999). Three-dimensional hydrodynamic model of New York Harbor Region. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 8, August, 799-816, 1999.

Booij, N., Ris, R. C., Holthuijsen, L. H., (1999). A third-generation wave model for coastal regions, 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, vol 104, N°. C4, April 15, 1999.

Boschi, E.E. (1988). El ecosistema estuarial del Río de la Plata (Argentina y Uruguay). *An. Inst. Cienc. Mar Limnol., Univ. Nac. Autón., México*, 15(2): pp. 159-182.

Dee, D. P., with 35 co-authors, (2011): The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 553-597.

Dufois, F., (2008). Modélisation du transport particulaire dans le Golfe du Lion en vue d'une application au devenir des traceurs radioactifs issus du Rhône. PhD Thesis, Université du Sud Toulon Var.

Dyer, Keith R. (1995). Sediment transport processes in estuaries. *Geomorphology and sedimentology of estuaries*. Chapter 14. *Developments in sedimentology* 53. G. M. E. Perillo. Elsevier.

Dyer, Keith R. (1997). *Estuaries: A Physical Introduction*, second ed., John Wiley & Sons, 1997, pp. 192.

ECOPLATA, (1999). “Diagnóstico ambiental y socio-demográfico de la zona costera uruguaya del Río de la Plata”. Recopilación de informes técnicos. ECOPLATA Apoyo a la gestión integrada de la zona costera uruguaya del Río de la Plata. 1999.

Elliott, A.J. (1978). Observations of the meteorologically induced circulation in the Potomac estuary, *Estuar. Coast. Mar. Sci.* 6 (1978) 285–300.

Fernández, M. (2011). “Revisión de un modelo regional de marea astronómica implementado sobre la región suroeste del Océano Atlántico”. Tesis de Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada, IMFIA, Facultad de Ingeniería.

Flemming, B. W. (2000). A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams. *Continental Shelf Research* 20:1125–1137.

Foreman, M. G. G., Henry R. F. (1989). The harmonic analysis of tidal model time series. *Advances in Water Resources*, 12, 109–120, 1989.

Fossati, M., Piedra-Cueva, I. (2006). Modelación tridimensional de la circulación en el Río de la Plata. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela, 9 al 14 de octubre 2006. IAHR.

Fossati, M., Piedra-Cueva, I. (2008). Numerical modelling of residual flow and salinity in the Río de la Plata, *Appl. Math. Model.* 32 (6) (2008) 1066–1086.

Fossati, M., Bellón, D., Lorenzo, E., Piedra-Cueva, I. (2009). Currents measurements in the coast of Montevideo, Uruguay, in: RCEM 2009 Proceedings of the River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Santa Fe, Argentina, September 2009.

Fossati M., Moreira D., Simionato C., Cayocca F., Tessier C., Sarubbi A. y Re M. (2010). Estudio del transporte de sedimentos en el Río de la Plata: primeros resultados de la modelación numérica. *Memorias del XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Punta del Este, Uruguay, 2010.

Fossati, M., Santoro, P., Urrestarazu, S., and Piedra-Cueva, I. (2011). “Numerical Study of the Effect of a Power Plant Cooling Water Discharge in the Montevideo Bay.” *Journal of Applied Mathematics*, 2011, 1–23.

Fossati, M., Leão, T., Pedocchi, F., Piedra-Cueva, I. (2012). Ensayos de columna de consolidación de sedimentos finos del Río de la Plata. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Costa Rica, 2012.

Fossati, M., Piedra-Cueva, I. (2013). A 3D hydrodynamic numerical model of the Río de la Plata and Montevideo’s coastal zone, *Appl. Math. Modell.* Vol 37 (3). 2013.

Framiñan M., Brown O., (1996). Study of the Rio de la Plata turbidity front, Part I: spatial and temporal distribution. *Continental Shelf Research*, Vol. 16 (10), pp. 727-742.

Framiñan, M. B., Valle-Levinson, A., Sepúlveda, and Brown, O. (2008). Tidal variations of flow convergence, shear, and stratification at the Río de la Plata estuary turbidity front. *J. Geophys. Res.*, 113, C08035.

FREPLATA (2004). “Análisis diagnóstico Transfronterizo del Río de la Plata y su Frente Marítimo”. Documento Técnico. Proyecto Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo. Proyecto PNUD/GEF/RLA/99/G31.

FREPLATA (2011). Estudio de la dinámica hidrosedimentológica del Río de la Plata: observación y modelación numérica de los sedimentos finos. Proyecto FREPLATA-FFEM, convenio de cooperación N° CZZ 1268.01.

Gaspar, R., Grégoris, Y., Lefevre, J. M. (1990). A Simple Eddy Kinetic Energy Model for Simulations of the Oceanic Vertical Mixing: Tests at Station Papa and Long-Term Upper Ocean Study Site. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, N° C9, 1990.

Geyer, W.R., Farmer, D.M. (1989). Tide induced variation of the dynamics of a salt wedge estuary, *J. Phys. Oceanogr.* 19 (1989) 1060–1072.

Geyer, W.R. (1997) Influence of wind on dynamics and flushing of shallow estuaries, *Estuar. Coast Shelf Sci.* 44 (1997) 713–722.

Glorioso, P., Flather, R. (1995). A barotropic model of the currents off SE South America. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, pp. 13427-13440.

Guarga, R.; Vinzon, S.; Rodriguez, H.; Piedra- Cueva, I. y Kaplan, E., (1992). Corrientes y sedimentos en el Río de la Plata. Montevideo; CARP; 1992. 116 p.

Guerrero R.A., Acha M. E., Framiñan M. E., Lasta C., (1997). Physical Oceanography of the Río de la Plata Estuary. *Continental Shelf Research*. Vol. 17 (7), pp. 727-742.

Hsu, M.H.; Kuo, A.Y.; Kuo, J.T.; Liu, W.C. (1999). Procedure to calibrate and verify numerical models of estuarine hydrodynamics. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 2, February, 166–182, 1999.

Huret , M.; Dadou, I.; Dumas, F.; Lazure, P.; Garcon V. (2005). Coupling physical and biogeochemical processes in the Río de la Plata plume. *Continental Shelf Research*, 25 (5-6), 629-653.

IMFIA. (2010) Calibración hidrodinámica y análisis de datos. 6° Informe Avance Proyecto FREPLATA-FFEM.

INA, (2009). Dinámica de sedimentos. Proyecto LHA 296. Informe LHA 02-296-08.

Kalnay E, M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, and D. Joseph, (1996). “The NMC/NCAR 40-Year Reanalysis Project”. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 pp. 437-471.

Kowalik, Z.; Murty, T. S. (1993). Numerical Modeling of Ocean Dynamics. *Advanced Serie on Ocean Engineering – Volume 5*. World Scientific, 1993.

Larson, M.; Bellanca, R.; Jonsson, L.; Chen, C.; Shi, P. (2005). A Model of the 3D Circulation, Salinity Distribution, and Transport Pattern in the Pearl River Estuary, China. *Journal of Coastal Research*, 21-5, 2005, 896–908.

Lazure, P., Dumas, F. (2008). An external–internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources*, Volume 31, Issue 2, February 2008, Pages 233–250.

Le Hir, P., Bassoullet, P., Jestin, H., (2001). Application of the continuous modeling concept to simulate high-concentration suspended sediment in a macrotidal

estuary. In W. McAnally and A. Mehta (Eds), Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes, pp. 229-247.

Leendertse, J. J., Gritton, E. C. (1971). A water-quality simulation model for well-mixed estuaries and coastal seas. In Computation Procedures, Volume 2, Report 2 R-708-NYC. New York City Rand Institute.

Liu, W. C.; Chen, W. B.; Cheng, R. T.; Hsu, M. H. (2008). Modelling the impact of wind stress and river discharge on Danshuei River plume. Applied Mathematical Modelling 32-7, 2008, 1255–1280.

Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. Ocean Dynamics, Vol. 56, pp. 394–415.

Lumborg, U., Windelin, A. (2003). Hydrography and cohesive sediment modelling: application to the Rømø Dyb tidal area. Journal of Marine Systems 38 (2003) 287– 303.

Lumborg, U. (2005). Modelling the deposition, erosion, and flux of cohesive sediment through Øresund. Journal of Marine Systems 56 (2005) 179– 193.

Mehta, A. J., McAnally, W. H. (2008). Chapter 4: Fine-grained sediment transport. Sedimentation engineering: process, measurements, modeling and practice; Manual of Practice 110; M. H. García Ed., American Society of Civil Engineers, ASCE.

Menéndez, A.; Ré, M.; Sarubbi, A.; García, P. (2009) A conceptual model for sediment transport in the Inner Plata River. RCEM 2009 Proceedings of the River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Santa Fe, Argentina, September 2009.

Merckelbach and Kranenburg (2004). Determining effective stress and permeability equations for soft mud from laboratory experiments. Geotechnique 54, N°9, 581-591.

Migniot, C. (1989) Tassement et rhéologie des vases. Première partie. Deuxième Partie. La houille Blanche N°1 y N°2, 11-28, 95-111, 1989.

Moreira, D., de los Campos, T., Capeluto Ware, A., Guerrero, R., Repecaud, M., Le Bihan, C., Balestrini, C., Firpo, A. y Fossati M. (2010). Estudio del transporte de sedimentos en el Río de la Plata: campañas oceanográficas. *Memorias del XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Punta del Este, Uruguay, 2010.

Mosquera, R.; Pedocchi, F., Bellón, D., Piedra-Cueva, I. (2012). Medición del oleaje con un ADCP frente a la costa de Montevideo, Uruguay. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Costa Rica, 2012.

Nichols Maynard, M (1993). Response of coastal plain estuaries to episodic events in the Chesapeake Bay Region. In Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport, Coastal Estuarine Stud., Mehta, A. J. (Ed.) vol. 42, 582 pp., AGU.

Nielsen, P. (1992). Coastal bottom boundary layers and sediment transport. Advanced series on ocean engineering. Vol 4. World Scientific.

Nielsen, P. (2009). Coastal and estuarine processes. Advanced series on ocean engineering. Vol 29. World Scientific.

Officer, C.B. (1992) Physics of Estuarine Circulation, in: B.H. Ketchum (Ed.), Estuaries and Enclosed Seas, Ecosystems of the World, vol. 26, Elsevier, Oxford, 1992, pp. 15–41.

Palma, E., Matano, R., Piola, A. (2004). A numerical study of the Southwestern Atlantic Shelf circulation: Barotropic response to tidal and wind forcing. Journal of Geophysical Research, Vol. 109.

Palma, E. D.; Matano, R. P.; Piola, A. R. (2008). A numerical study of the Southwestern Atlantic Shelf circulation: Stratified ocean response to local and offshore forcing. *Journal of Geophysical Research*, 113, 2008.

Pawlowicz, R.; Beardsley, B.; Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T TIDE. *Computers & Geosciences* 28, 2002, pp. 929–937.

Piedra-Cueva, I.; Lorenzo, E.; Fossati, M.; Bellón, D.; Ezzatti, P. (2006). Modelación Hidrosedimentológica del Río de la Plata. Informe Final Proyecto PDT S_C_OP_19_04. 233 pp.

Piedra-Cueva, I., Fossati, M. (2007). Residual currents and corridor of flow in the Río de la Plata. *Applied Mathematical Modelling*, 31-3, 2007, 564–577.

Piola A.R., Guerrero R.A., Osiroff A.P. y Molinari G., (2003). Climatología de frentes y estratificación del Río de la Plata. 5º Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar, Mar del Plata, Argentina.

Prandle, D. (2009). *Estuaries. Dynamics, Mixing, Sedimentation and Morphology*. Cambridge University Press. 2009.

Ré, M., Menéndez, A.N., Amsler, M.L., (2009). Metodología para la generación de series temporales de descarga sólida de los ríos Paraná de las Palmas y Paraná Guazú. Cuarto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, RIOS 2009, Salta, Argentina, Noviembre.

Saha, S. and co-authors, (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91:8, 1015-1057.

Santoro, P.; Fernández, M.; Fossati, M.; Piedra-Cueva, I. (2010). Estudio de la marea meteorológica en el Río de la Plata. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Uruguay, 2010.

Santoro, P.; Fernández, M.; Fossati, M.; Cazes, G.; Terra, R.; Piedra-Cueva, I. (2011a) Pre-operational forecasting of sea level height for the Río de la Plata. *Appl. Math. Modell.* 35, 2462–2478.

Santoro, P. (2011b). “Estudio de la marea meteorológica en el Río de la Plata”. Tesis de Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada, IMFIA, Facultad de Ingeniería.

Santoro, P.; Fossati, M.; Piedra-Cueva, I. (2012). Estudio numérico de la marea meteorológica en el Río de la Plata. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Costa Rica, 2012.

Santoro, P., Fossati, M., Piedra-Cueva, I. (in press). “Characterization of the circulation patterns in the Montevideo Bay (Uruguay).” *Journal of Coastal Research*. In press.

Sarubbi, A., (2007), Análisis del avance del Frente del Delta del Río Paraná, Tesis de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, 145 p.

Sepúlveda H., Valle-Levinson A., Framiñan M., (2003). Observations of subtidal and tidal flow in the Río de la Plata Estuary. *Continental Shelf Research*. Vol 24, pp. 509–525.

SHN (2010a). Servicio de Hidrografía Naval. Departamento Oceanografía. Proyecto FREPLATA-IFREMER. Resultados de la campaña. “Freplata-Ifremer/1”. Carlos F. Balestrini, Graziella Bozzano. Mayo, 2010.

SHN (2010b). Servicio de Hidrografía Naval. Departamento Oceanografía. Proyecto FREPLATA-IFREMER. Resultados de la campaña. “Freplata-Ifremer/2”. Carlos F. Balestrini, Graziella Bozzano. Septiembre, 2010.

SHN (2010c). Servicio de Hidrografía Naval. Departamento Oceanografía. Proyecto FREPLATA-IFREMER. Resultados de la campaña. “Freplata-Ifremer/3”. Carlos F. Balestrini, Graziella Bozzano. Diciembre, 2010.

SHN (2011a). Servicio de Hidrografía Naval. Departamento Oceanografía. Proyecto FREPLATA-IFREMER. Resultados de la campaña. “Freplata-Ifremer/4”. Carlos F. Balestrini, Graziella Bozzano. Febrero, 2011.

SHN (2011b). Servicio de Hidrografía Naval. Departamento Oceanografía. Proyecto FREPLATA-IFREMER. Resultados de la campaña. “Freplata-Ifremer/5”. Carlos F. Balestrini, Graziella Bozzano. Junio, 2011.

Simionato, C.G.; Dragani, W.; Nuñez, M.; Engel, M. (2004a) A Set of 3-D Nested Models for Tidal Propagation from the Argentinean Continental Shelf to the Río de la Plata Estuary—Part I. M2. *Journal of Coastal Research* 20 (3), 893–912. 2004.

Simionato, C.G.; Dragani, W.; Meccia, V.; Nuñez, M. (2004b). A numerical study of the barotropic circulation of the Río de la Plata estuary: sensitivity to bathymetry, the Earth’s rotation and low frequency wind variability. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 61 (2004) 261-273.

Simionato, C.G., Meccia, V., Dragani, W., Nuñez M (2005). Barotropic tide, Barotropic tide and baroclinic waves observations in the Río de la Plata estuary, *Journal of Geophysical Research* 110 (2005).

Simionato, C.G.; Meccia, V.L.; Dragani, W.C.; Nuñez, M.N. (2006) On the use of the NCEP/NCAR surface winds for modeling barotropic circulation in the Río de la Plata Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 70 (2006) 195-206.

Simionato C. and co-authors (2008). Short time-scale wind forced variability in the Río de la Plata Estuary and its role on ichthyoplankton retention. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 76, No. 2. (20 January 2008), pp. 211-226.

Soulsby, R.L., Hamm, L., Klopman, G., Myrhaug, D., Simons, R.R. y Thomas, G.P. (1993). Wave-current interaction within and outside the bottom boundary layer. *Coastal Engineering*, 21, 41-69.

Soulsby, R.L., (1997). Dynamics of marine sands. A manual for practical applications. Thomas Telford, London, 249pp.

Soulsby, R.L., Clarke, S., (2005). Bed Shear-Stresses Under Combined Waves and Currents on Smooth and Rough Beds. Report TR137. HRWallingford. Wallingford, UK, 22pp.

SWAN, (2006). SWAN user manual. SWAN team. Delft University of Technology, 2006. The Netherlands.

Tessier C., (2006). Caractérisation et dynamique des turbidités en zone côtière: L'exemple de la région marine Bretagne Sud, PhD Thesis, Université de Bordeaux.

Trancoso, A.R; Saraiva, S.; Fernandes, L.; Pina, P.; Leitao, P.; Neves, R. (2005). Modelling macroalgae using a 3D hydrodynamic-ecological model in a shallow, temperate estuary. *Ecological Modelling* 187, 2005, 232–246.

Waeles, B.; Le Hir, P.; Lesueur, P. (2008). A 3D morphodynamic process-based modelling of a mixed sand/mud coastal environment: the Seine estuary, France.

Sediment and Ecohydraulics: INTERCOH 2005. T. Kusuda, H. Yamanishi, J. Spearman, J. Z. Gailani (editors).

Wang D.P. (1979). Wind-driven circulation in the Chesapeake Bay, Winter, 1975, *J. Phys. Oceanogr.* 9 (1979) 564–572.

Wells P. G., Daborn, G. R. Eds. (1998). *El Río de la Plata. Una Revisión Ambiental. Un informe de antecedentes del Proyecto ECOPLATA.* Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Canadá. 256 pp.

Whitehouse, R.J.S; Soulsby, R. L, Roberts, W and Mitchener, H. J. (2000). *Dynamics of Estuarine Muds: a manual for practical applications.* Thomas Telford, London.

Winterwerp, J. C., Kesteren, W. G. M. V. (2004). *Introduction to the Physics of Cohesive Sediment in the Marine Environment. Developments in sedimentology 56.* T. Van Loon. Elsevier.

Anexo A

A. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE CAMPO VINCULADA A LOS SEDIMENTOS FINOS

A.1. INFORMACIÓN INDIRECTA DE CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTO FINO EN LA COSTA DE MONTEVIDEO

A partir de mediciones de un perfilador acústico ADCP fondeado en el fondo sobre las costas uruguayas del Río de la Plata a aproximadamente 3,5 km de la costa ($34^{\circ} 57' 36''$ latitud S, $56^{\circ} 09' 39''$ longitud W) se determinó el perfil de concentraciones de sedimento en suspensión (Bellón et al., 2010). Para el año 2009 se cuenta con mediciones para los períodos comprendidos entre 1/01/2009 y 10/03/2009; 03/04/2009 y 13/06/2009; y 15/09/2009 y 25/11/2009. La discretización vertical de la información es de 0,35 m y la frecuencia de medición temporal es de 30 minutos. Estos datos muestran un perfil de concentración de sedimento en suspensión con importante variación temporal y un perfil estratificado, con mayores concentraciones en el fondo.

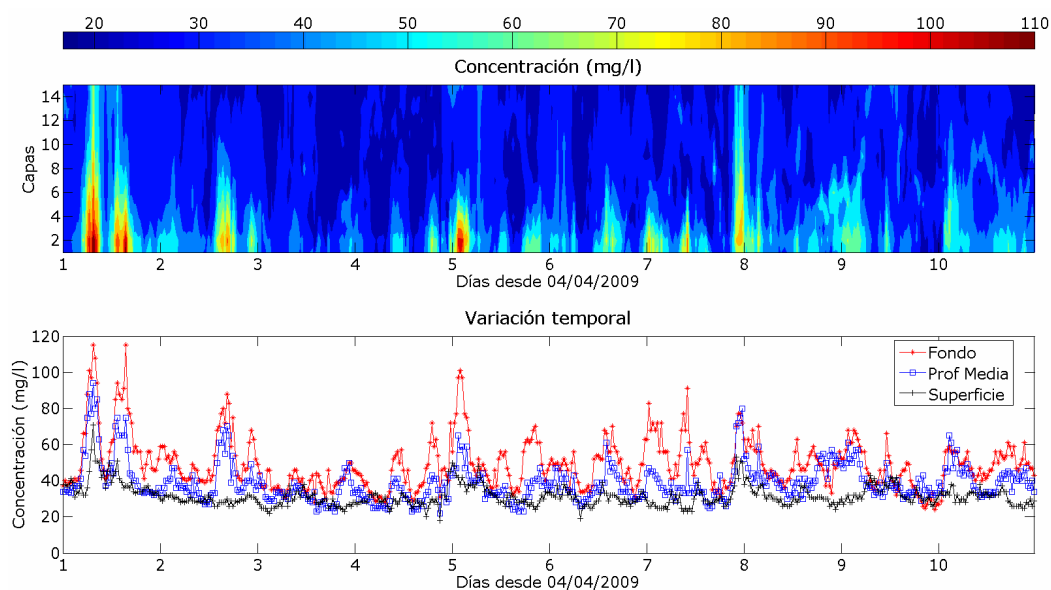


Figura A.1: Ejemplo de perfil vertical de concentración de sedimento en suspensión medido en Montevideo (04/04/2009 al 14/04/2009).

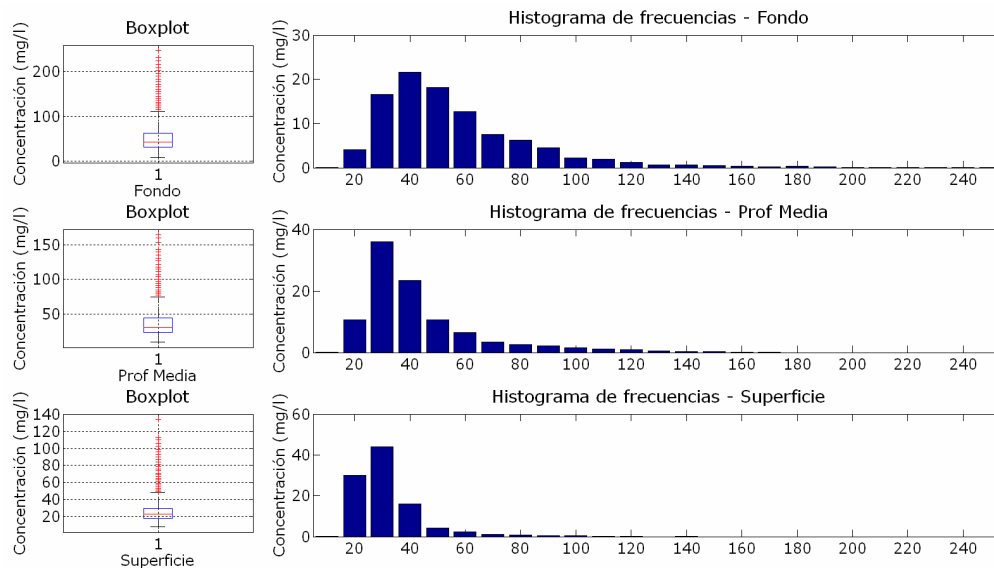


Figura A.2: Parámetros estadísticos (boxplots e histogramas de frecuencia) calculados para las series de concentración de sedimento en suspensión en fondo, a profundidad media y en la superficie, para las medidas del 2009 en la costa de Montevideo.

En la Figura A.1 se presenta a modo de ejemplo el perfil vertical de concentración de sedimento en suspensión medido en Montevideo durante 10 días. Se observa en general los valores son bajos con eventos de gran aumento de la concentración. Se observan también valores mayores en el fondo. En la Figura A.2 se presentan determinados estadísticos calculados para las capas de fondo, a profundidad media y en superficie. En el fondo el 42 % de los datos es menor a 40 mg/l mientras que en superficie el 90 % de los datos es menor a dicho umbral.

A.2. DEPURACIÓN DE LOS DATOS DEL ADCP DE LA BOYA OCEANOGRÁFICA

El ADCP instalado en la Boya se ubica aproximadamente a 2 m respecto del piso de la misma unido por una varilla sólida y realiza las mediciones desde esa posición hacia el fondo (se dice que “mira” hacia abajo). Esto significa el ADCP se mueve solidario con la superficie libre y por tanto oscila con la marea real en la zona. Debido a esto, la profundidad de las capas medidas y el número de capas registradas varía en función de la oscilación que registra la superficie libre. Para poder utilizar estos datos en diversas aplicaciones, como por ejemplo analizar la estructura del perfil de velocidades medido en la zona o utilizarlos para comparar y ajustar el modelo numérico, es conveniente transformarlos a un sistema de referencia absoluto. Los datos de corrientes fueron procesados para modificar el sistema de referencia de las medidas, pasando del sistema referenciado a la ubicación del sensor, a un sistema absoluto referenciado desde el fondo.

Para esto se utilizó la información registrada por el ECHO de la señal que envían los sensores del ADCP. Cuando la señal ingresa en el fondo (cambia de medio) se observa un cambio brusco en el retorno del eco. El eco aumenta al llegar al fondo y al ingresar al mismo disminuye mucho el retorno. A modo de ejemplo, se muestra en la Figura A.3 el eco registrado durante un determinado período de tiempo por el ADCP de la Boya, donde se observa en el cuadro de la izquierda que a una profundidad aproximada de 5 m de la capa superior hay una variación importante de la señal que indica la presencia del fondo. También se puede observar en la evolución temporal del perfil (cuadro derecho) la influencia de la señal de marea con el aumento y disminución de la profundidad entre el primer registro y el fondo.

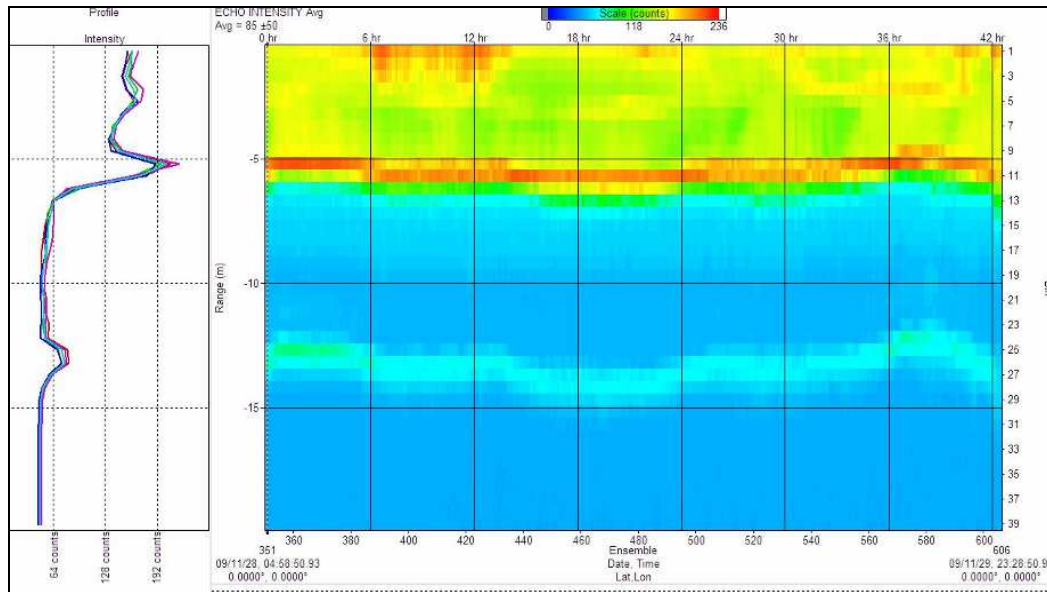


Figura A.3: Ejemplo de la fluctuación (disminución abrupta) de la señal del backscatter registrada por el ADCP ubicado en la Boya al encontrarse con el fondo.

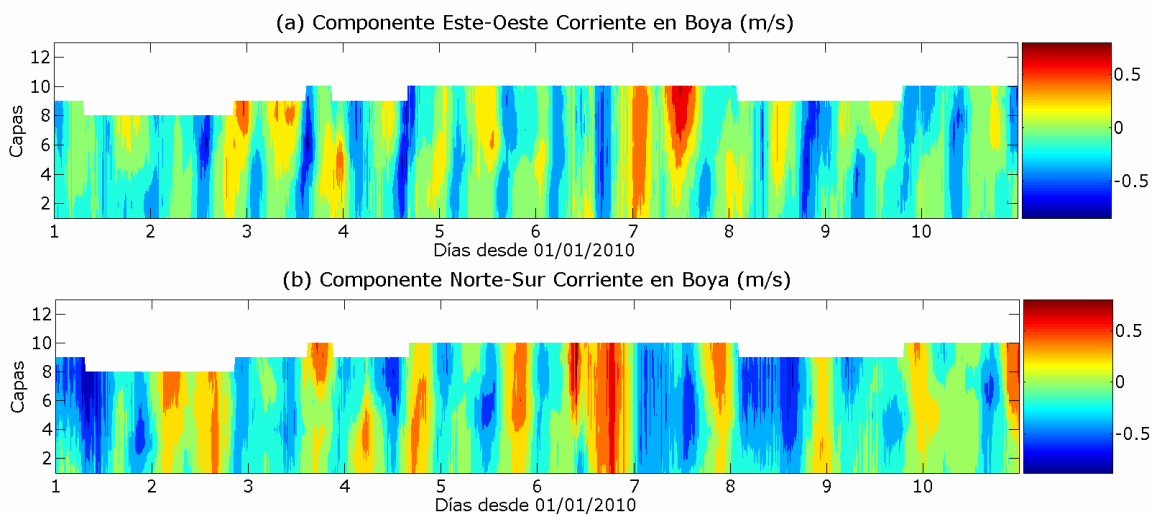


Figura A.4: Ejemplo del perfil de corrientes medido en la Boya con referencia a fondo fijo, (a) componente Este-Oeste y (b) componente Norte-Sur obtenida para el período del 1/01/2010 al 10/01/2010.

Teniendo esto en cuenta se realizó un script que en primer lugar determina para cada instante el máximo gradiente del echo en el perfil registrado y establece el fondo en dicha ubicación. Es importante aclarar que la resolución vertical del equipo (seteada en 0,5 m) impone que la altura medida sea múltiplo de dicho valor. Una vez identificado el fondo se aplica un filtro para evitar discontinuidades bruscas en la variación temporal del número de capas (equivalente a la profundidad). Se considera dicha variación es producto de la fluctuación de la superficie libre en escalas de tiempo mayores al tiempo entre los registros de corriente (10 o 15 minutos según los seteos). En este filtrado se considera entonces la característica de marea semidiurna de la zona, imponiendo en el mismo que por lo menos durante 6 horas se mantenga un mismo número de capas de corriente registradas o en definitiva la profundidad. Los resultados obtenidos luego del procesamiento son: el perfil de flujo (componentes horizontales, intensidad y dirección) con una resolución de 0,5 m y la identificación de la altura entre el fondo y la capa

superior medida (ubicada a 0,65 m por debajo del lente del equipo). En la Figura A.4 se presenta un ejemplo del perfil de corrientes obtenido en la Boya luego del procesamiento mencionado.

Una vez procesados estos datos es posible analizar el perfil de corrientes desde el fondo hasta casi 3 m por debajo de la superficie libre, distancia determinada por la zona muerta del ADCP y la distancia entre el equipo y el fondo de la Boya. No obstante, es importante mencionar que se observa en los datos de profundidad de los sensores registrado por el ADCP, que la misma no es constante, sino que varía debido a los balanceos e inclinaciones de la boya por las perturbaciones de la superficie libre. En los casos donde dicha profundidad presenta fluctuaciones elevadas en cortos períodos de tiempo se considera refleja movimientos grandes del equipo (probablemente debido a tormentas fuertes) y por tanto dichos datos deben ser descartados.

Período	Subperíodo	Fechas	Número de días	Frecuencia medición (min)	Capas (min / max)
Período 1	Período 1	26/11/2009 al 18/03/2010	110	10	8 / 13
Período 2	Período 2a	18/03/2010 al 26/04/2010	38	10	9 / 14
	Período 2b	06/05/2010 al 24/06/2010	49		
Período 3	Período 3	28/07/2010 al 25/08/2010	28	15	8 / 13
	Período 4a	25/08/2010 al 29/08/2010	4		
Período 4	Período 4b	29/08/2010 al 09/09/2010	11	10	9 / 14
	Período 4c	07/10/2010 al 20/10/2010	13		

Tabla A.1: Características de los datos registrados por el ADCP de la Boya en cada período de medición.

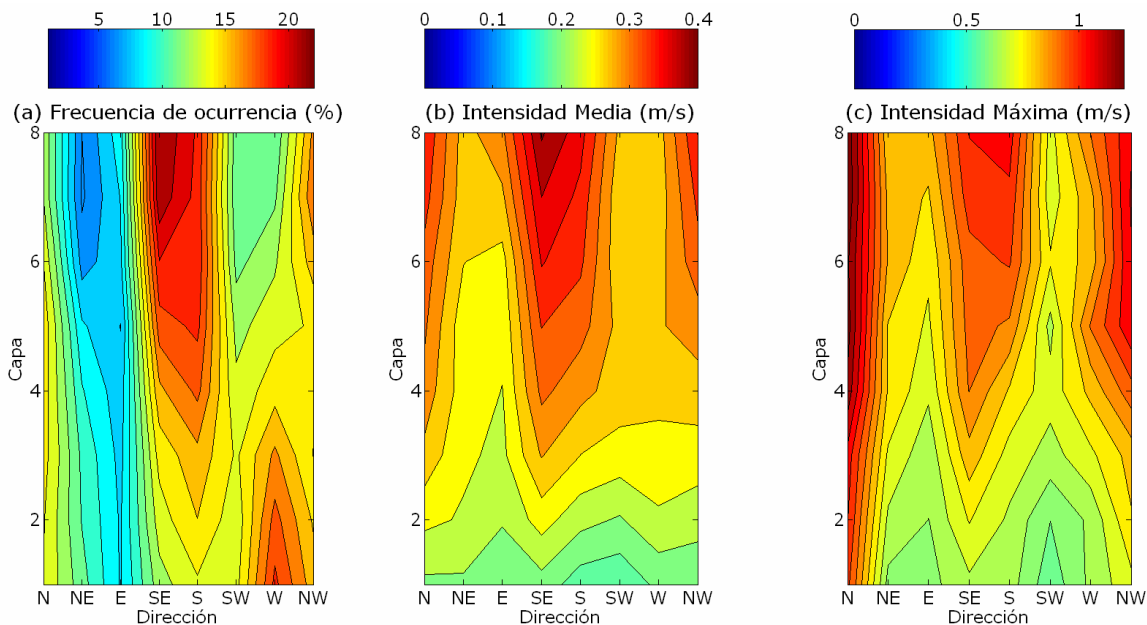


Figura A.5: Distribución vertical direccional de (a) porcentaje de frecuencia de ocurrencia, (b) intensidad media e (c) intensidad máxima, de la corriente en la Boya durante el Período 1.

En la Tabla A.1 se presentan las características de las mediciones de corriente disponibles registradas por el ADCP de la Boya. A partir de las medidas del perfil de corriente de cada período procesadas según la metodología mencionada anteriormente se determinó el perfil direccional de frecuencias de ocurrencia. Para estos análisis se

utilizaron los datos de las capas mínimas registradas, es decir, entre la capa 1 y la capa 8 lo que cubre 4 m desde el fondo.

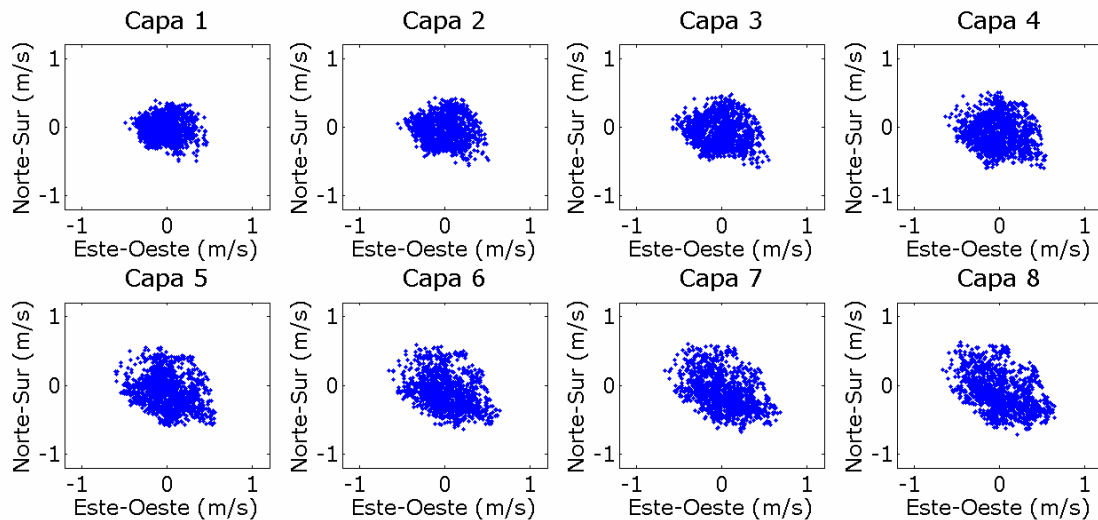


Figura A.6: Ejemplo de diagramas de la corriente medida desde el fondo (capa 1) hacia la superficie; mediciones del 10 al 15 de diciembre de 2009.

A partir de la depuración de los datos es posible caracterizar las mediciones de corriente en la dirección vertical. A modo de ejemplo se presenta en la Figura A.5 las distribuciones verticales direccionales de la frecuencia de ocurrencia, intensidad media e intensidad máxima de las corrientes medidas en la Boya para el Período 1 de medición. Se observan corrientes con mayor frecuencia provenientes del sector SE, S, W y NW, con intensidades medias de 0,3 m/s aproximadamente y valores máximos que superan 1 m/s. Un ejemplo de diagrama espacial de corrientes en un período de 5 días se presenta en la Figura A.6.

A.3. VINCULACIÓN DE LA SEÑAL DEL PERFILADOR ADCP Y LA MEDIDA DEL SMATCH EN LA BOYA

Considerando la información simultánea del ADCP y del turbidímetro SMATCH instalados en la Boya se exploró si existe una relación entre la intensidad del echo de la señal procesada del ADCP con las medidas del SMATCH. Se utilizaron los conceptos de la teoría de medición de turbidez a partir de las medidas de ADCP utilizando la señal acústica del sonar del equipo (Tessier, 2006). Se parte de la ecuación del sonar, la que menciona que el nivel de la señal acústica recibida será igual al nivel emitido menos las pérdidas por transmisión por la propagación de la onda en el medio más un coeficiente de retrodifusión vinculado con las partículas presentes. Ese coeficiente en varios trabajos se ha vinculado con la señal de turbidez o con la concentración de sedimento en suspensión, en el medio a través de una ecuación lineal en base logarítmica (Tessier, 2006; Bellón et al., 2010). En este caso se buscó determinar una relación lineal entre la señal de retrodifusión del echo del ADCP y la turbidez registrada en el SMATCH a la misma profundidad.

La relación lineal entre ambos parámetros se buscó en primer lugar considerando todas las medidas continuas registradas por período de medición. Los resultados obtenidos (no presentados) no mostraron correlación alguna entre ambas señales y por tanto se buscó un ajuste para los eventos de resuspensión de sedimento identificados en la señal de turbidez. Los resultados obtenidos analizando los eventos por período de

medición fueron más variados. En el Período 1 de medición de datos en la Boya se obtuvo un mejor ajuste al analizar separadamente los eventos de resuspensión pero el comportamiento obtenido entre cada evento fue muy diferente. Debido a esto, al ajustar conjuntamente los eventos identificados el ajuste obtenido presenta un coeficiente menor a 0,2. En el Período 2 se observaron resultados similares. Debido a la menor extensión de las mediciones del ADCP del Período 3 se identificaron menos eventos de incremento de turbidez aunque el ajuste de los mismos en general fue aceptable. Al considerarlos en conjunto se obtuvo un valor bajo pero mayores a los de los períodos anteriores, entre 0,35 y 0,4. No obstante se considera el ajuste no es aceptable.

En definitiva no ha sido posible vincular la señal del echo del ADCP con las mediciones de turbidez del SMATCH de forma de obtener el perfil de turbidez en la zona de la Boya. Esto puede deberse a distintos motivos, vinculados con el tamaño de partículas existentes en la zona (limos y arcillas en proporciones similares) o a la movilidad de los instrumentos asociados al movimiento de la Boya, entre otros.

A.4. AJUSTE RELACION TURBIDEZ/CONCENTRACIÓN EN LA BOYA OCEANOGRÁFICA

En este punto se analizan las diversas fuentes de datos vinculadas con sedimento en suspensión disponibles en la Boya y se evalúa si es posible determinar una relación de calibración entre la turbidez medida en NTU con el SMATCH y la concentración de sedimento en suspensión. Se analiza la posibilidad de utilizar la información de concentración de material particulado en suspensión (MPS) obtenida de las muestras de agua extraídas de la estación #22 de la Boya en las campañas para calibrar los datos de turbidez registrados con los dos equipos SMATCH que se utilizaron en la Boya. Las muestras fueron extraídas aproximadamente a 3 metros de la superficie libre y el SMATCH se encuentra aproximadamente a 2,5 m de la superficie libre. Durante los Períodos 1 y 2 de medición se utilizó el mismo equipo de medición, el n° 20039, habiéndose utilizado en el resto de los períodos el equipo n° 20038. Es posible vincular los datos del equipo n° 20039 con los datos de las campañas 1 (C1), 2 (C2) y 3 (C3), y los datos del equipo n° 20038 con los datos de las campañas 3 (C3), 4 (C4), 5 (C5) y 6 (C6).

En relación al ajuste del equipo n° 20039, la información de la C1 se corresponde con el primer instante del Período 1 de medición, la información de la C2 se corresponde con el último instante del Período 1 (o también es posible relacionarlo con la primera medición del Período 2) y la información de la C3 se corresponde con el último instante del Período 3. En la Figura A.7 se presenta el ajuste obtenido vinculando los datos mencionados anteriormente; se observan buenos resultados aunque se cuenta con apenas tres datos para ajustar. La opción 1 corresponde a vincular la medición de la C2 con el valor de turbidez registrado al final del Período 1, mientras que en la opción 2 el valor de concentración se vincula con la turbidez registrada en el SMATCH al principio del Período 2. Aunque estos dos valores registrados por el SMATCH son muy similares se observa que cambia el ajuste al utilizar uno u otro. El ajuste A se obtuvo imponiendo que el punto (0,0) pertenezca a la recta. Se observa que la calidad del ajuste A obtenido es buena. Aunque parezca razonable mantener dicha condición se exploró la posibilidad de obtener un ajuste lineal sin que el punto (0,0) pertenezca a la misma, denominado ajuste B. Se observa que la calidad del ajuste obtenido en este caso se incrementa para las dos opciones, siendo para la opción 1 un ajuste casi perfecto.

En función de los resultados, se decide utilizar el ajuste B obtenido para la opción 1 de datos para obtener valores de concentración en mg/l a partir de los datos de turbidez registrados con el SMATCH n° 20039 durante los Períodos 1 y 2 de medición. Es

importante observar que con este ajuste aunque el turbidímetro registre valores nulos de turbidez la concentración equivalente es de casi 4 mg/l.

Respecto al ajuste del equipo SMATCH n° 20038 que fue utilizado en la Boya durante los Períodos 3, 4 y 5 de medición, se cuenta con la información de concentración de las campañas 3, 4 y 5 para intentar un ajuste. Sin embargo, el SMATCH midió durante los instantes cercanos a las mediciones de dichas campañas valores iguales a 0 NTU. Debido a esto no es posible obtener un ajuste que vincule las mediciones de turbidez con la concentración de sedimento en suspensión para el equipo n° 20038 y por tanto durante los Períodos 3, 4 y 5 de medición la información en la Boya se trabaja en dimensiones de turbidez (NTU).

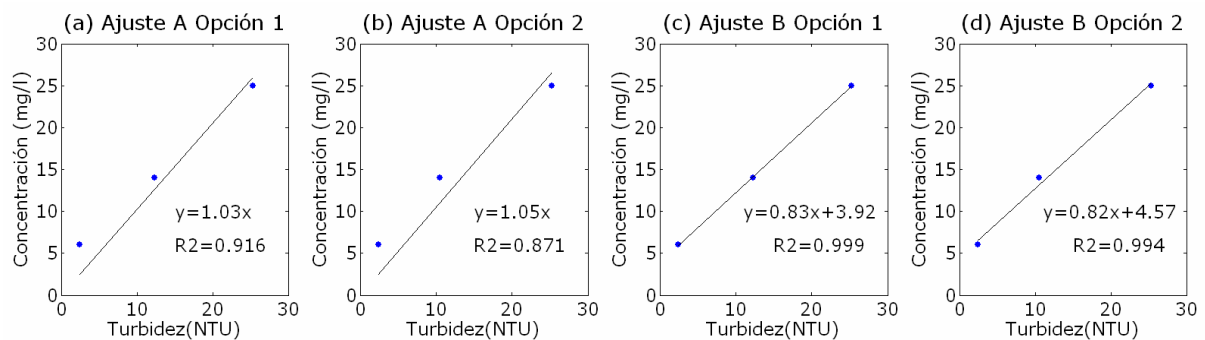


Figura A.7: Diversos ajustes lineales obtenidos de los datos de turbidez medidos por el SMATCH n° 20039 de la Boya con la concentración de sedimento en suspensión.

A.5. DEPURACIÓN DE LOS DATOS DEL SPT2 DE TORRE OYARVIDE

A.5.1. Período 2 de medición

El equipo SP2T utilizado durante el Período 2 es el equipo 5086 seteado para registrar datos cada una hora. En la campaña 3 se recuperaron los datos correctamente.

La serie de presión registrada se depuró y analizó. Se eliminaron en primer lugar la profundidad media del sensor determinada a partir del promedio de la serie de profundidad durante este período es igual a 2,14 m. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura A.8.

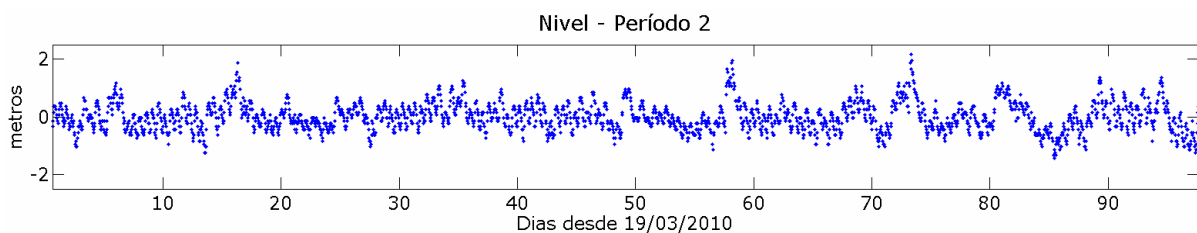


Figura A.8: Registros depurados de nivel del SPT2 ubicado en Torre Oyarvide durante el Período 2 de medición.

A.5.2. Período 5 de medición

El equipo SP2T utilizado durante el Período 5 es el equipo 5086 seteado en este caso para registrar oleaje, midiendo cada un segundo durante 600 segundos (10 minutos) cada 3 horas. En la campaña 5 se recuperaron los datos correctamente.

Para cada set de registros de presión de alta resolución recolectado se determinaron las principales variables del oleaje: altura significativa y altura máxima,

altura máxima y Período. En la Figura A.9 se muestran los resultados obtenidos. Se observan períodos en general bajos entre 3 y 5 seg, con algunos valores altos entre 7 y 9 seg. En relación a la altura significativa del oleaje se observan en general valores entre 0.1 y 0.4 m con algunos registros altos un poco menores a 1 m. Los valores de altura máxima alcanzan los 2 m. Se observa también que la variación temporal obtenida muestra una señal ruidosa que pone en duda la calidad de los mismos, lo cual requiera probablemente de un análisis más profundo. Por tanto no serán considerados estos datos en análisis posteriores, por ejemplo en el ajuste del modelo de oleaje.

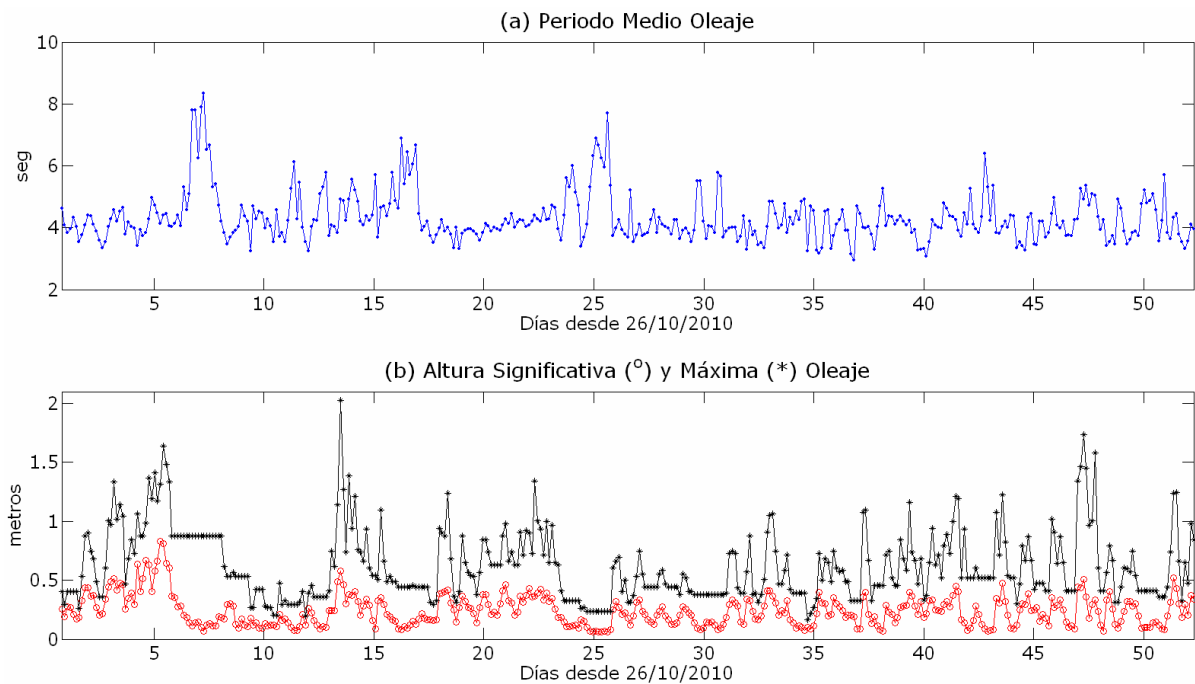


Figura A.9: Serie temporal de (a) período de olea y (b) altura significativa y máxima calculada a partir de los registros de presión del SPT2 de Torre Oyarvide durante el Período 5 de medición.

Anexo B

B. MODELACIÓN NUMÉRICA DE LOS FORZANTES HIDRODINÁMICOS: CORRIENTES Y OLEAJE

B.1. VALIDACIÓN MODELO HIDRODINÁMICO RANK0

A modo de ejemplo de la validación del modelo rank0 se presenta en la Figura B.1 la comparación de niveles medidos y obtenidos con el modelo en Mar del Plata para enero y febrero 2004, y en la Figura B.2 la comparación en La Paloma durante julio, agosto y setiembre 2004.

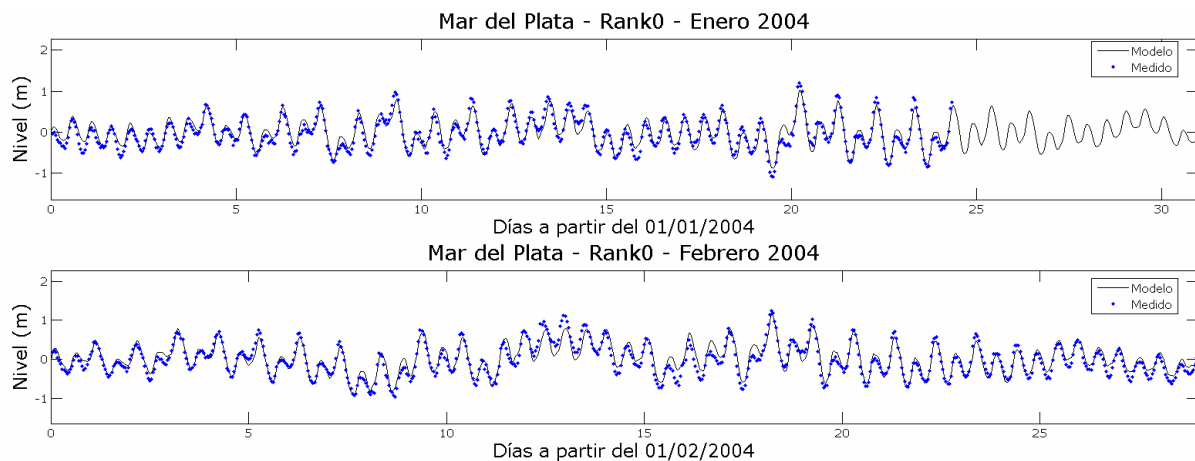


Figura B.1: Comparación de la serie de niveles medido y obtenido con el modelo rank0 en Mar del Plata durante enero y febrero 2004.

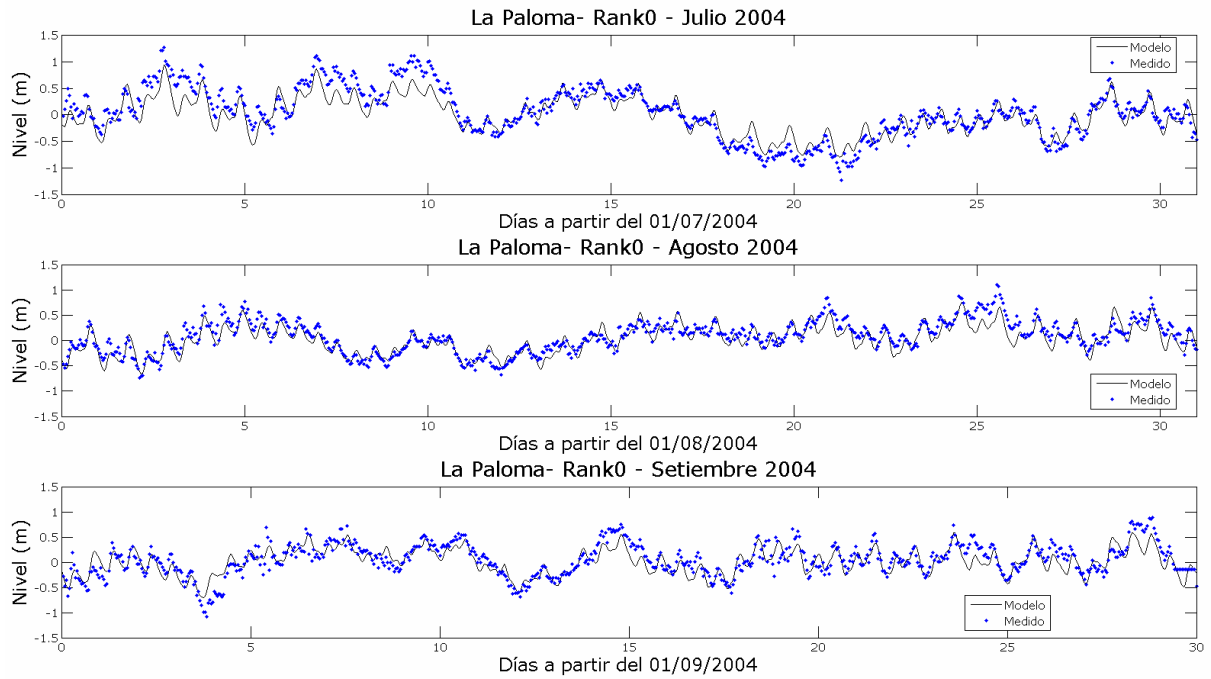


Figura B.2: Comparación de la serie de niveles medido y obtenido con el modelo rank0 en La Paloma durante julio, agosto y setiembre de 2004.

B.2. AJUSTE DEL MODELO OLEAJE – VIENTOS CEP

En las Tablas B.1, B.2 y B.3 se presentan los errores y las correlaciones obtenidas al comparar con los datos en PB e Hidrovía los resultados del modelo, período medio, período pico, y dirección de ola respectivamente, con las diferentes versiones del modelo SWAN con vientos CEP y el modelo global WW3 para los períodos de tiempo simulados. Por otro lado en las Tablas B.4, B.5 y B.6 se presentan los valores de RMSE y correlación para el período medio, período pico y dirección de ola, respectivamente, obtenidos para las diversas configuraciones del modelo modificando la formulación utilizada en la definición de la fricción de fondo.

(a) Período Medio Oleaje PB - 2009

		MESES DEL AÑO 2009					
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
SWAN Viento CEP x1.0	RMSE (m)	1.69	2.16	1.85	2.65	4.14	2.41
	Correlación	0.27	0.10	0.12	-0.22	-0.34	0.06
SWAN Viento CEP x1.3	RMSE (m)	1.55	2.09	---	---	---	---
	Correlación	0.19	-0.04	---	---	---	---
Modelo WW3	RMSE (m)	4.47	5.58	4.68	6.60	8.47	5.82
	Correlación	-0.12	-0.17	-0.16	0.20	0.23	-0.02

(b) Período Medio Oleaje Hidr - 2006

		MESES DEL AÑO 2006					
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
SWAN Viento CEP x1.0	RMSE (m)	1.36	1.68	1.74	1.68	1.63	1.54
	Correlación	0.54	0.78	0.59	0.38	0.78	0.76

Tabla B.1: Valores de error y correlación obtenidos para el período medio de ola obtenida con el modelo utilizando los vientos CEP y los datos medidos en PB e Hidrovía.

		MESES DEL AÑO 2009					
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
SWAN Viento CEP x1.0	RMSE (m)	1.68	3.20	2.03	4.46	6.16	3.10
	Correlación	0.30	0.10	0.28	-0.15	-0.15	0.09
SWAN Viento CEP x1.3	RMSE (m)	1.86	3.19	---	---	---	---
	Correlación	0.10	0.05	---	---	---	---

		MESES DEL AÑO 2006					
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
SWAN Viento CEP x1.0	RMSE (m)	3.38	3.38	3.22	4.53	5.14	4.51
	Correlación	0.21	0.59	0.45	0.01	0.20	0.38

Tabla B.2: Valores de error y correlación obtenidos para el período pico de ola obtenida con el modelo utilizando los vientos CEP y los datos medidos en PB e Hidrovía.

		MESES DEL AÑO 2009					
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
SWAN Viento CEP x1.0	RMSE (m)	51.39	49.15	50.28	63.19	85.39	36.44
	Correlación	0.53	0.63	-0.05	0.58	0.31	0.80
SWAN Viento CEP x1.3	RMSE (m)	56.76	65.49	---	---	---	---
	Correlación	0.53	0.48	---	---	---	---
Modelo WW3	RMSE (m)	52.87	62.72	50.78	69.20	91.37	36.69
	Correlación	0.59	0.49	0.05	0.51	0.32	0.83

		MESES DEL AÑO 2006					
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
SWAN Viento CEP x1.0	RMSE (m)	70.74	39.29	44.98	61.17	37.91	94.27
	Correlación	0.24	0.73	0.57	0.54	0.60	0.30

Tabla B.3: Valores de error y correlación obtenidos para la dirección de ola obtenida con el modelo utilizando los vientos CEP y los datos medidos en PB e Hidrovía.

		MESES DEL AÑO 2006		MESES DEL AÑO 2009	
		Ene	Feb	Ene	Feb
Fricción Jonswap	RMSE (m)	1.36	1.68	1.69	2.16
	Correlación	0.54	0.78	0.27	0.10
Fricción Collins fcd	RMSE (m)	---	---	1.13	---
	Correlación	---	---	0.37	---
Fricción Collins fc1	RMSE (m)	1.05	---	1.31	---
	Correlación	0.59	---	0.34	---
Fricción Collins fc2	RMSE (m)	1.20	1.62	1.48	1.86
	Correlación	0.57	0.73	0.30	0.28

Tabla B.4: Valores de error y correlación obtenidos para el período medio de ola obtenida con el modelo con diversas parametrizaciones de la rugosidad de fondo utilizando los vientos CEP y los datos medidos en PB e Hidrovía.

Período Pico Oleaje		MESES DEL AÑO 2006		MESES DEL AÑO 2009	
		Ene	Feb	Ene	Feb
		Fricción Jonswap	RMSE (m)	3.38	3.38
	Correlación	0.21	0.59	0.30	0.10
Fricción Collins fcd	RMSE (m)	---	---	3.06	---
	Correlación	---	---	-0.03	---
Fricción Collins fc1	RMSE (m)	2.32	---	2.08	---
	Correlación	0.61	---	0.22	---
Fricción Collins fc2	RMSE (m)	2.99	2.92	1.58	3.07
	Correlación	0.35	0.65	0.38	0.14

Tabla B.5: Valores de error y correlación obtenidos para el período pico de ola obtenida con el modelo con diversas parametrizaciones de la rugosidad de fondo utilizando los vientos CEP y los datos medidos en PB e Hidrovía.

Dirección Oleaje		MESES DEL AÑO 2006		MESES DEL AÑO 2009	
		Ene	Feb	Ene	Feb
		Fricción Jonswap	RMSE (m)	70.74	39.29
	Correlación	0.24	0.73	0.53	0.63
Fricción Collins fcd	RMSE (m)	---	---	40.74	---
	Correlación	---	---	0.64	---
Fricción Collins fc1	RMSE (m)	70.09	---	40.62	---
	Correlación	0.20	---	0.65	---
Fricción Collins fc2	RMSE (m)	70.38	42.72	44.72	48.81
	Correlación	0.21	0.66	0.59	0.54

Tabla B.6: Valores de error y correlación obtenidos para la dirección de ola obtenida con el modelo con diversas parametrizaciones de la rugosidad de fondo utilizando los vientos CEP y los datos medidos en PB e Hidrovía.

A modo de ejemplo se presenta la comparación de las series temporales de los parámetros del oleaje medido en PB con los resultados obtenidos con la configuración final del modelo de oleaje SWAN para los meses de febrero (Figura B.3) y mayo (Figura B.4) 2009. Se observa el modelo representa correctamente el oleaje (altura y dirección) en la zona representando los eventos mayores e intermedios principalmente. En relación al período se reproducen correctamente los períodos picos bajos obtenidos en las medidas.

A modo de ejemplo se presenta la comparación de las series temporales de los parámetros del oleaje medido en Hidrovía con los resultados obtenidos con la configuración final del modelo de oleaje SWAN para febrero (Figura B.5) y mayo (Figura B.7) 2006. Se observa que también en la zona exterior del Río de la Plata el modelo representa correctamente el oleaje representando los eventos mayores e intermedios principalmente. En relación al período se reproducen correctamente los períodos picos bajos obtenidos en las medidas.

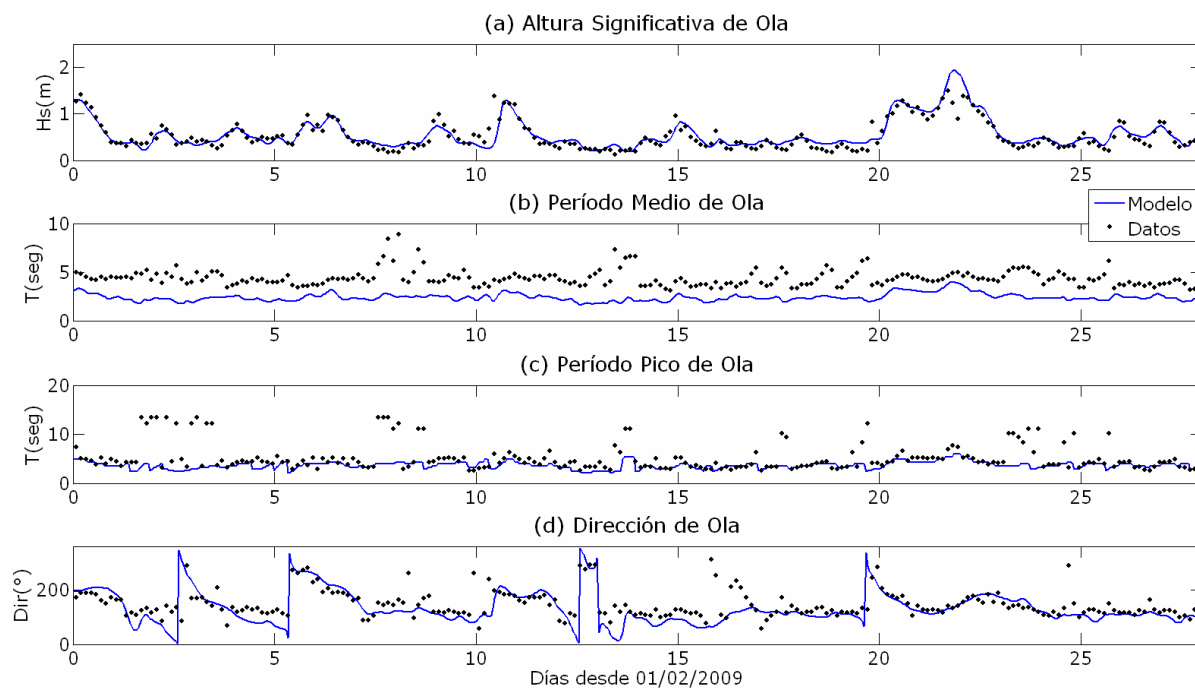


Figura B.3: Variación temporal del oleaje medido en PB y obtenido con el modelo SWAN con los parámetros finales y vientos CEP; febrero 2009.

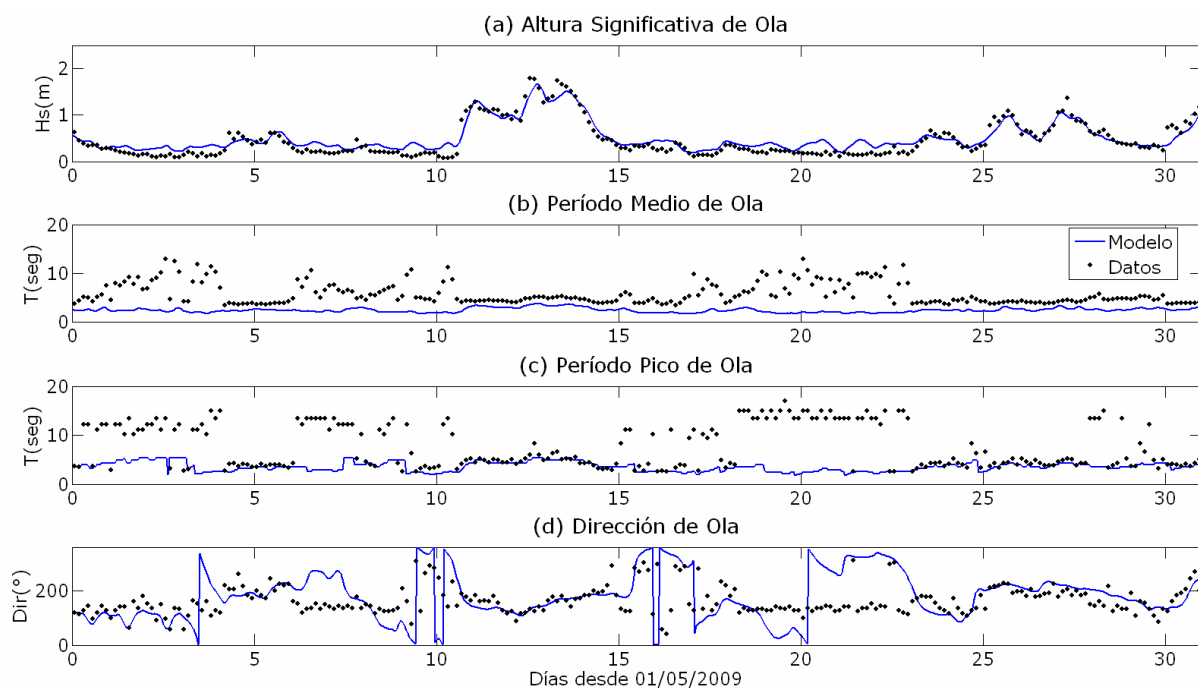


Figura B.4: Variación temporal del oleaje medido en PB y obtenido con el modelo SWAN con los parámetros finales y vientos CEP; mayo 2009.

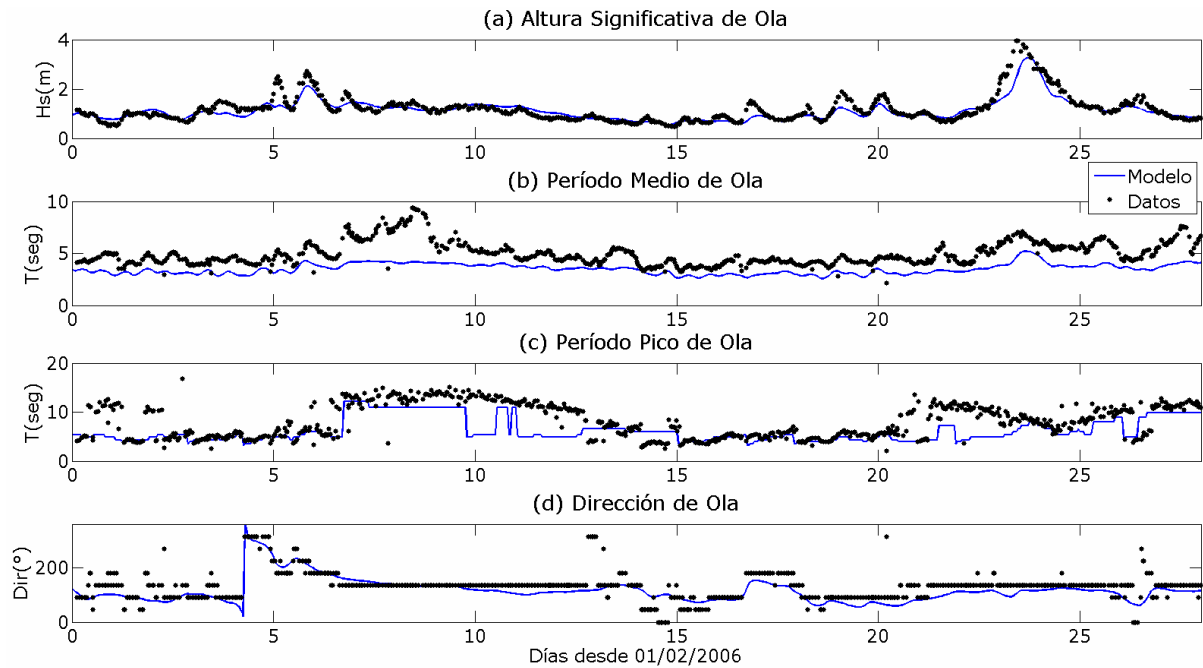


Figura B.5: Variación temporal del oleaje medido en Hidrovía y obtenido con el modelo SWAN con los parámetros finales y vientos CEP; febrero 2006.

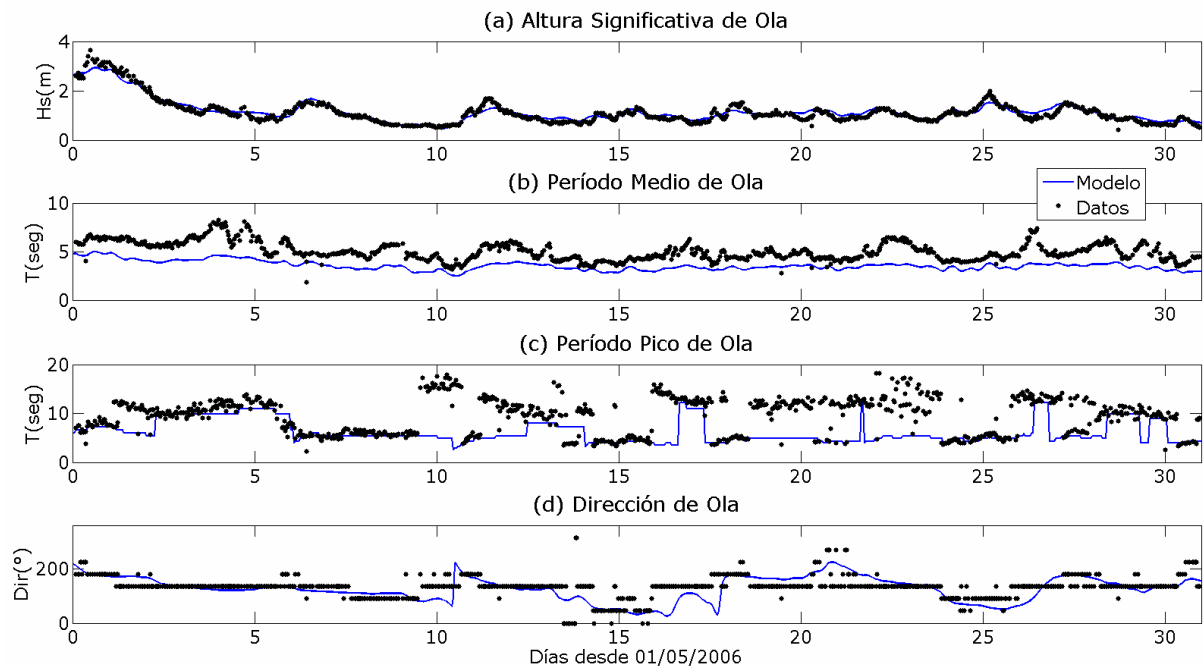


Figura B.6: Variación temporal del oleaje medido en Hidrovía y obtenido con el modelo SWAN con los parámetros finales y vientos CEP; mayo 2006.

B.3. VARIACIÓN ESPACIAL DE LAS TENSIONES DE CORTE DE FONDO

Se presentan en las Figuras B.7 a B.12, las distribuciones espaciales de la tensión de corte de fondo total promedio y máxima mensual obtenida para los 24 meses comprendidos entre enero 2009 y diciembre 2010.

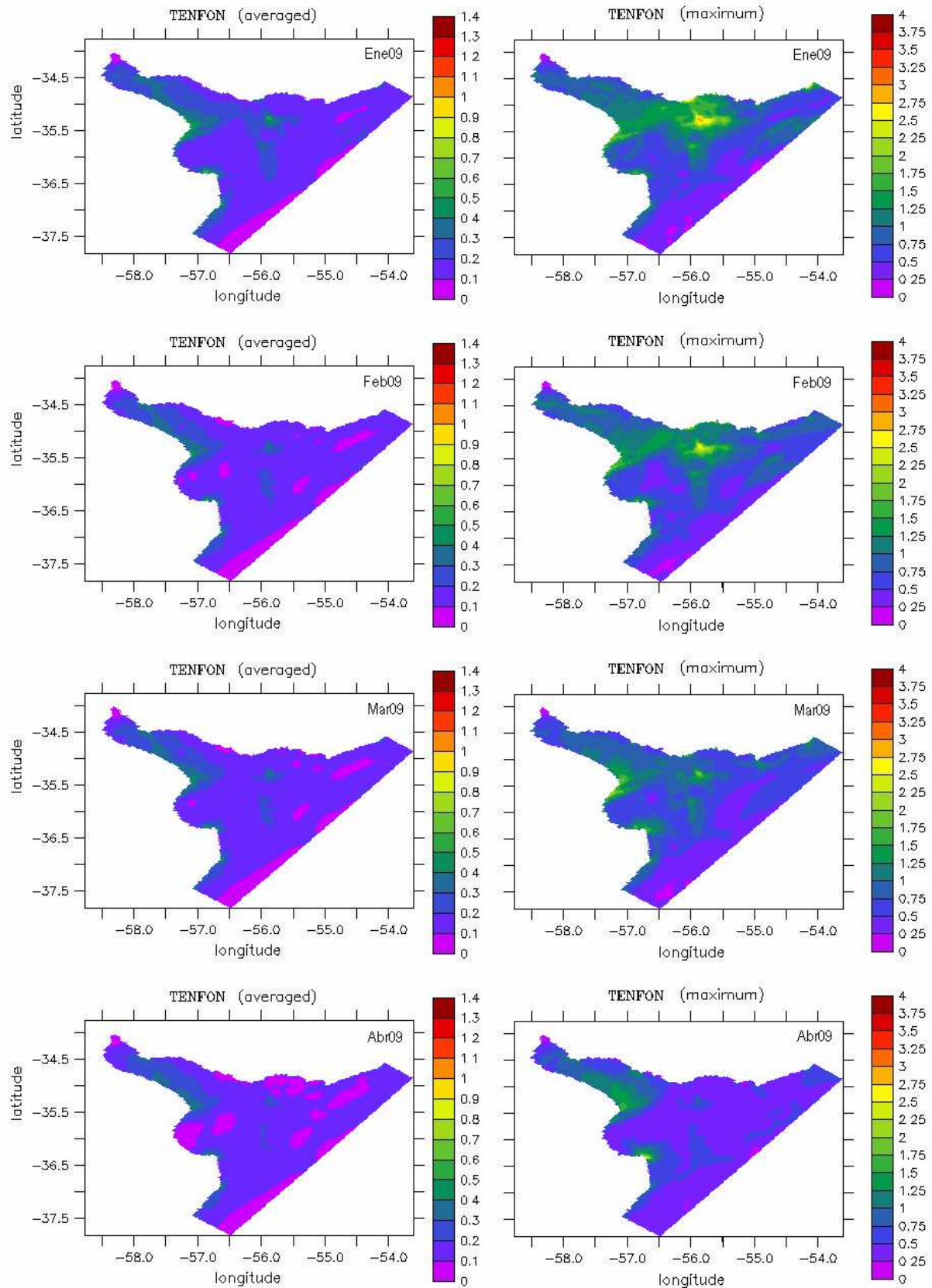


Figura B.7: Distribución espacial de las tensiones de corte de fondo promedio (paneles izquierdos) y máximas (paneles derechos) obtenidas con el modelo para enero (paneles superiores), febrero (paneles intermedios superiores), marzo (paneles intermedios inferiores) y abril (paneles inferiores) de 2009.

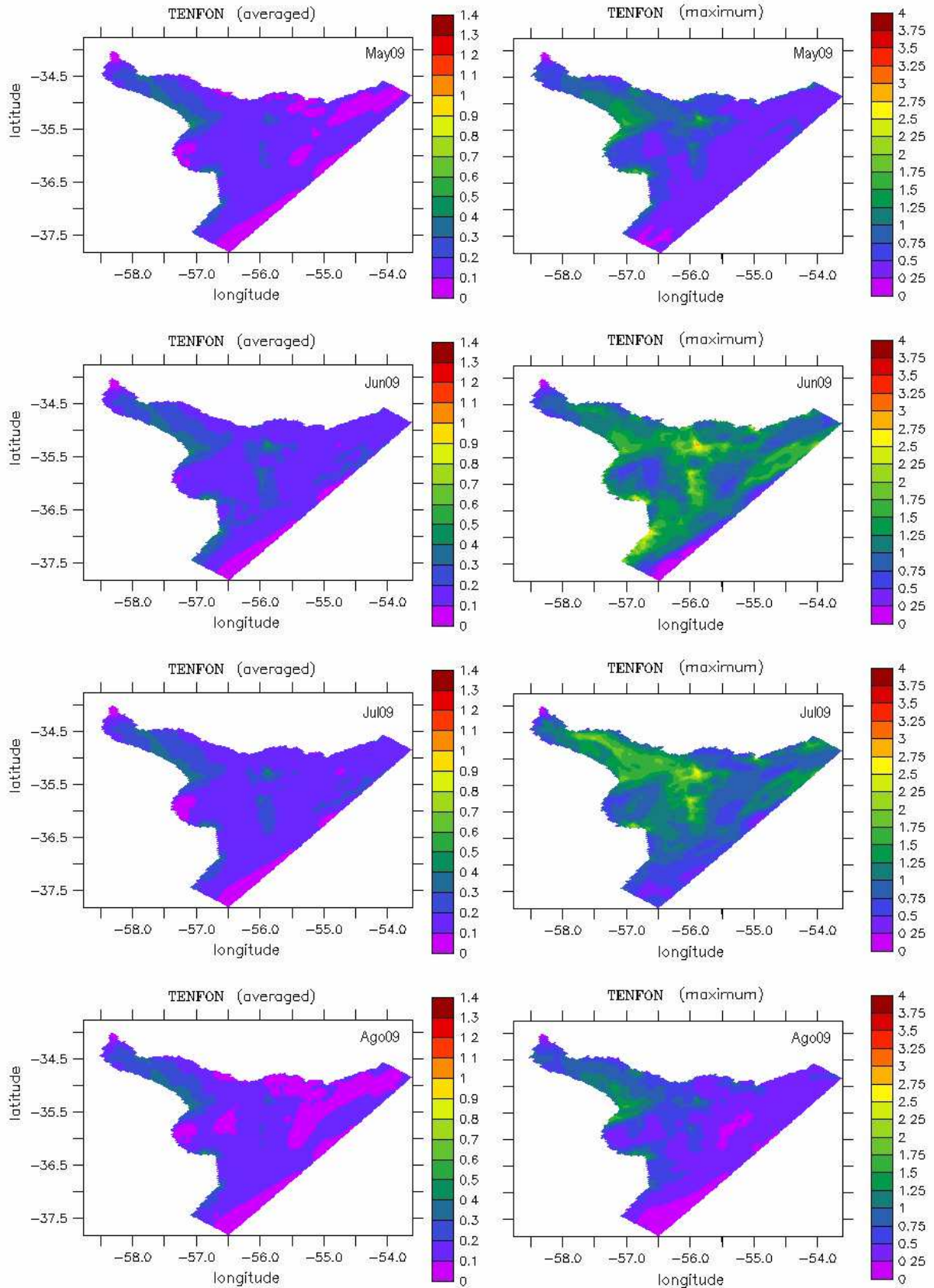


Figura B.8: Distribución espacial de las tensiones de corte de fondo promedio (paneles izquierdos) y máximas (paneles derechos) obtenidas con el modelo para mayo (paneles superiores), junio (paneles intermedios superiores), julio (paneles intermedios inferiores) y agosto (paneles inferiores) de 2009.

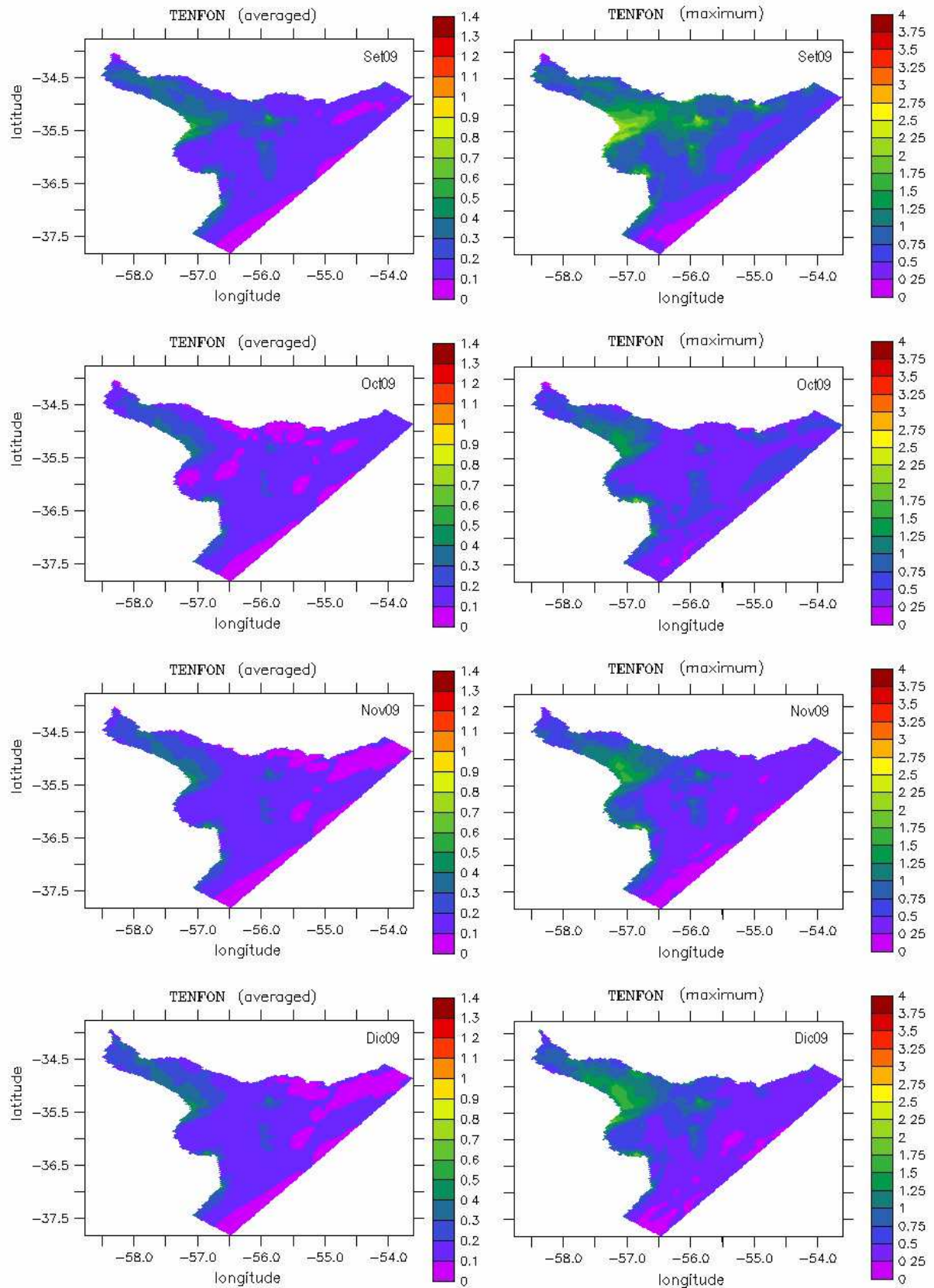


Figura B.9: Distribución espacial de las tensiones de corte de fondo promedio (paneles izquierdos) y máximas (paneles derechos) obtenidas con el modelo para setiembre (paneles superiores), octubre (paneles intermedios superiores), noviembre (paneles intermedios inferiores) y diciembre (paneles inferiores) de 2009.

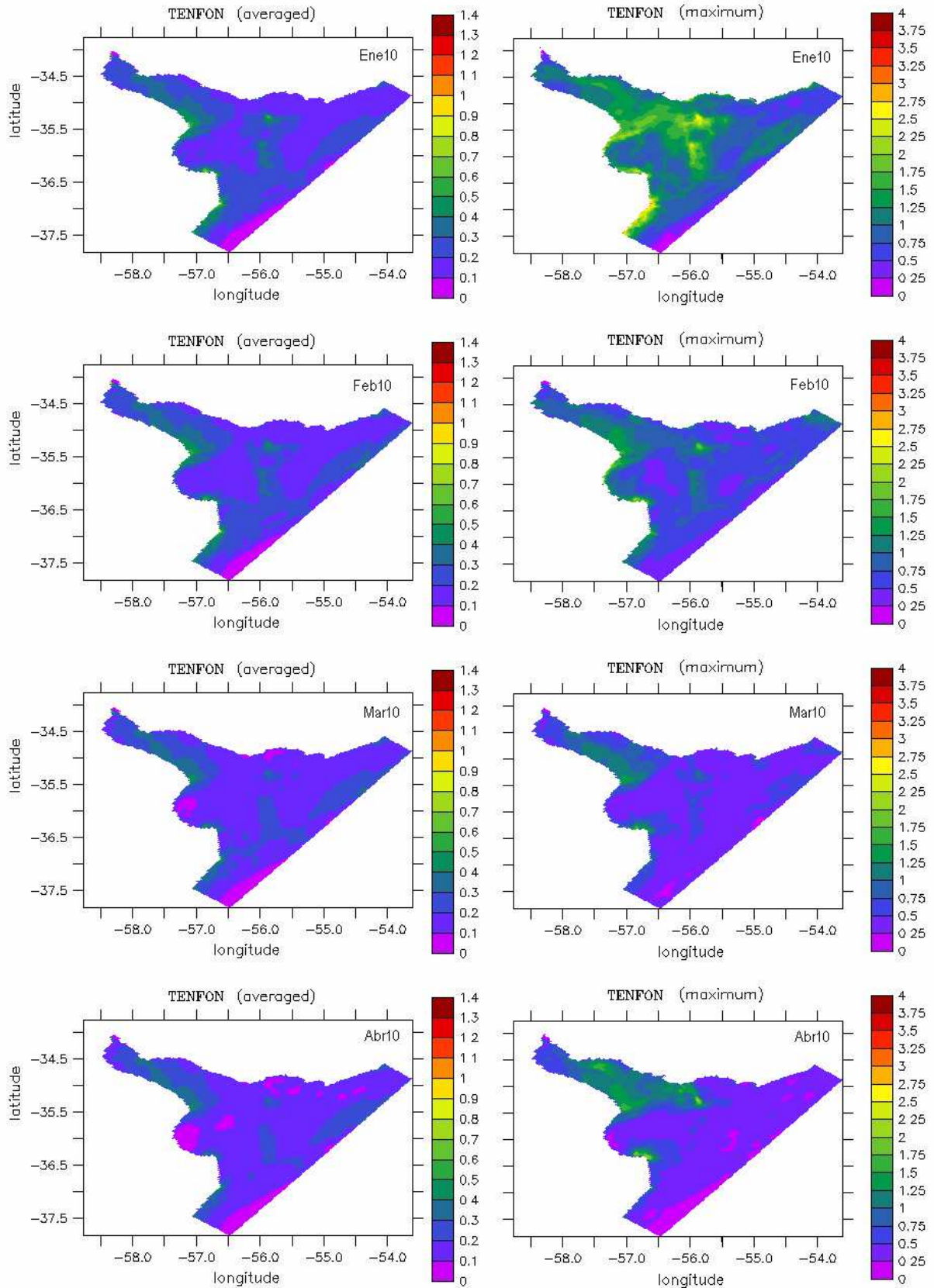


Figura B.10: Distribución espacial de las tensiones de corte de fondo promedio (paneles izquierdos) y máximas (paneles derechos) obtenidas con el modelo para enero (paneles superiores), febrero (paneles intermedios superiores), marzo (paneles intermedios inferiores) y abril (paneles inferiores) de 2010.

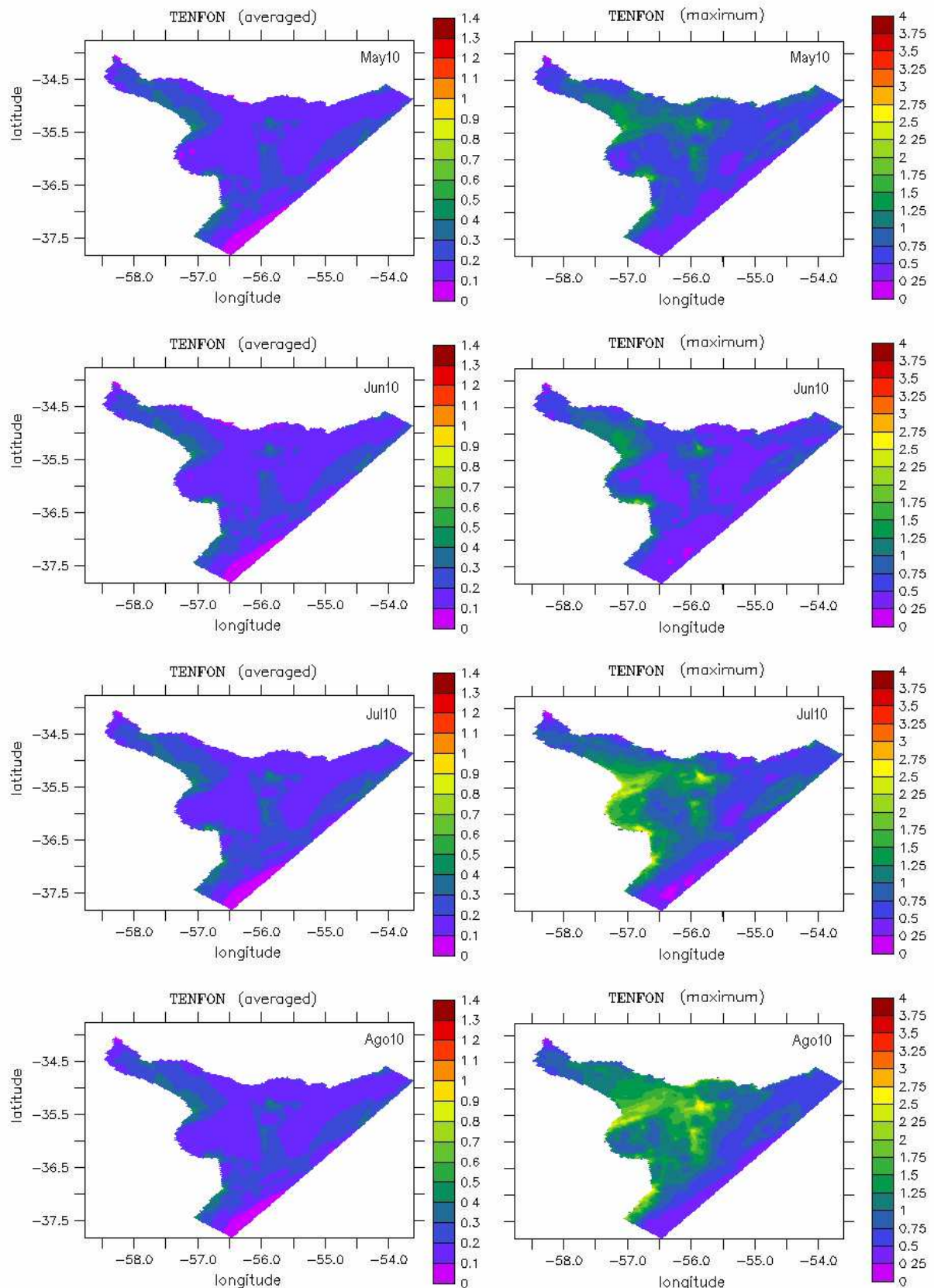


Figura B.11: Distribución espacial de las tensiones de corte de fondo promedio (paneles izquierdos) y máximas (paneles derechos) obtenidas con el modelo para mayo (paneles superiores), junio (paneles intermedios superiores), julio (paneles intermedios inferiores) y agosto (paneles inferiores) de 2010.

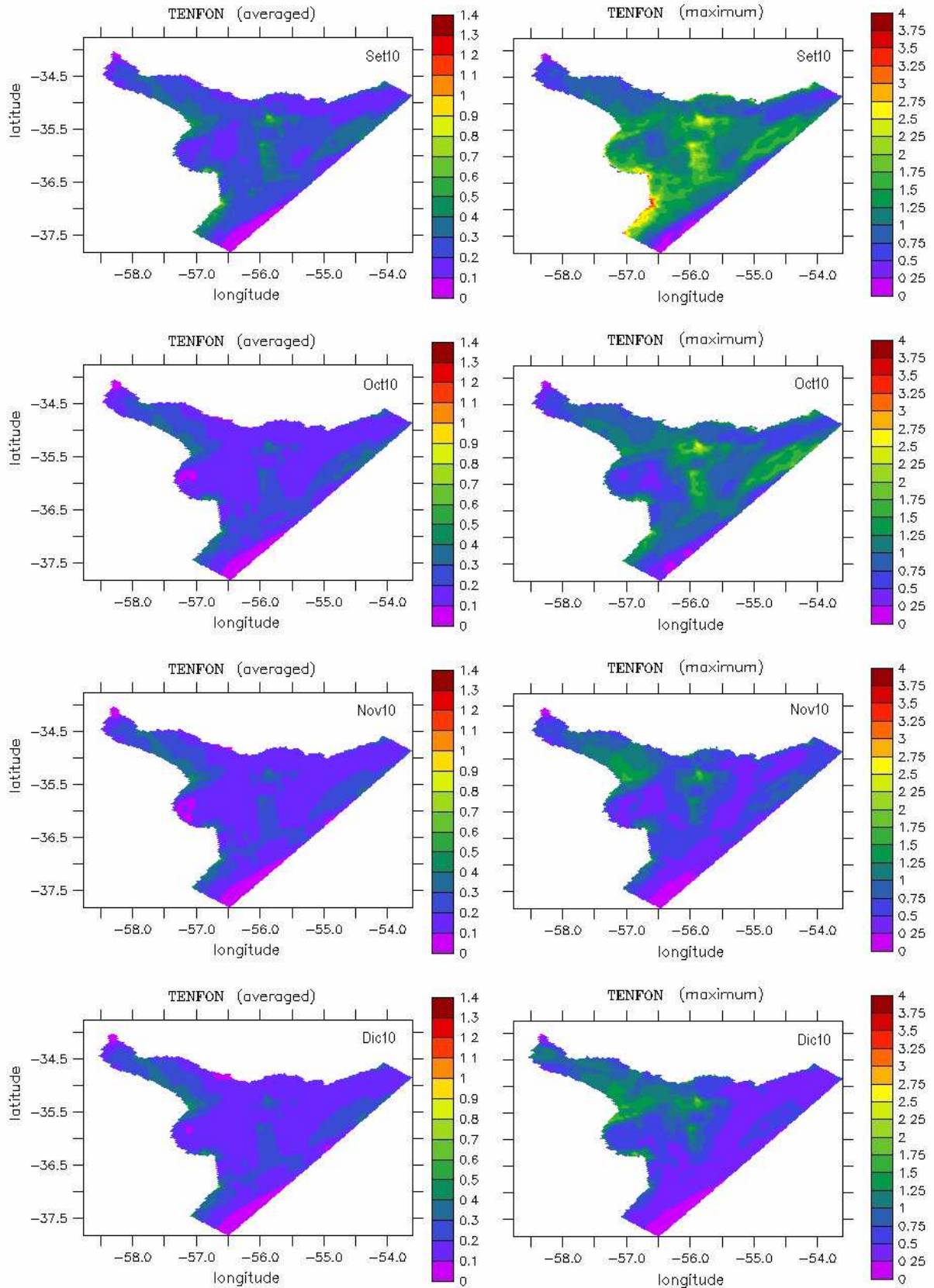


Figura B.12: Distribución espacial de las tensiones de corte de fondo promedio (paneles izquierdos) y máximas (paneles derechos) obtenidas con el modelo para setiembre (paneles superiores), octubre (paneles intermedios superiores), noviembre (paneles intermedios inferiores) y diciembre (paneles inferiores) de 2010.

Anexo C

C. MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA DINÁMICA DE SEDIMENTOS FINOS

C.1. COMPARACIÓN INFORMACIÓN HISTÓRICA Y RECIENTE DE LA COMPOSICIÓN DEL SEDIMENTO DE FONDO

En el modelo de sedimentos finos MARS se utiliza como condición inicial de composición del sedimento de fondo la información contenida en el mapa denominado de Laborde. En esta sección se compara dicha distribución espacial de composición del sedimento de fondo del Río de la Plata con la información adquirida en el marco del Proyecto FREPLATA-FFEM y analizada en el Capítulo 2.

En la Figura C.1 se presenta la comparación de la composición granulométrica de las muestras de fondo obtenidas en las campañas 1 a 5 con la correspondiente a la información histórica de la carta de Laborde para las 26 estaciones de medición. Se observa que en varias estaciones los nuevos datos coinciden con la clasificación de Laborde. Sin embargo, en varias estaciones se observan diferencias.

A partir de esta comparación se evaluó si el tipo de material definido por la carta de Laborde para cada estación es el indicado en función de la información reciente. En caso de que no sea el más indicado se propone el valor del código de composición del material de fondo (según los tipos definidos por la carta de Laborde) que clasificaría mejor a dicha estación considerando la nueva información de campo. Los resultados muestran que para todas las zonas del Río de la Plata hay algunas estaciones para las cuales podría modificarse la clasificación histórica. Para las estaciones de la zona interior, la composición de Laborde (código 4) es compatible con la información de las campañas del Proyecto en #1 y #3, mientras que para la estación #2 la composición del código 3 (limo arenoso) es más apropiada que la composición actual de la carta de código 4 (limo). Para las estaciones #5, #6 y #7, los datos recientes se corresponden mejor con una clasificación del tipo código 5 (limo arcilloso) que con la clasificación actual del tipo limo. Para las restantes estaciones de la zona intermedia central y sobre la costa uruguaya #8, #9, #10 y #11, la clasificación propuesta por Laborde es compatible con la nueva información de campo. Para las estaciones #12, #13 y #15 clasificadas como arcilla limosa (código 6) en la carta de Laborde la información reciente indica una composición con menor mezcla de materiales, siendo más apropiada una clasificación tipo código 4 (limo) para las dos primeras y tipo código 5 (limo arcilloso) para la restante.

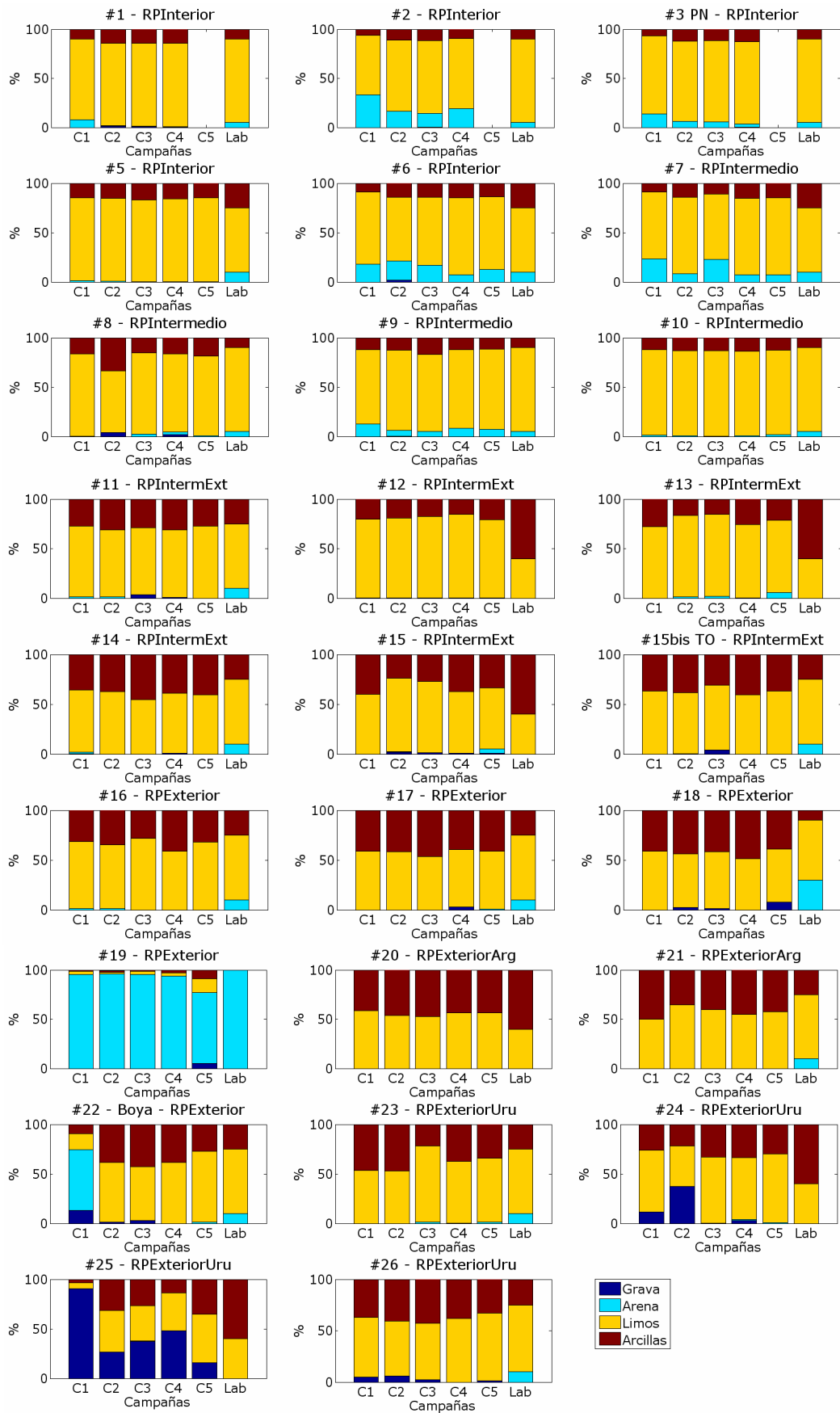


Figura C.1: Comparación de la composición del sedimento de fondo extraído durante las campañas 1 a 5 (C1 a C5) con la información histórica de la carta de Laborde en todas las estaciones de medición.

Las estaciones #17 y #18 presentan diferencias entre la información histórica y los nuevos datos, siendo quizás una clasificación de código 6 (arcilla limosa) más apropiada que la clasificación actual. Por último, en las estaciones ubicadas en la zona exterior sobre la costa uruguaya #23, #24 y #25, la clasificación de Laborde podría mejorarse considerando la nueva información. Para la estación #23 una clasificación de limo arcilloso (código 5) sería más apropiada que la clasificación actual de arcilla limosa (código 6); para la estación #24 sucede lo inverso, una clasificación del tipo limo arcilloso es más apropiada que arcilla limosa; y en la estación #25 una clasificación como suelo franco sería más apropiada que la clasificación actual como arcilla limosa pues los nuevos datos muestran un porcentaje importante de gruesos en su composición.

En función de estos cambios sugeridos por la nueva información de campo de composición del material del sedimento de fondo del Río de la Plata se plantea una propuesta preliminar de actualización de la carta de Laborde, la cual se presenta en la Figura C.2. En la misma se marcan, por encima de la clasificación propuesta por la carta histórica de Laborde, la redefinición de ciertas zonas de clasificación que surgen al analizar la nueva información de campo de las estaciones de medición. Por ejemplo en la zona interior se podría extender la zona de material tipo arcilla (código 4), y en la zona intermedia sobre la costa argentina se podría extender la zona clasificada como limo arcilloso (código 5).

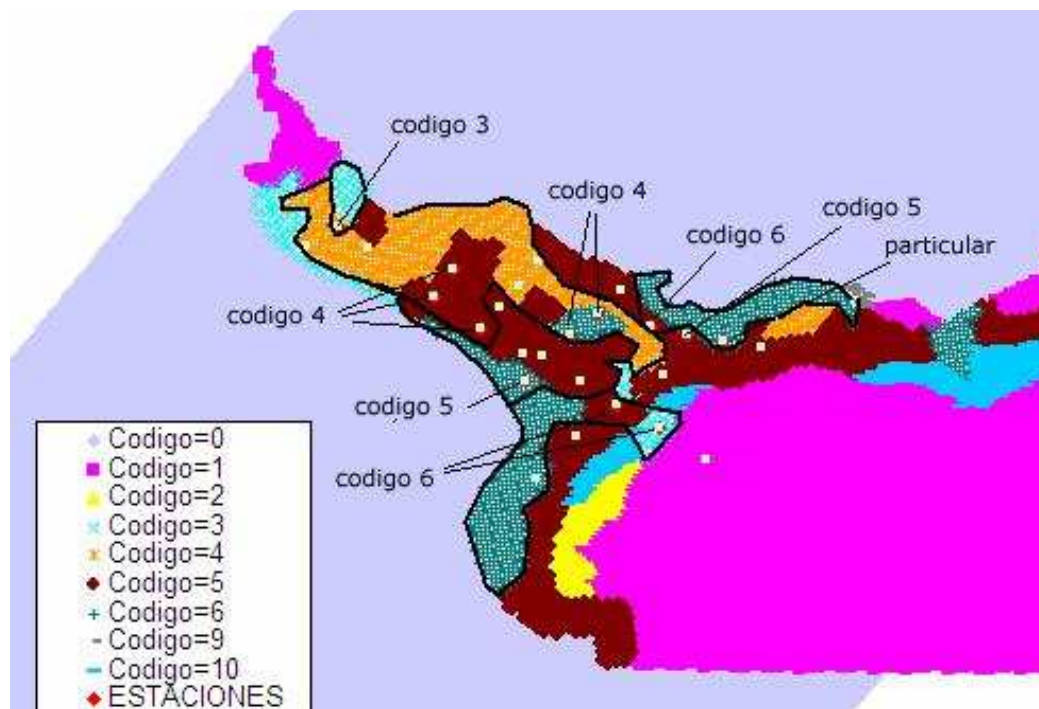


Figura C.2: Redefinición de la clasificación de material de fondo del Río de la Plata en función de la nueva información de campo del Proyecto FREPLATA-FFEM.

C.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS DIFERENTES PROCESOS DE LA DINÁMICA DE SEDIMENTO

C.2.1. Configuración ParGlobal

En la Figura C.3 se presenta la comparación de la variación temporal de los valores de sedimento en suspensión obtenidos con el modelo en varias profundidades con los datos medidos de turbidez con los SMATCHS instalados en Pilote Norden, Torre

Oyarvide y en la Boya Oceanográfica, para el Periodo 3 de medición (julio y agosto 2010) para la configuración de referencia inicial del modelo denominada ParGlobal.

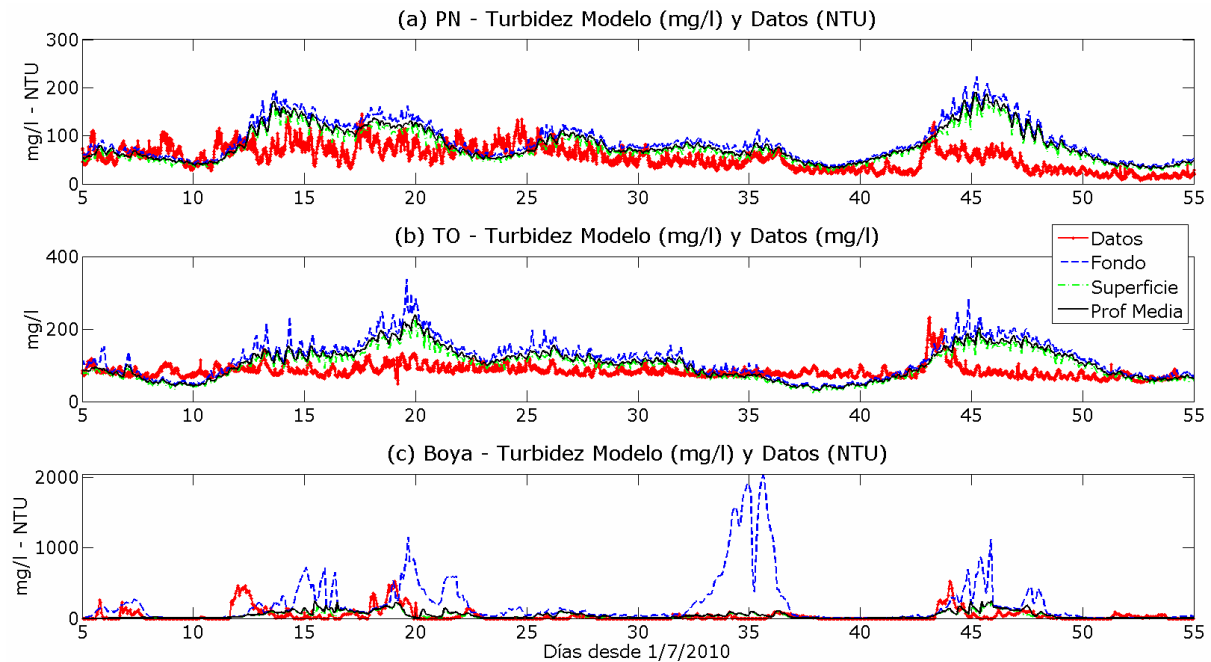


Figura C.3: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración ParGlobal; julio y agosto 2010.

C.2.2. Configuraciones F1

En la Figura C.4 se presenta la comparación de la variación temporal de los valores de sedimento en suspensión obtenidos con el modelo en varias profundidades con los datos medidos de turbidez con los SMATCHS instalados en Pilote Norden, Torre Oyarvide y en la Boya Oceanográfica, para el Periodo 3 de medición (julio y agosto 2010) para la configuración F1tc1e1. Por otra parte, la comparación con los datos para la configuración F1tc1e2 durante el periodo simulado (agosto 2010) se presenta en la Figura C.5.

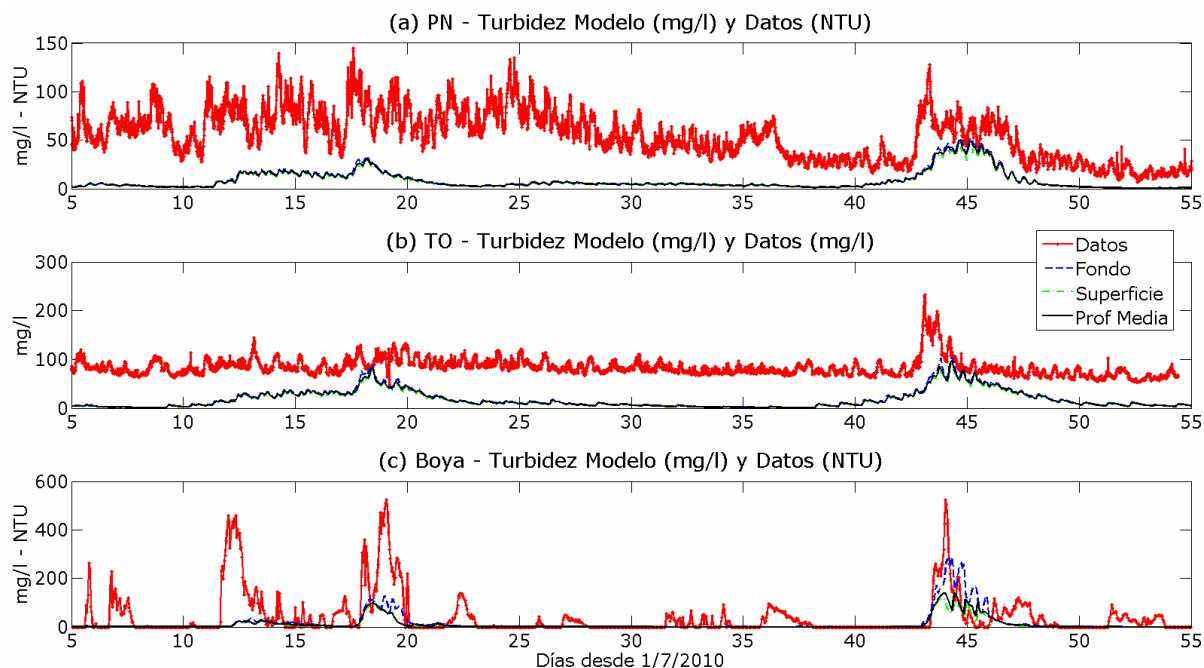


Figura C.4: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración F1tc1e1; julio y agosto 2010.

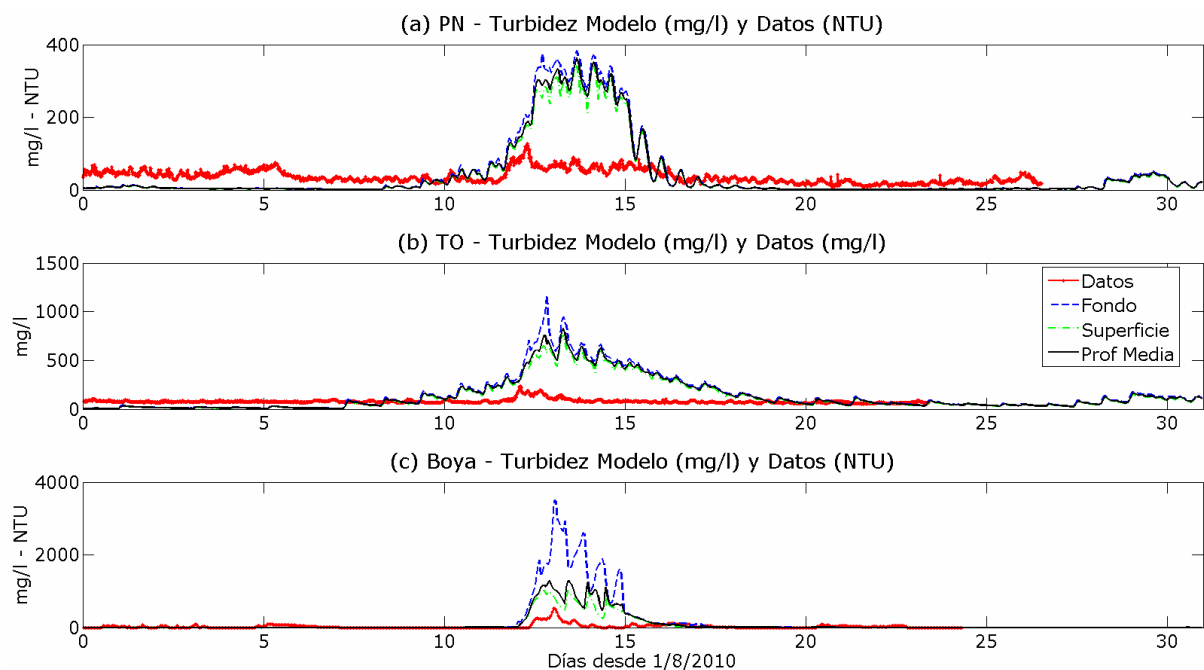


Figura C.5: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración F1tc1e2; agosto 2010.

C.2.3. Configuraciones F2

En la Figura C.6 se presenta la comparación para el Periodo 3 de medición (julio y agosto 2010) entre los resultados del modelo y los datos medidos para la configuración F2PGsG. En la Figura C.7 se presenta la comparación para el mismo periodo entre los resultados del modelo y los datos medidos para la configuración F2sGWsvar. Por otra

parte, la comparación con los datos para la configuración F2sGWs1 durante el periodo simulado (julio 2010) se presenta en la Figura C.8.

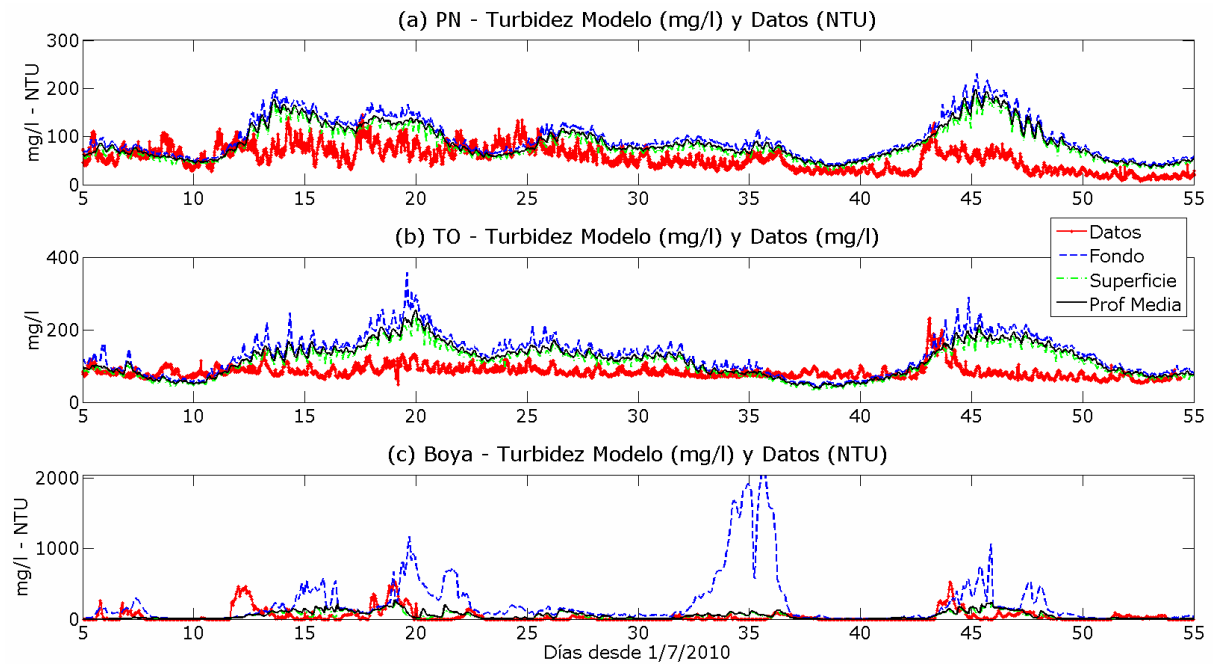


Figura C.6: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración F2PGsG; julio y agosto 2010.

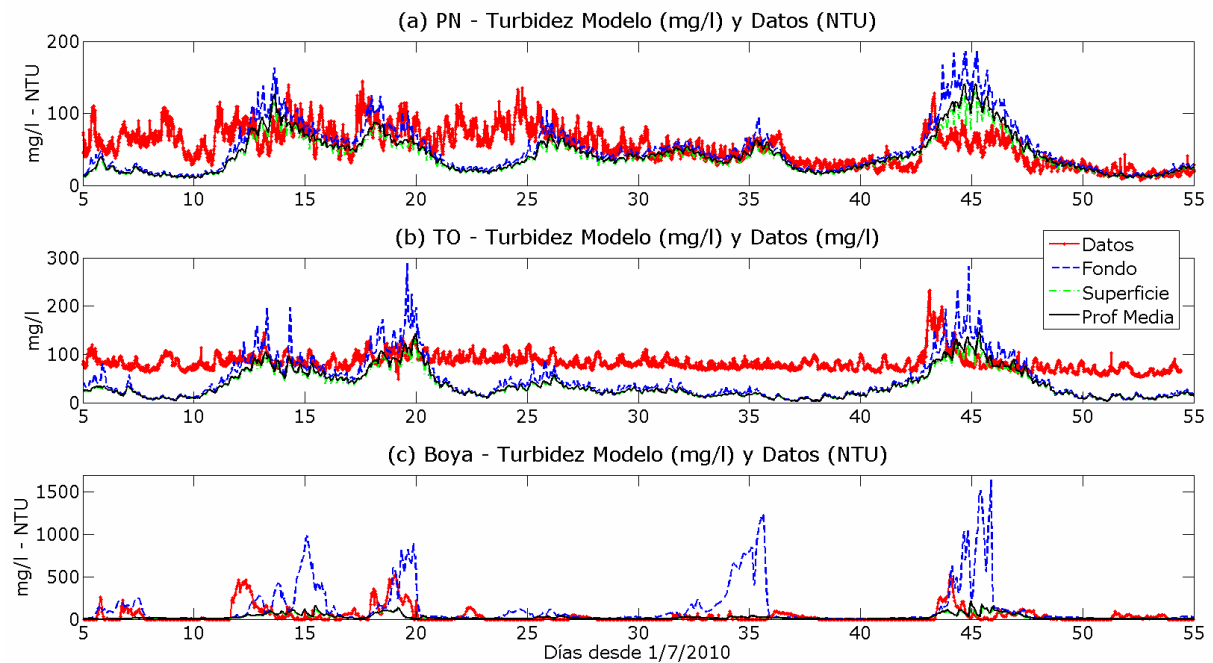


Figura C.7: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración F2sGWsvar; julio y agosto 2010.

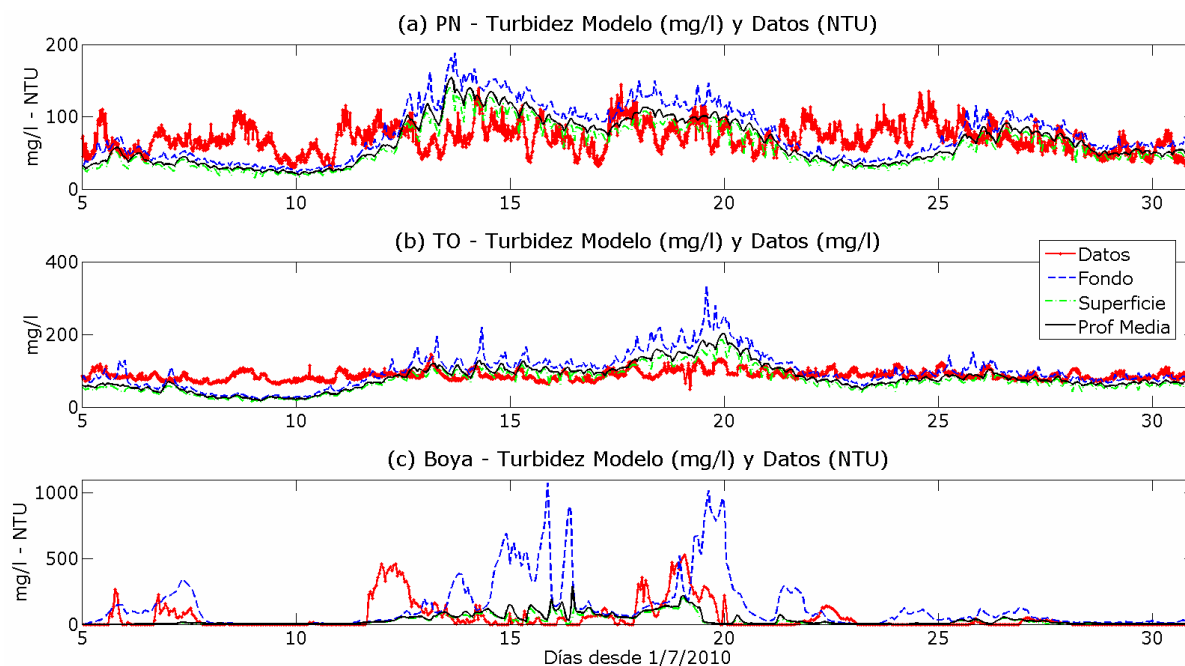


Figura C.8: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración F2sGWs1; julio 2010.

C.2.4. Configuraciones combinaciones F1 y F2

En la Figura C.9 se presenta la comparación para el Periodo 3 de medición (julio y agosto 2010) entre los resultados del modelo y los datos medidos para la configuración F1F2sGtc2e3Ws2. En la Figura C.10 se presenta la comparación para julio 2010 entre los resultados del modelo y los datos medidos para la configuración F1F2sGtc2e0Ws1, y en la Figura C.11 la correspondiente comparación durante el mismo periodo de tiempo para la configuración F1F2sGtc3e4Ws1. Por ultimo, la comparación con los datos para la configuración F1F2sGtc3e5Ws1 durante el periodo simulado (julio y agosto 2010) se presenta en la Figura C.12.

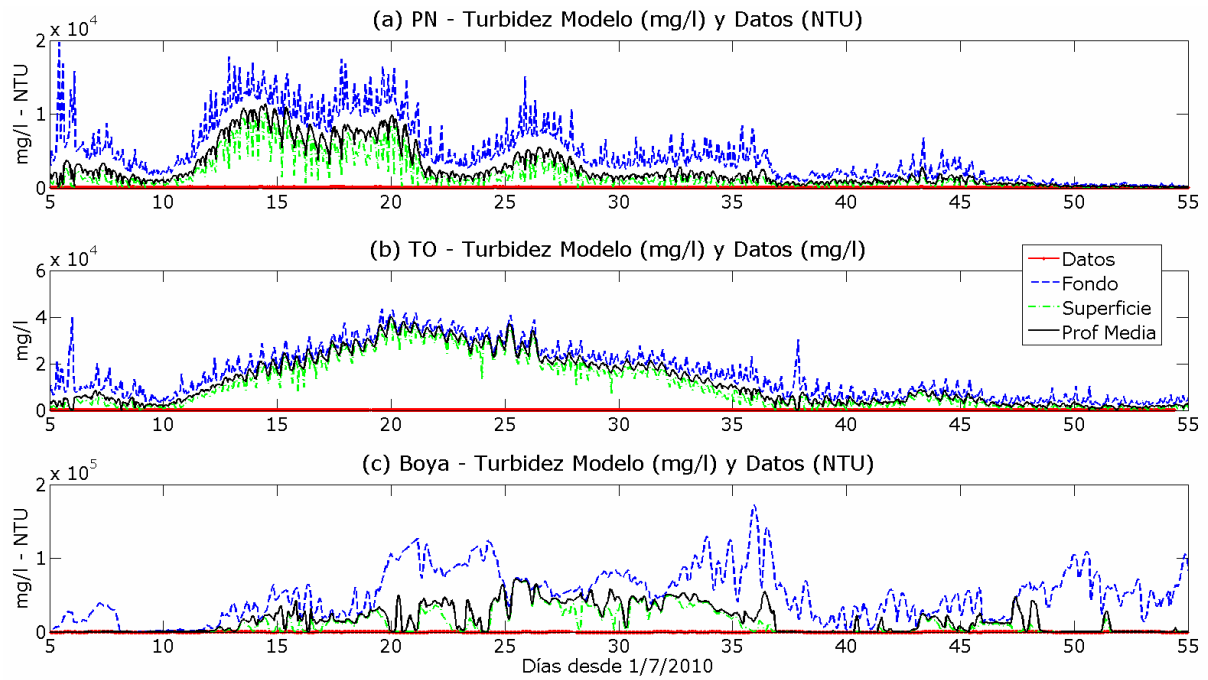


Figura C.9: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración F1F2sGtc2e3Ws2; julio y agosto 2010.

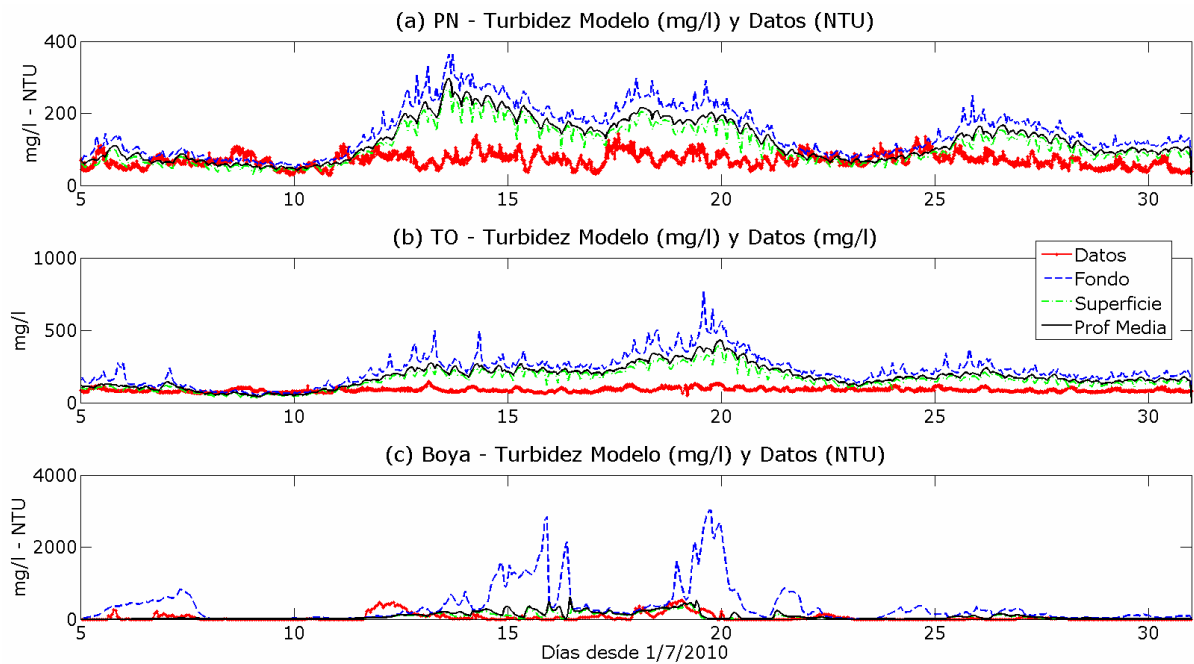


Figura C.10: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración F1F2sGtc2e0Ws1; julio 2010.

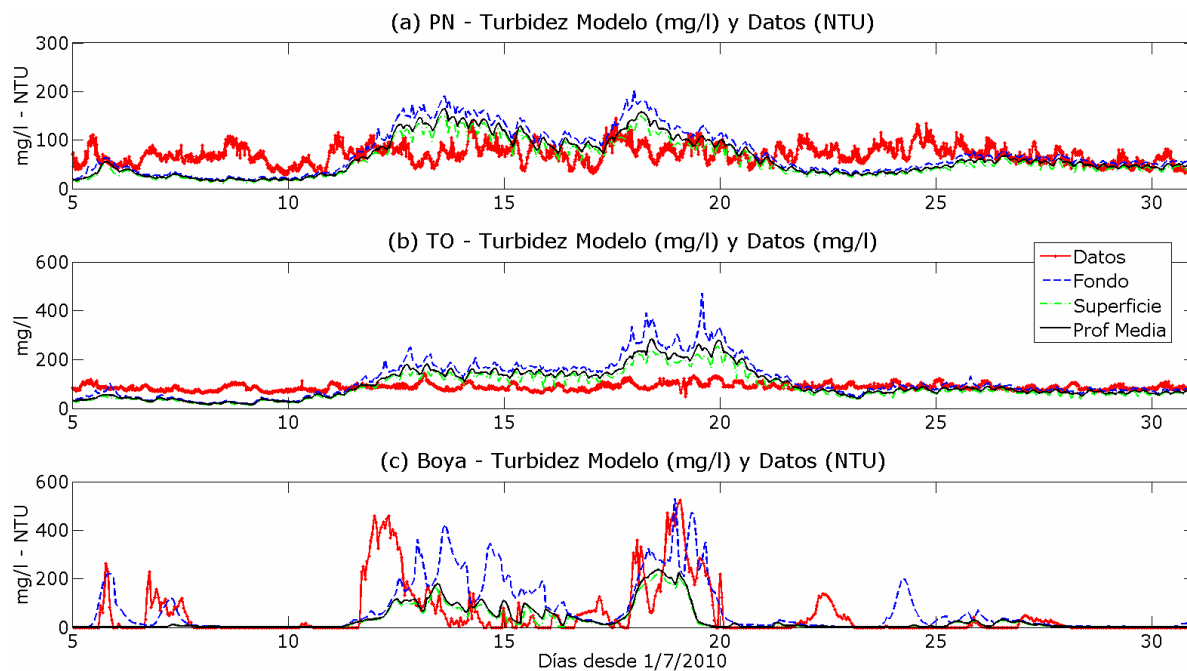


Figura C.11: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración F1F2sGtc3e4Ws1; julio 2010.

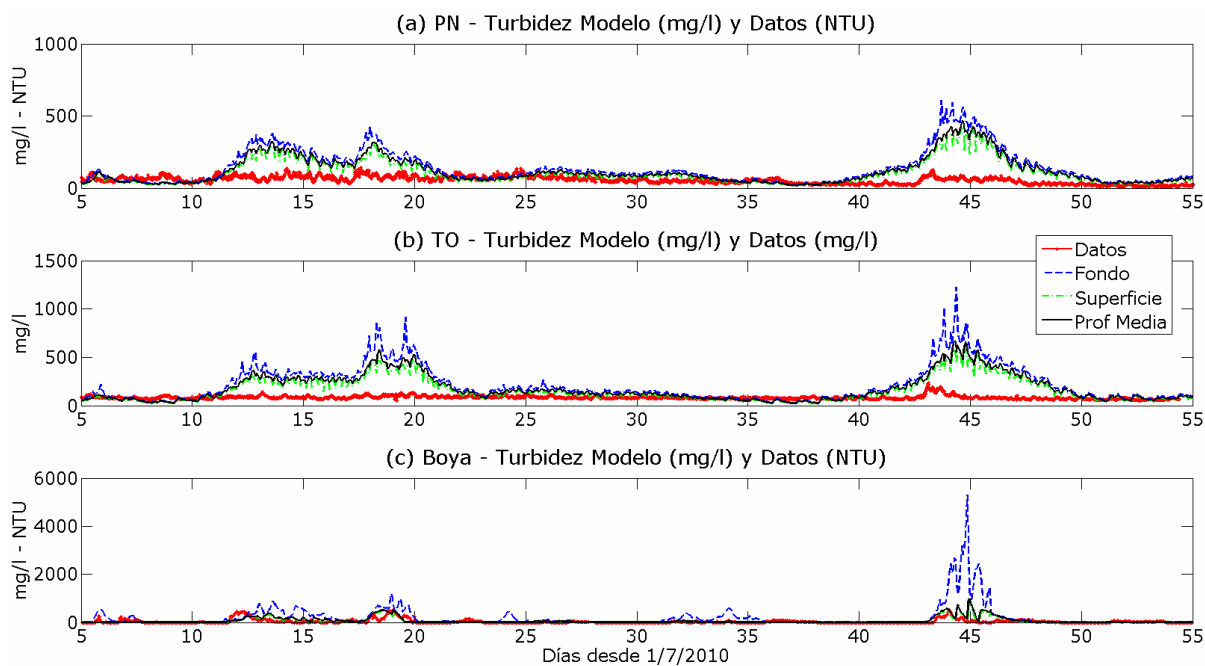


Figura C.12: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración F1F2sGtc3e5Ws1; julio y agosto 2010.

C.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD INTEGRADOS

C.3.1. Configuraciones Etapa 1

En las Figuras C.13 a C.20 se presenta la comparación de los resultados del modelo y las medidas en Pilote Norden, Torre Oyarvide y en la Boya Oceanográfica para las configuraciones de la etapa 1 de los análisis de sensibilidad integrados.

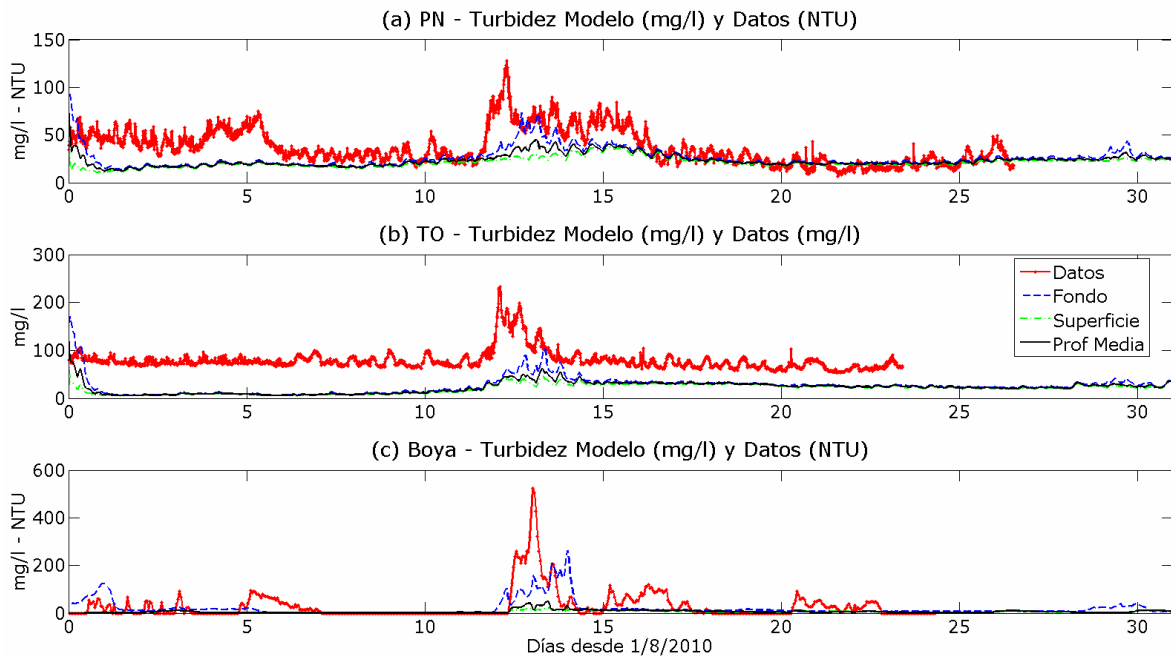


Figura C.13: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya. Configuración F1F2F3Wsnew1; agosto 2010.

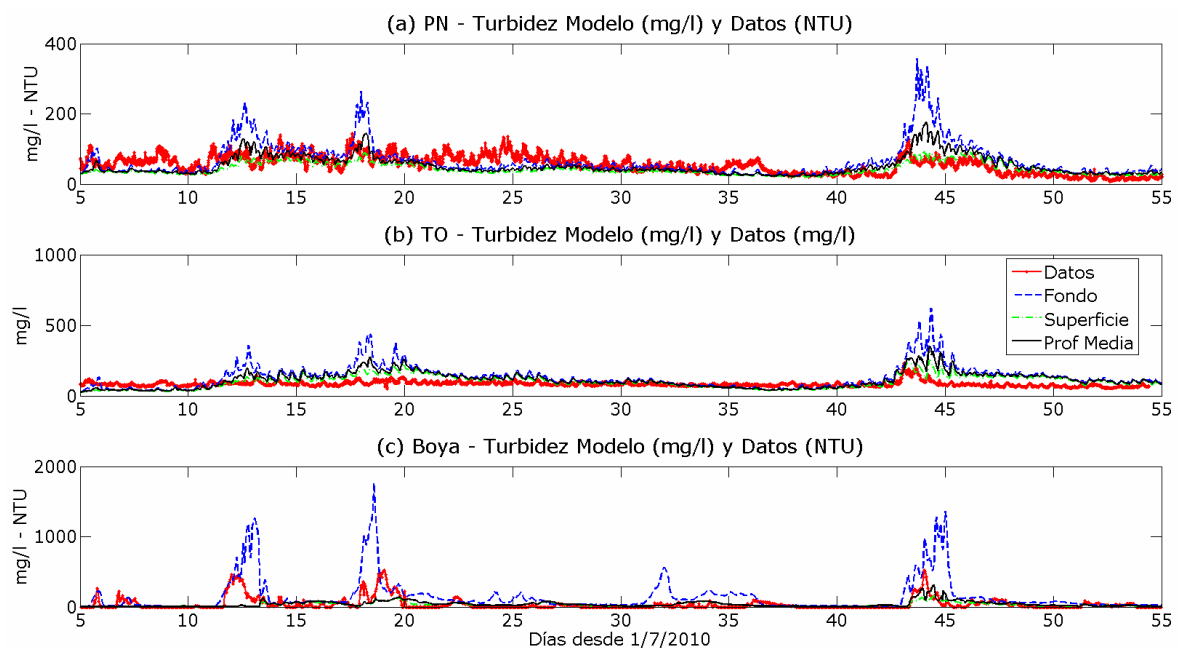


Figura C.14: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya. Configuración F1F2F3Wsnew1b; julio y agosto 2010.

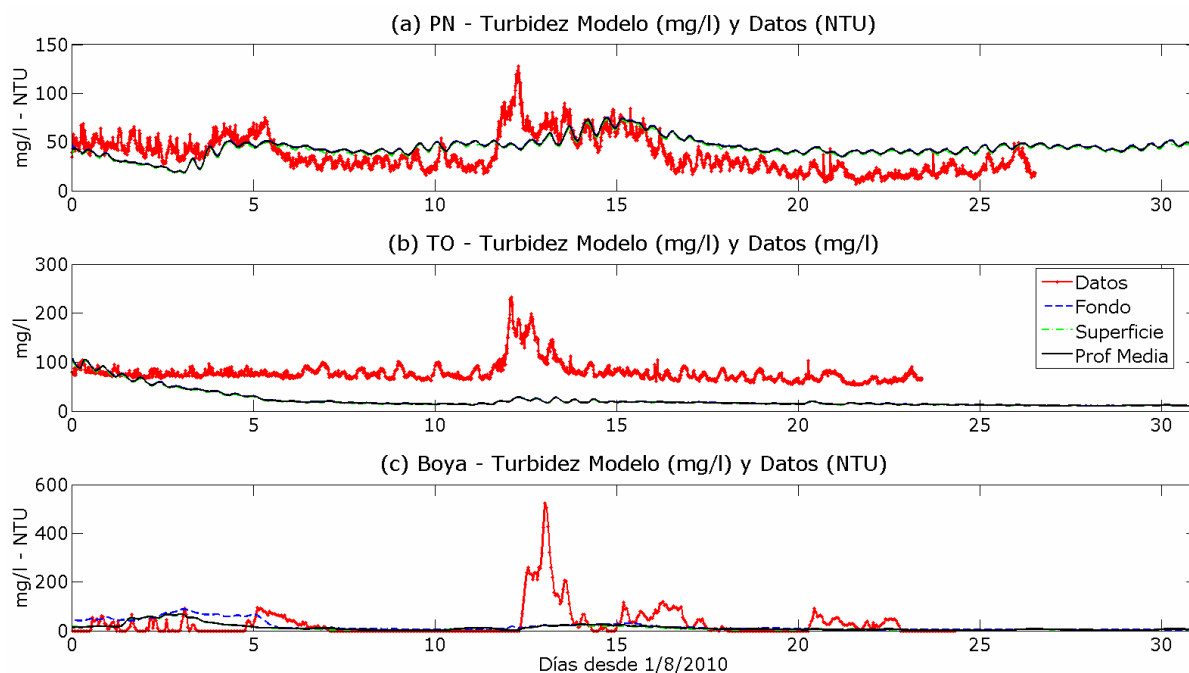


Figura C.15: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración F1F2F3Wsnew2; agosto 2010.

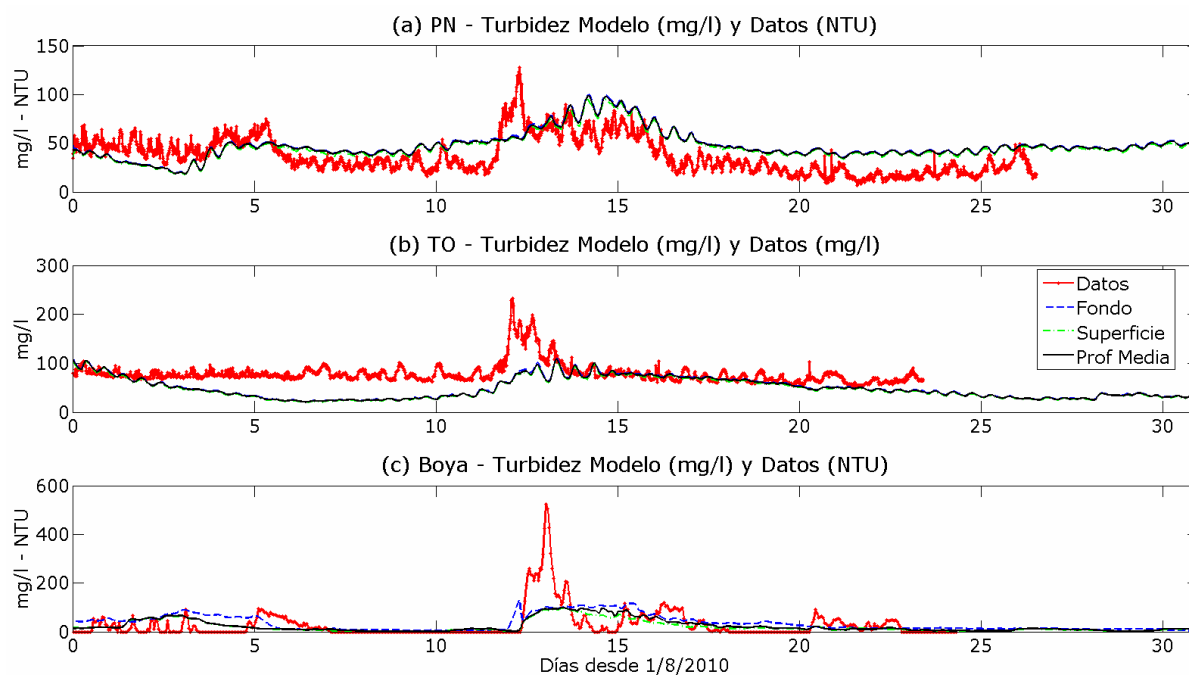


Figura C.16: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración F1F2F3Wsnew3; agosto 2010.

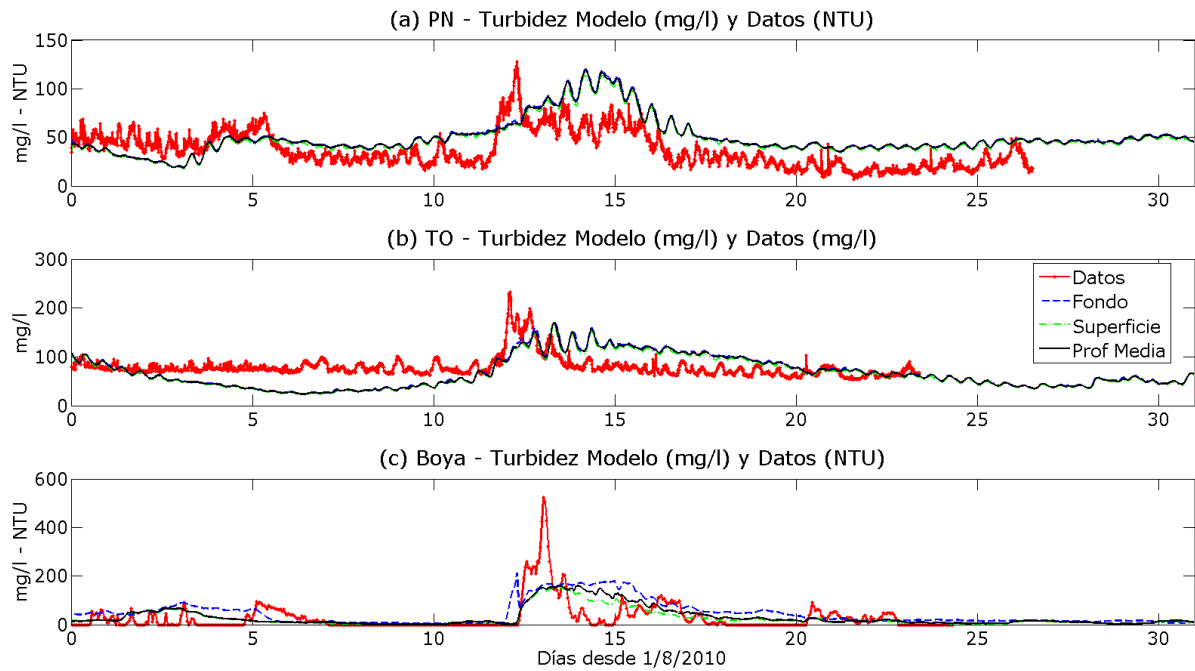


Figura C.17: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración F1F2F3Wsnew3b; agosto 2010.

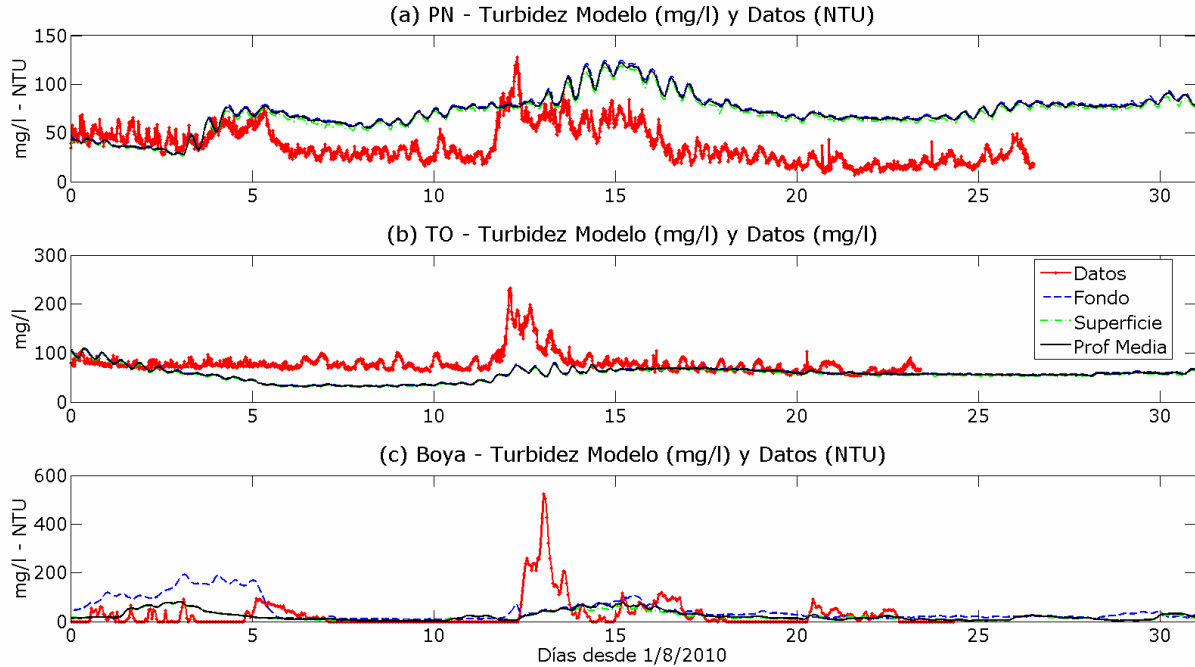


Figura C.18: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración F1F2F3Wsnew4; agosto 2010.

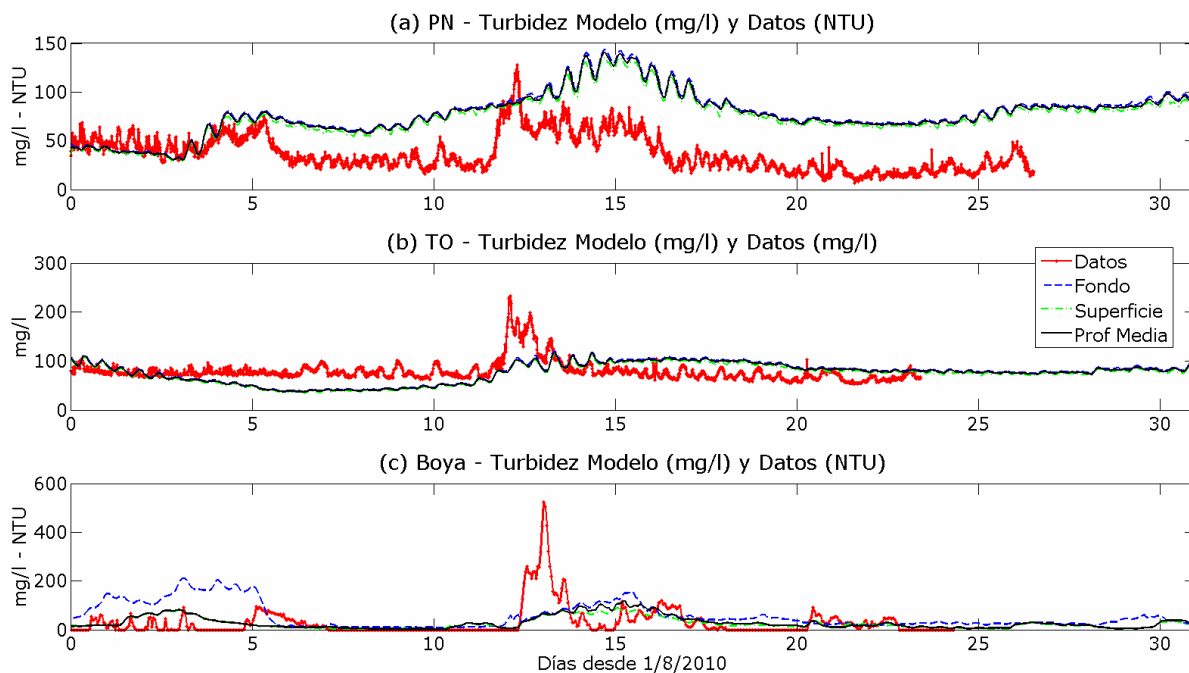


Figura C.19: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración F1F2F3Wsnew4b; agosto 2010.

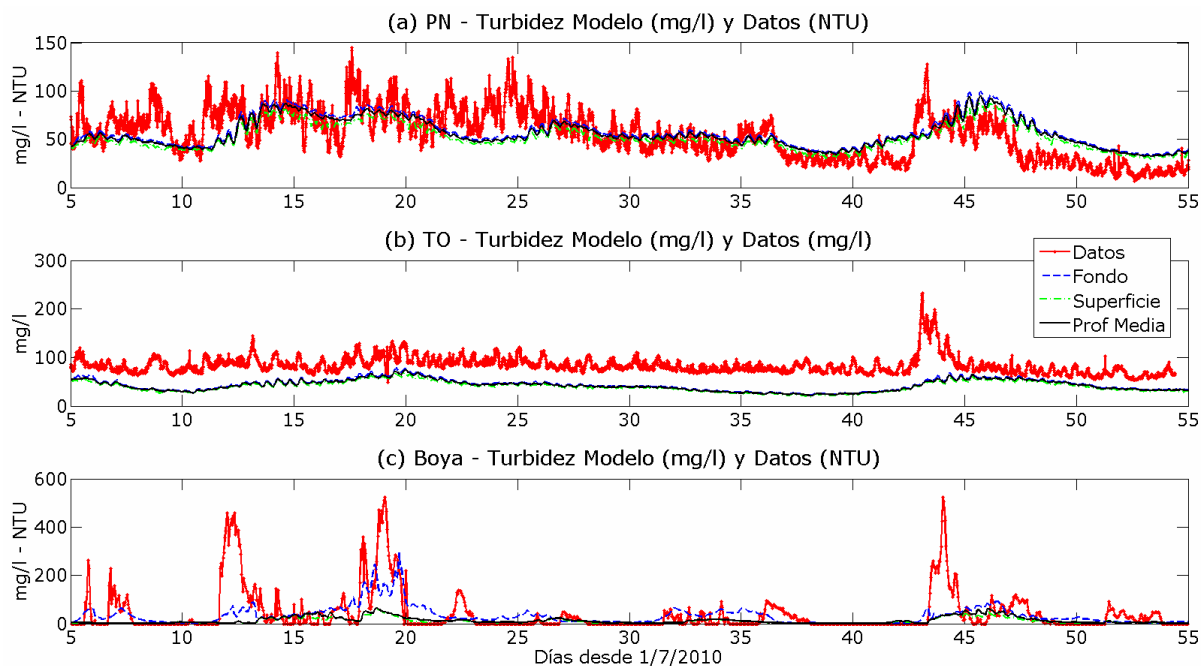


Figura C.20: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración F1F2F3Wsnew5; julio y agosto 2010.

C.3.2. Configuraciones Etapa 2

En las Figuras C.21 a C.30 se presenta la comparación de los resultados del modelo y las medidas en Pilote Norden, Torre Oyarvide y en la Boya Oceanográfica para las configuraciones de la etapa 2 de los análisis de sensibilidad integrados.

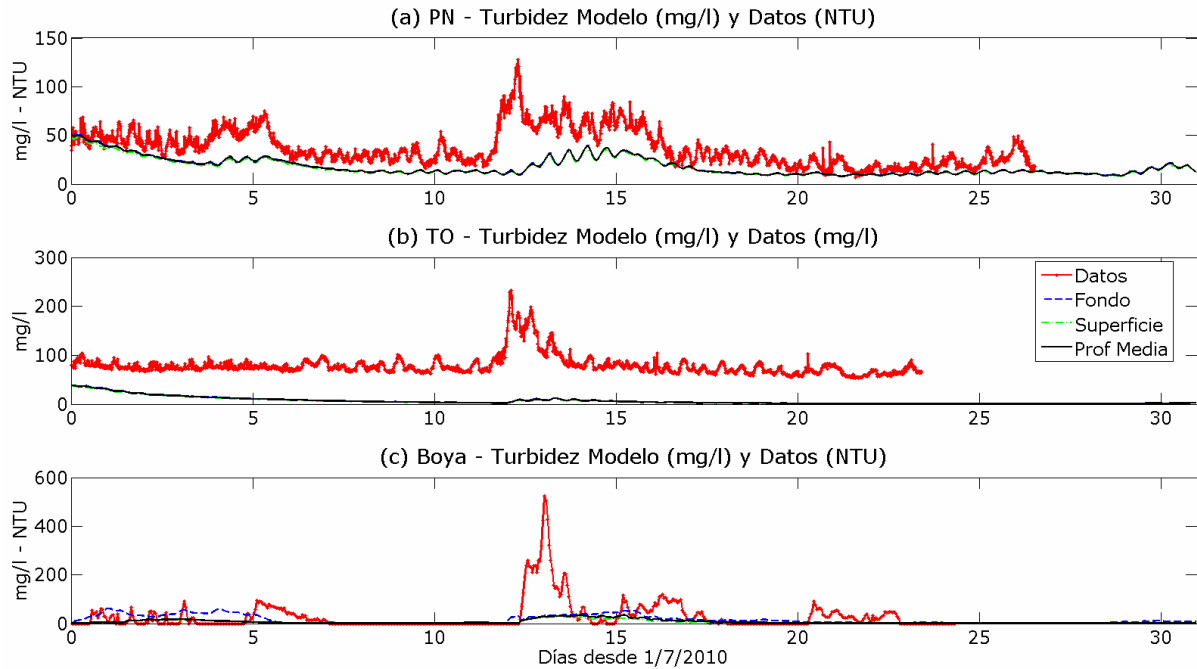


Figura C.21: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsnew5waves; agosto 2010.

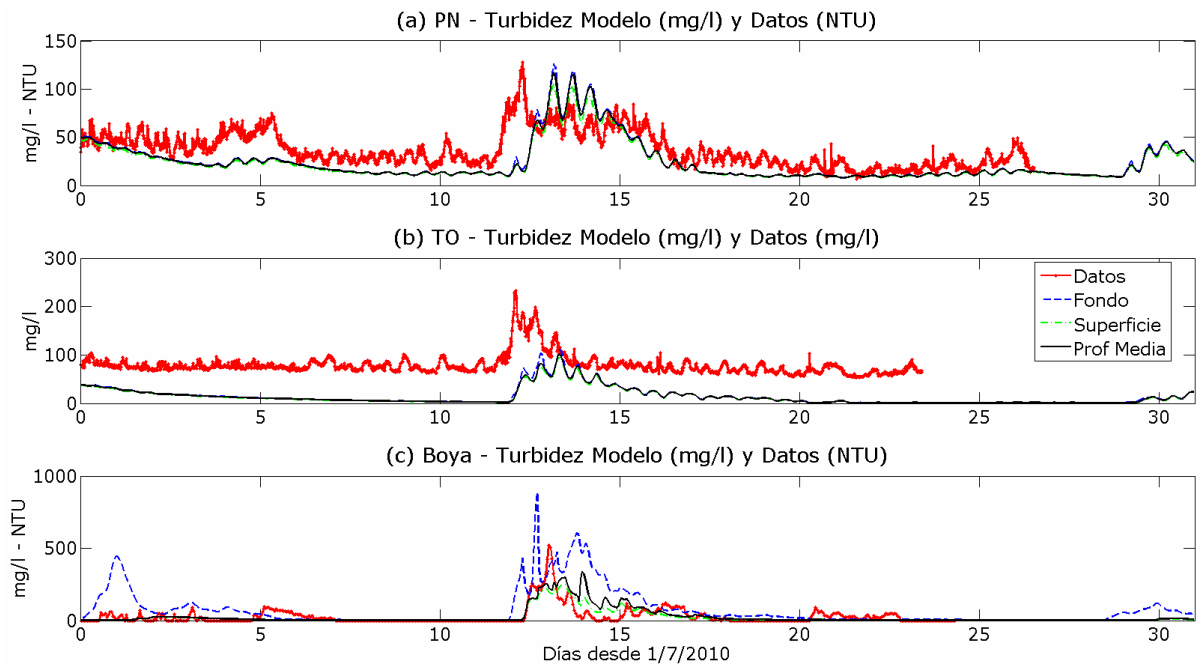


Figura C.22: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsnew5wavesA; agosto 2010.

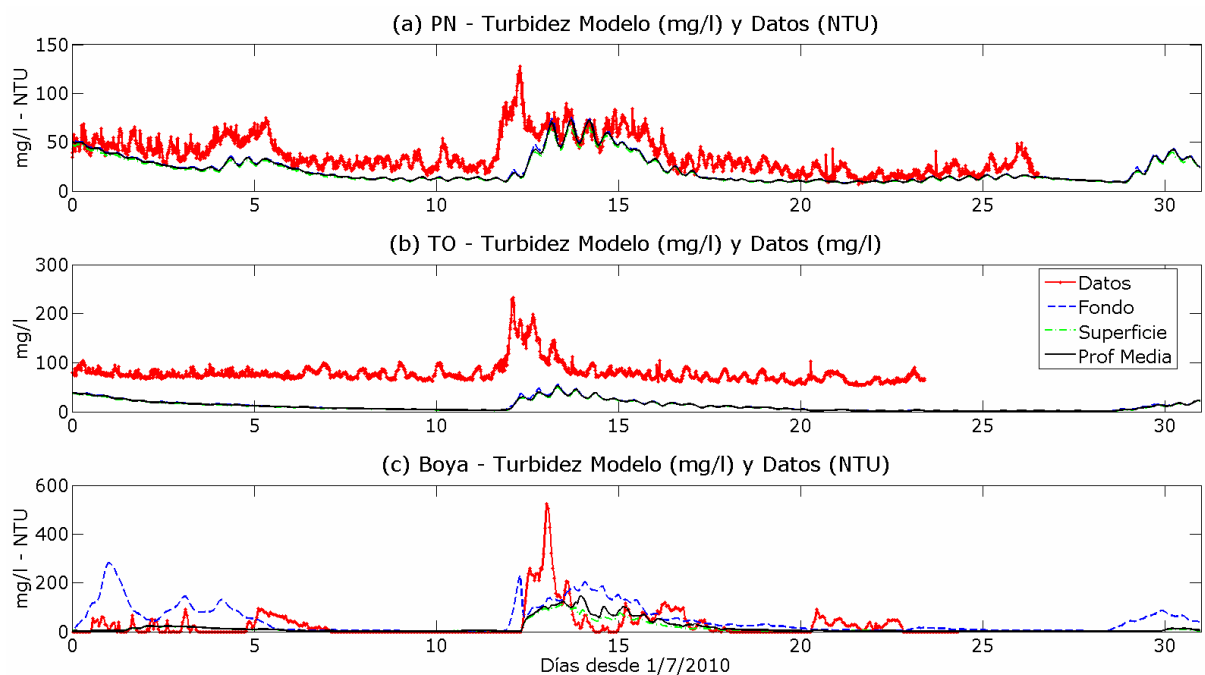


Figura C.23: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsnew5wavesB; agosto 2010.

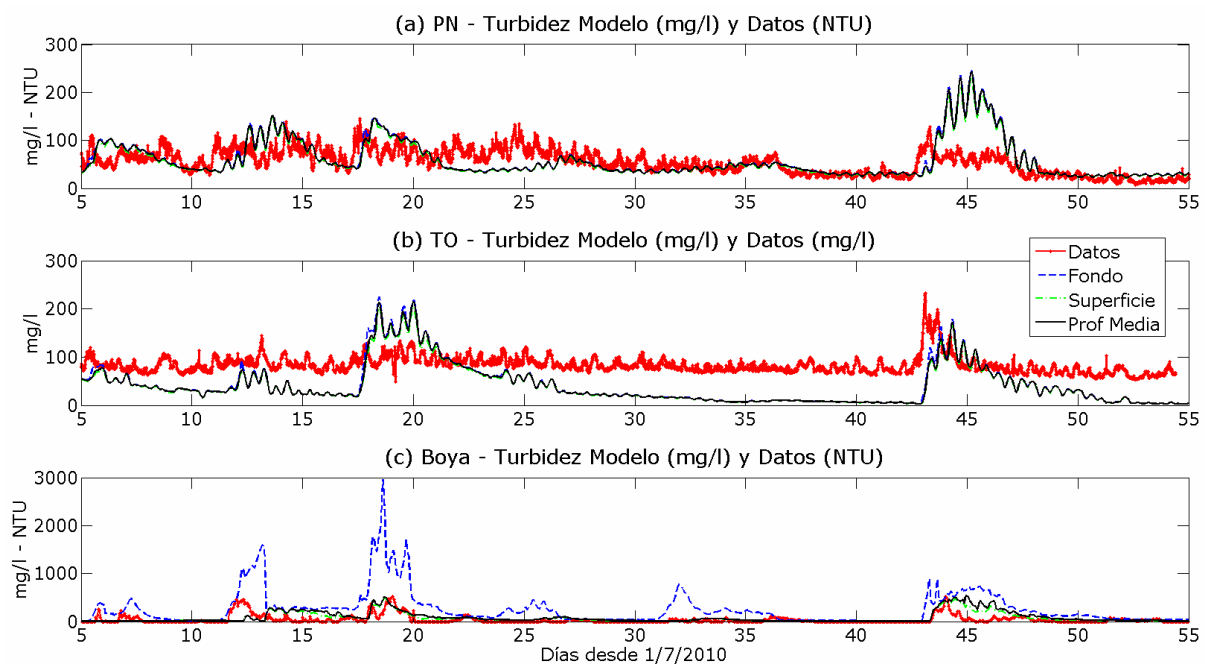


Figura C.24: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsnew5wavesC; julio y agosto 2010.

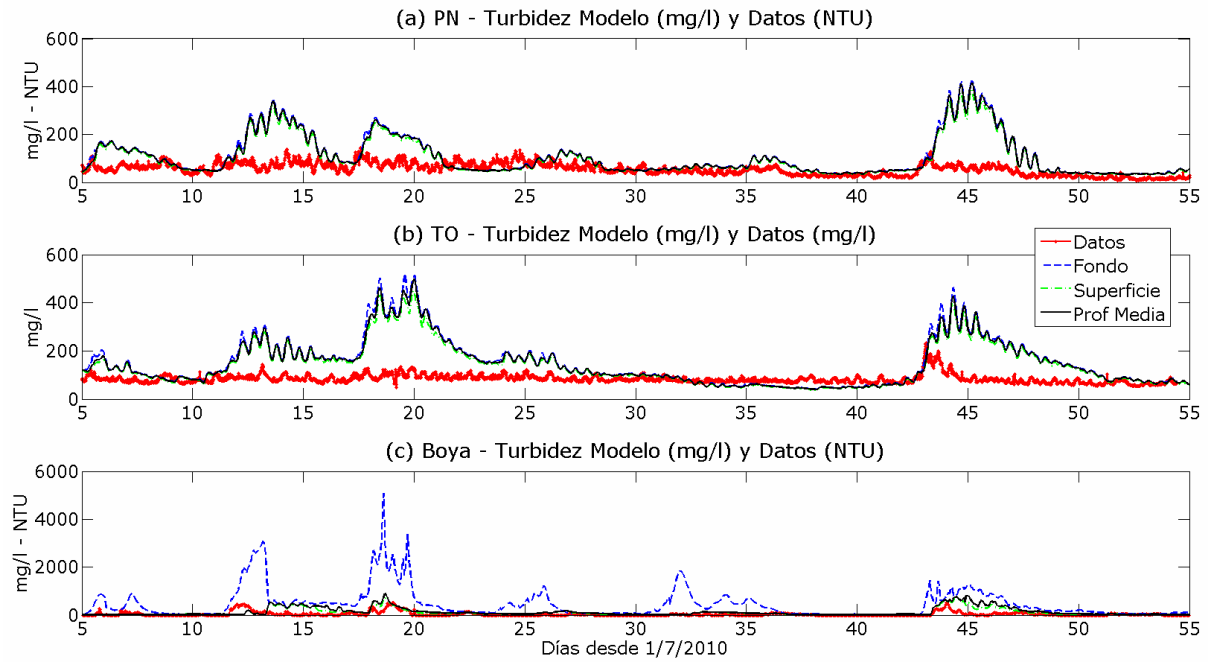


Figura C.25: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsnew6tc4; julio y agosto 2010.

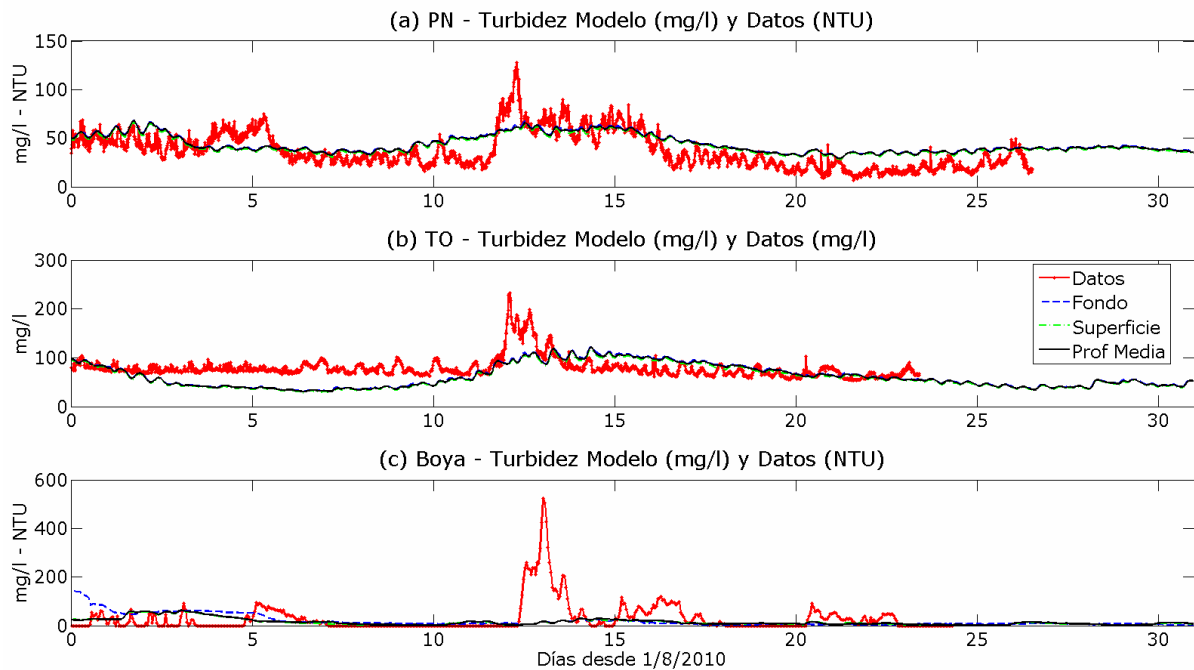


Figura C.26: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsnew6tc4corr; agosto 2010.

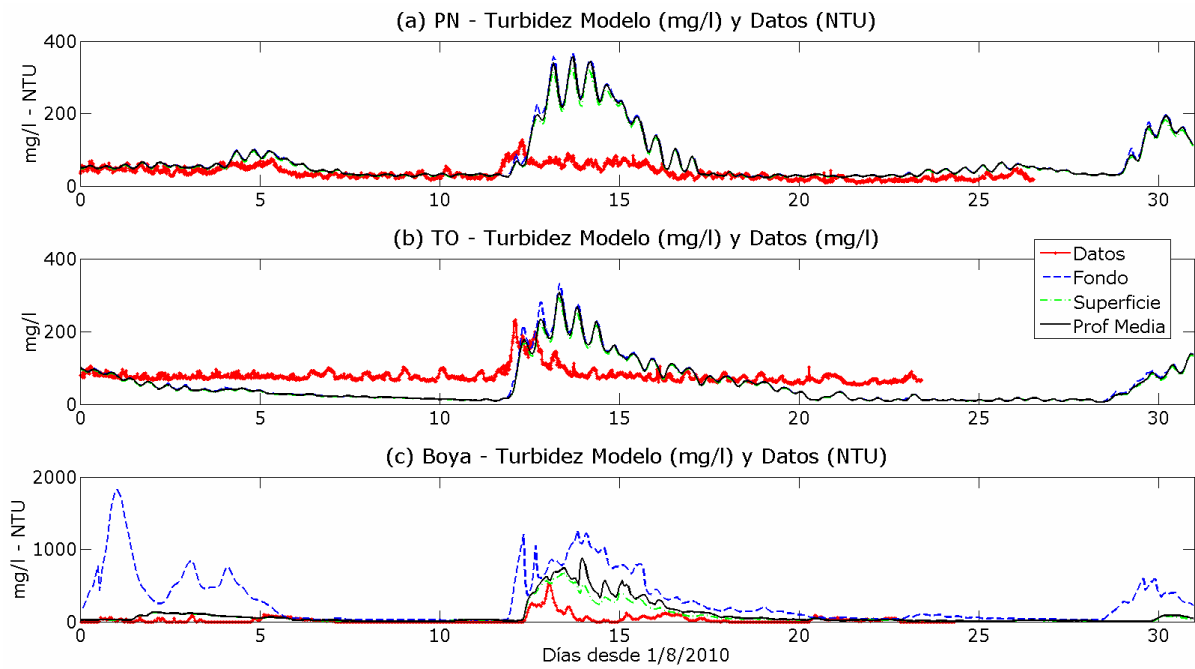


Figura C.27: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsnew6tc4wave; agosto 2010.

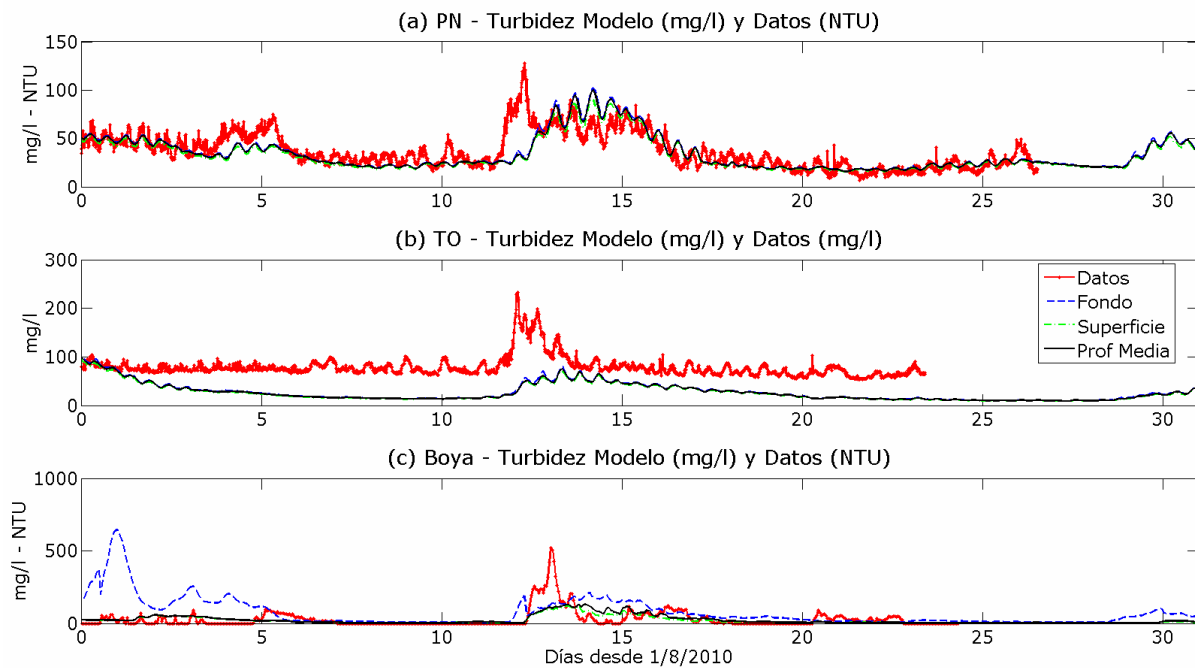


Figura C.28: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsnew7tc4; agosto 2010.

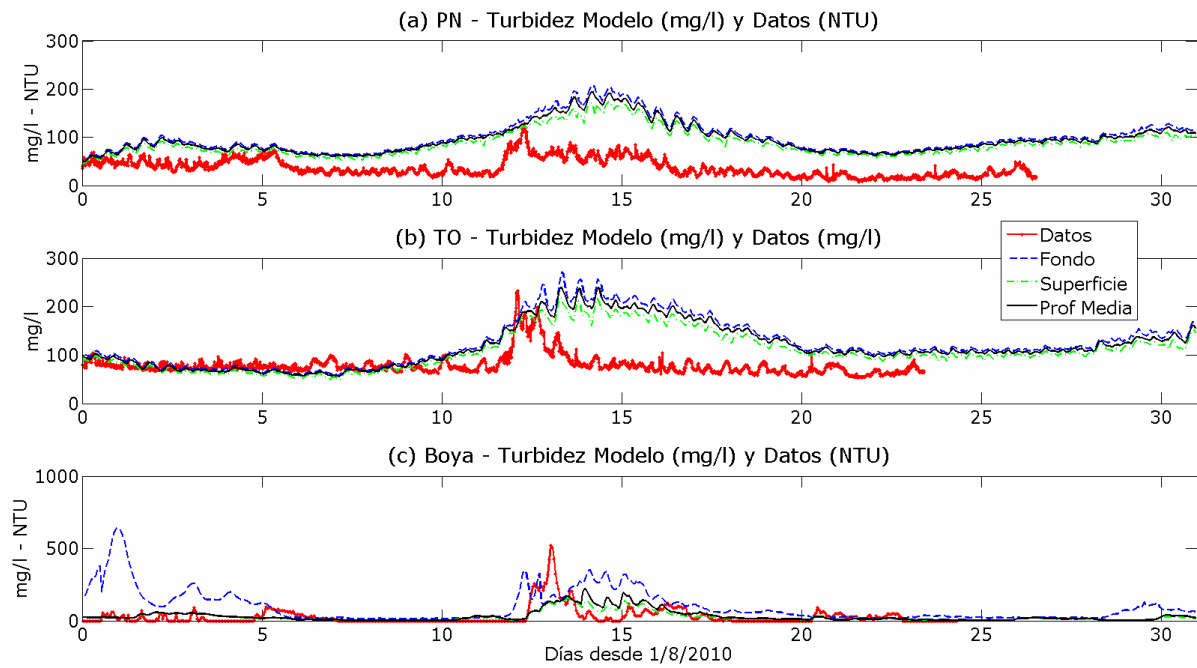


Figura C.29: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsnew7; agosto 2010.

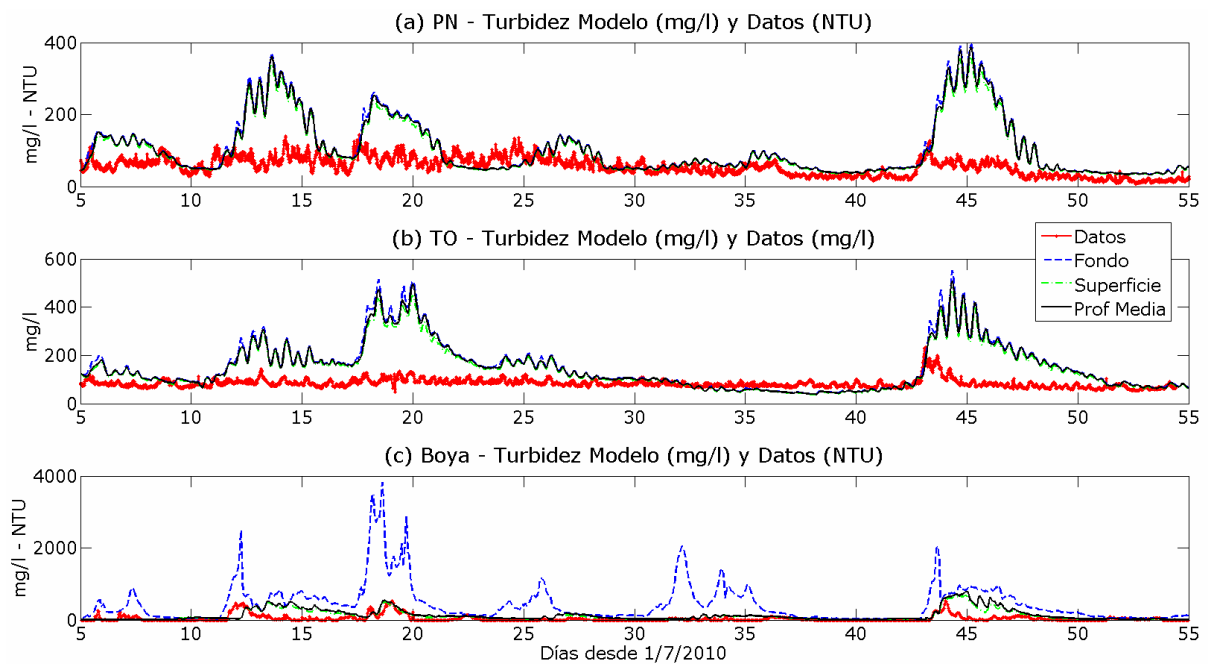


Figura C.30: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsnew6tc4cep; julio y agosto 2010.

C.3.3. Configuraciones Etapa 3

En las Figuras C.31, C.32 y C.33 se presenta la comparación de los resultados del modelo y las medidas en Pilote Norden, Torre Oyarvide y en la Boya Oceanográfica para las configuraciones de la etapa 3 de los análisis de sensibilidad integrados.

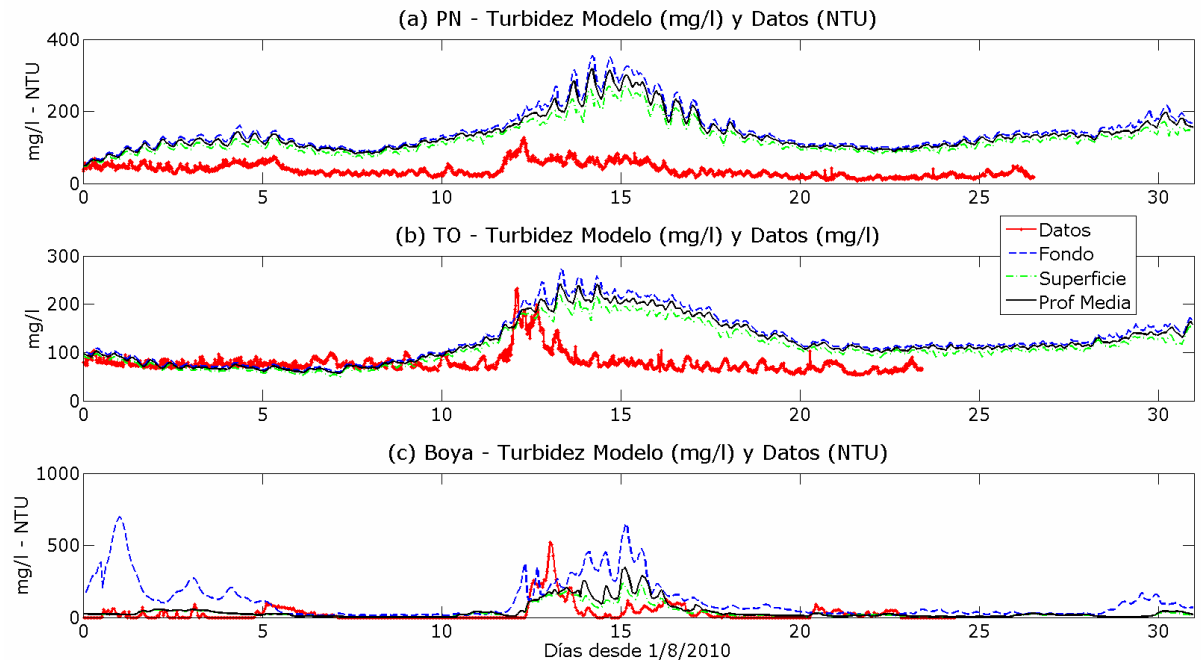


Figura C.31: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsnew7z0var; agosto 2010.

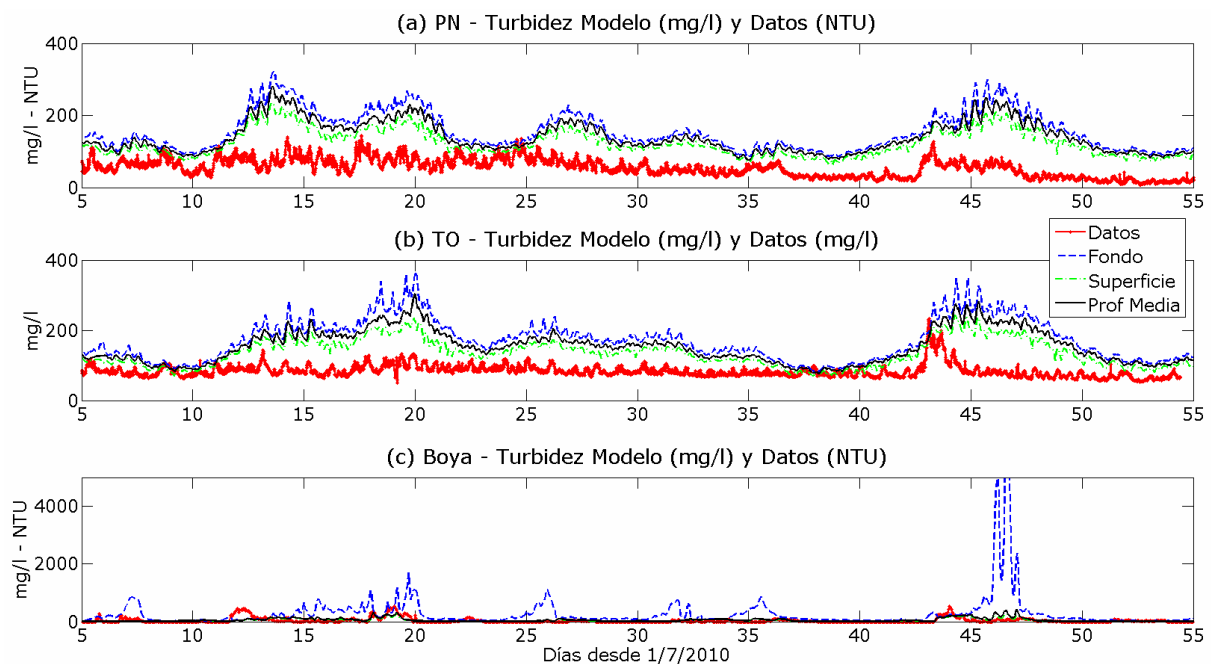


Figura C.32: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsnew9z0cep; julio y agosto 2010.

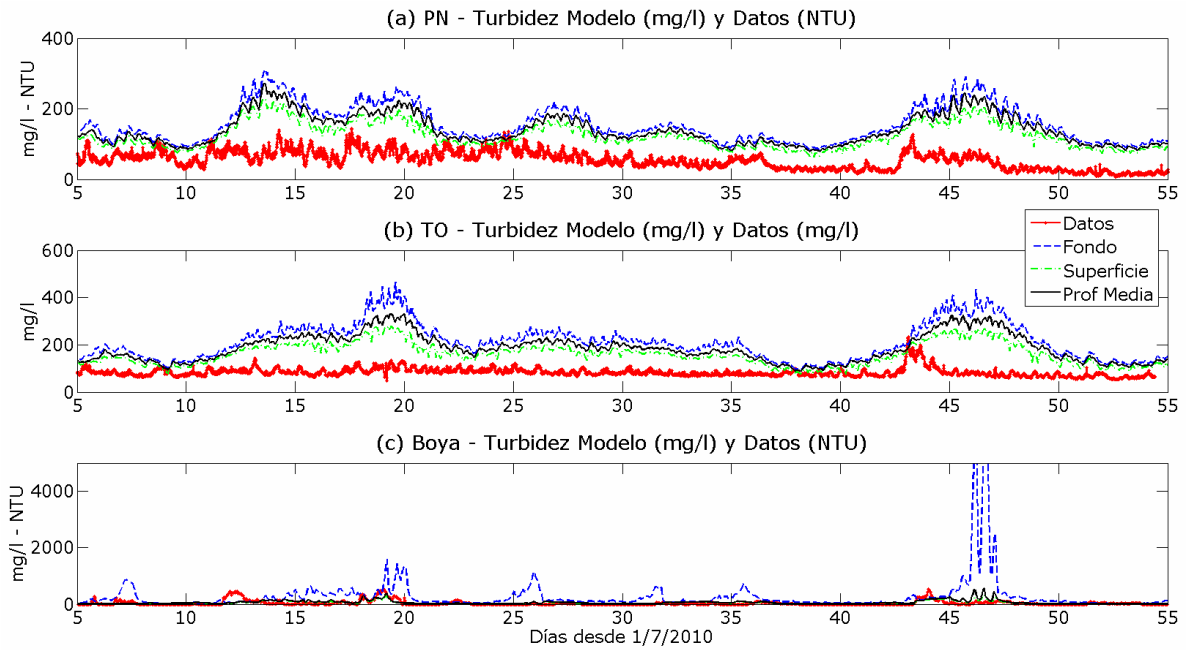


Figura C.33: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsnew9z02cep; julio y agosto 2010.

C.3.4. Configuraciones Etapa 4

En las Figuras C.34 a C.47 se presentan las comparaciones de los resultados del modelo y las medidas en Pilote Norden, Torre Oyarvide y en la Boya Oceanográfica para las configuraciones de la etapa 4 de los análisis de sensibilidad integrados.

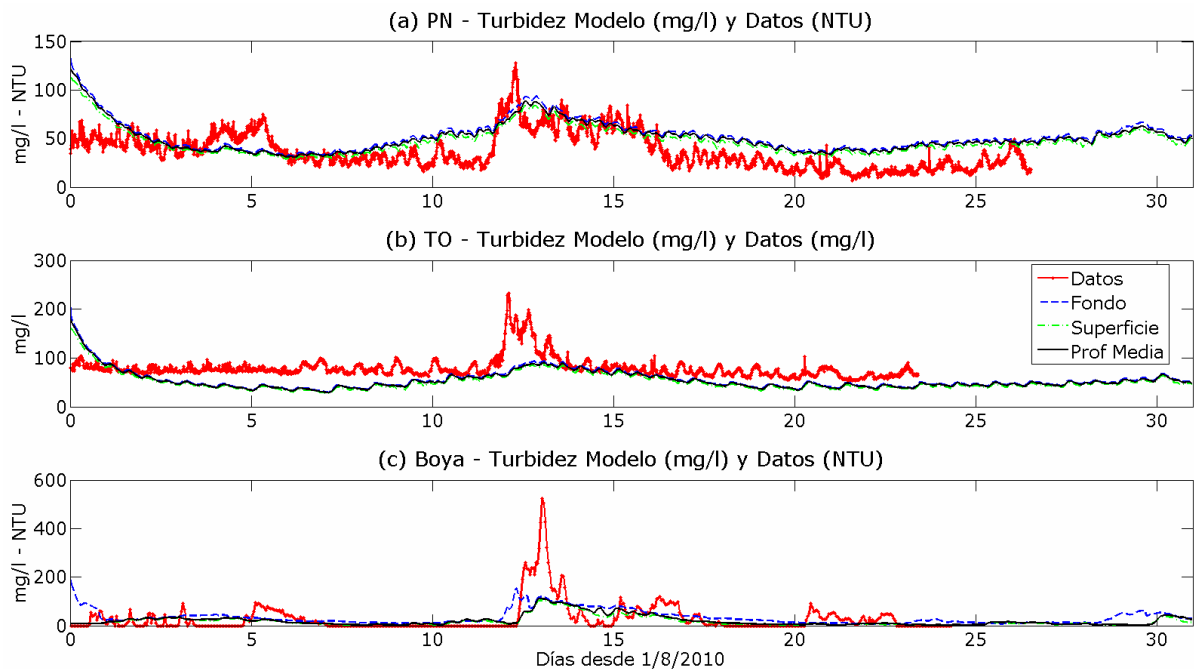


Figura C.34: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsnew9z02cepd; agosto 2010.

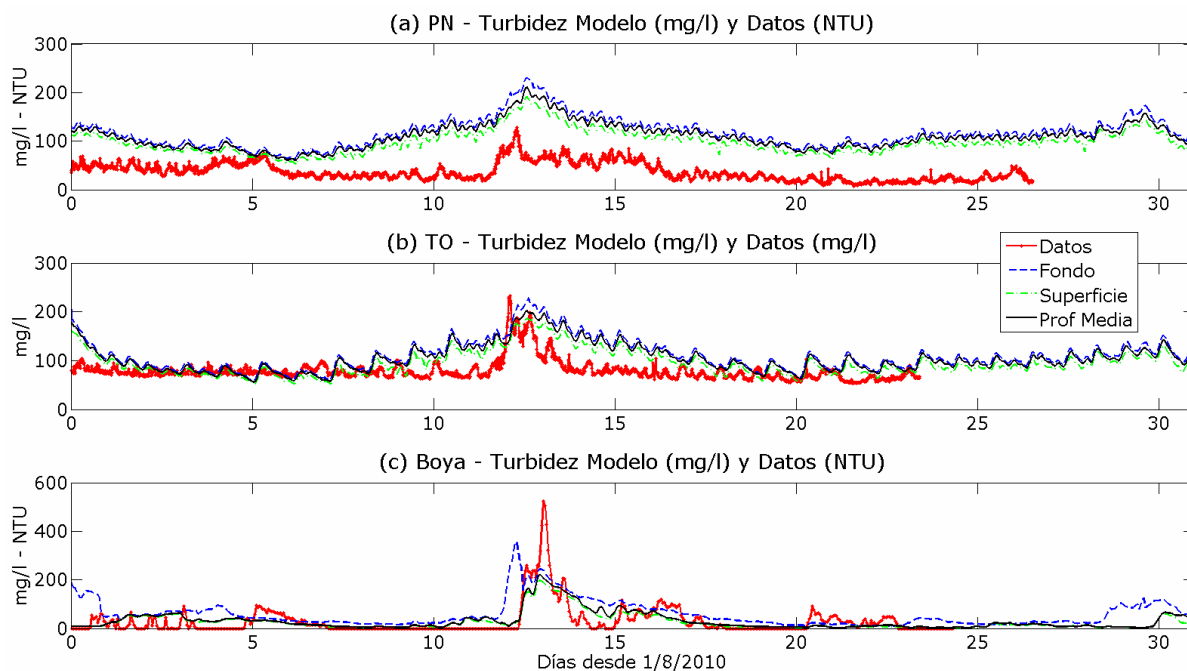


Figura C.35: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsnew9e04; agosto 2010.

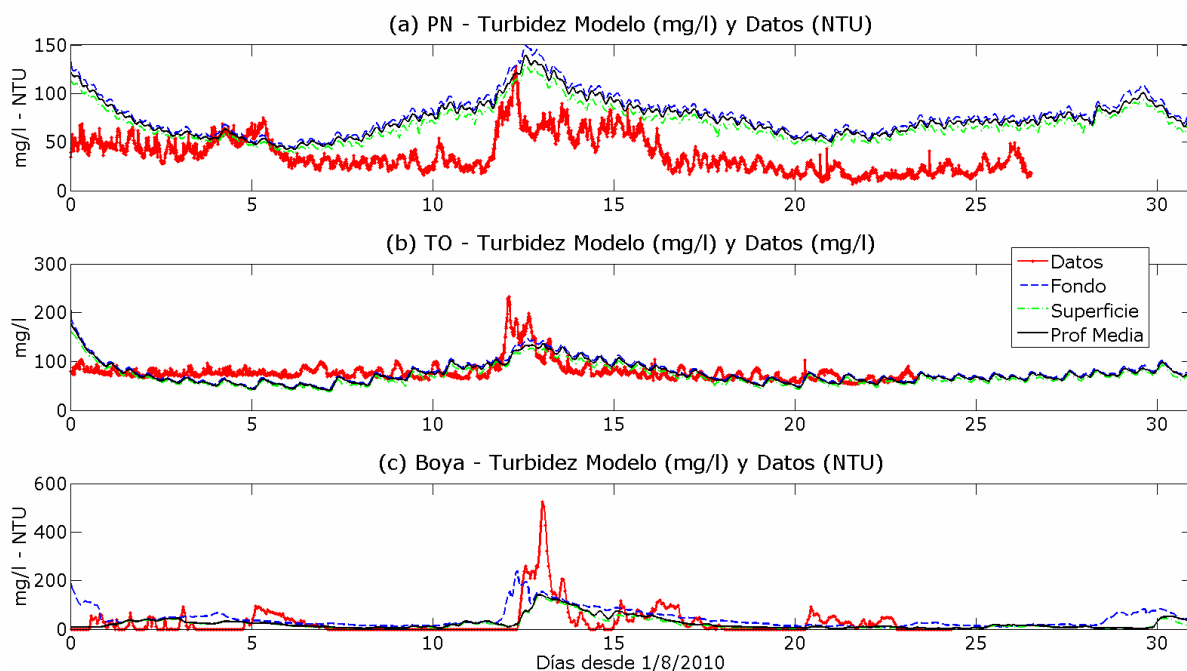


Figura C.36: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsnew9e05; agosto 2010.

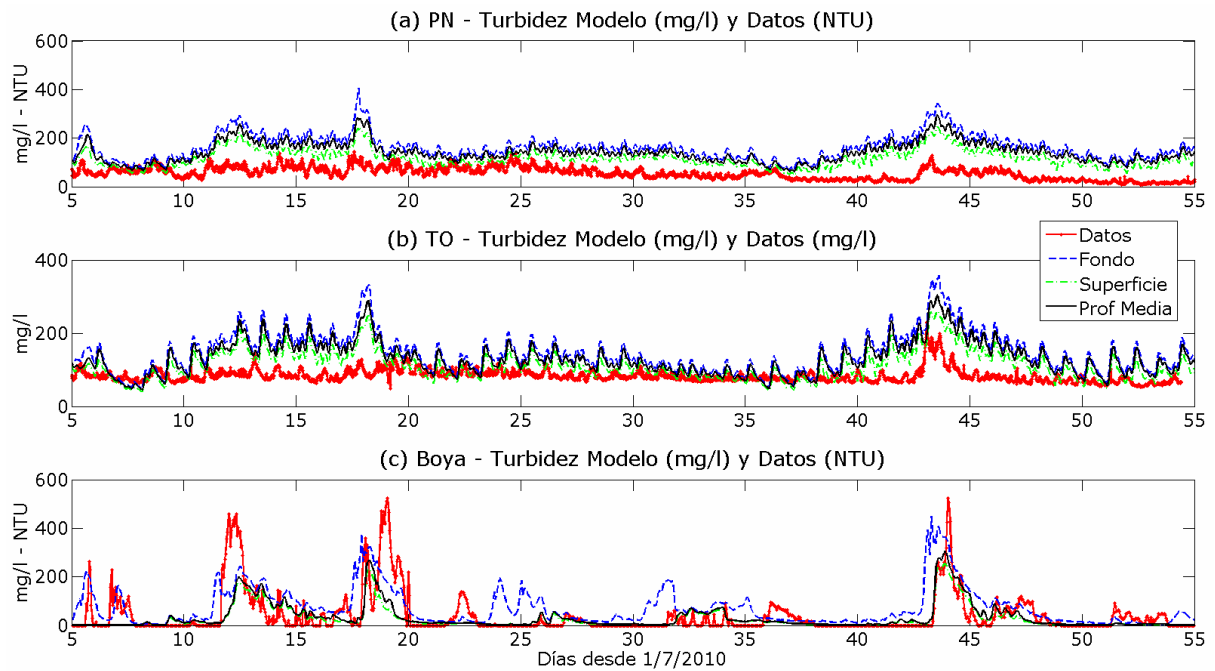


Figura C.37: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsfe01; julio y agosto 2010.

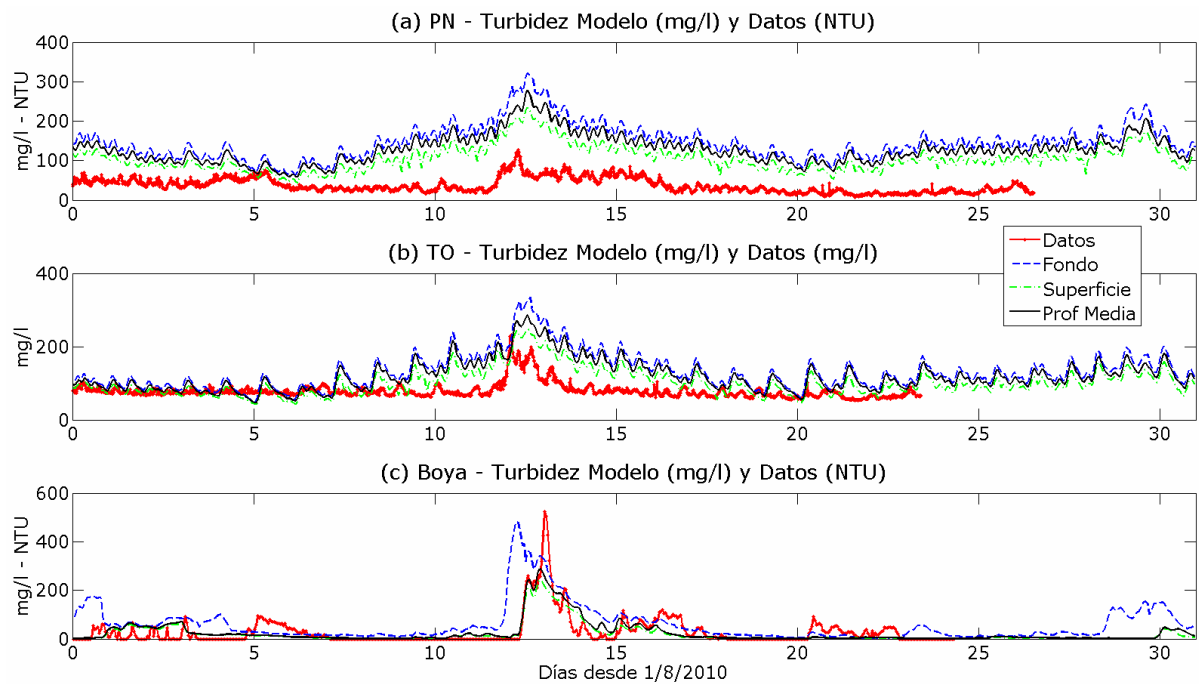


Figura C.38: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsfe02; agosto 2010.

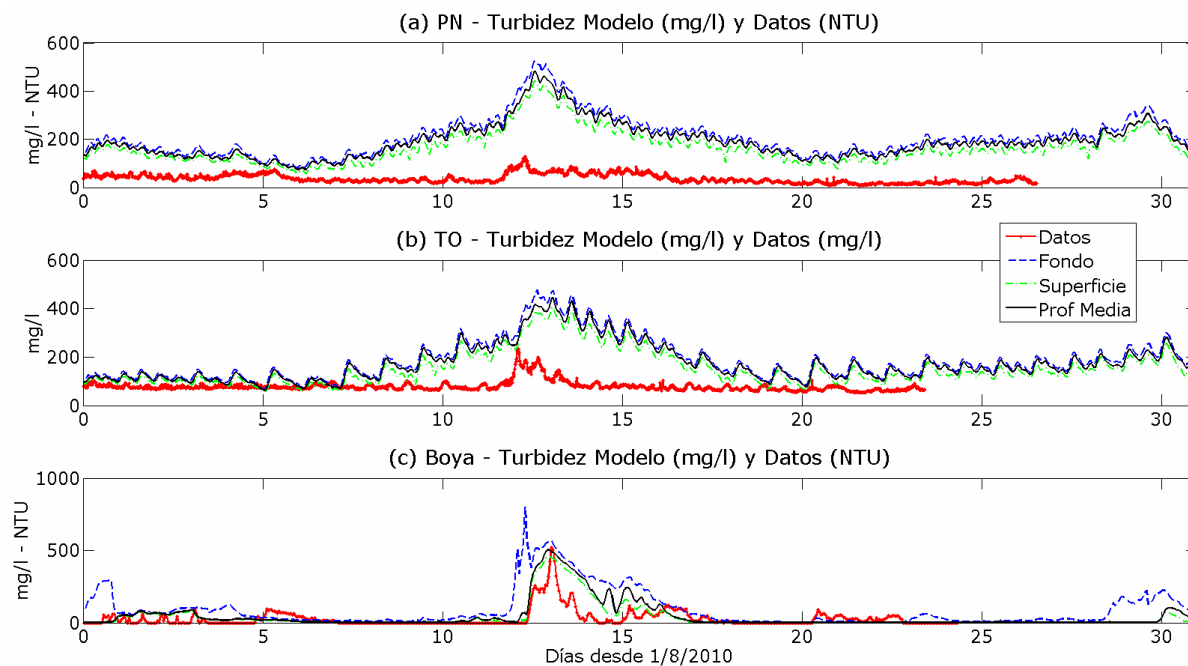


Figura C.39: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsf1e02; agosto 2010.

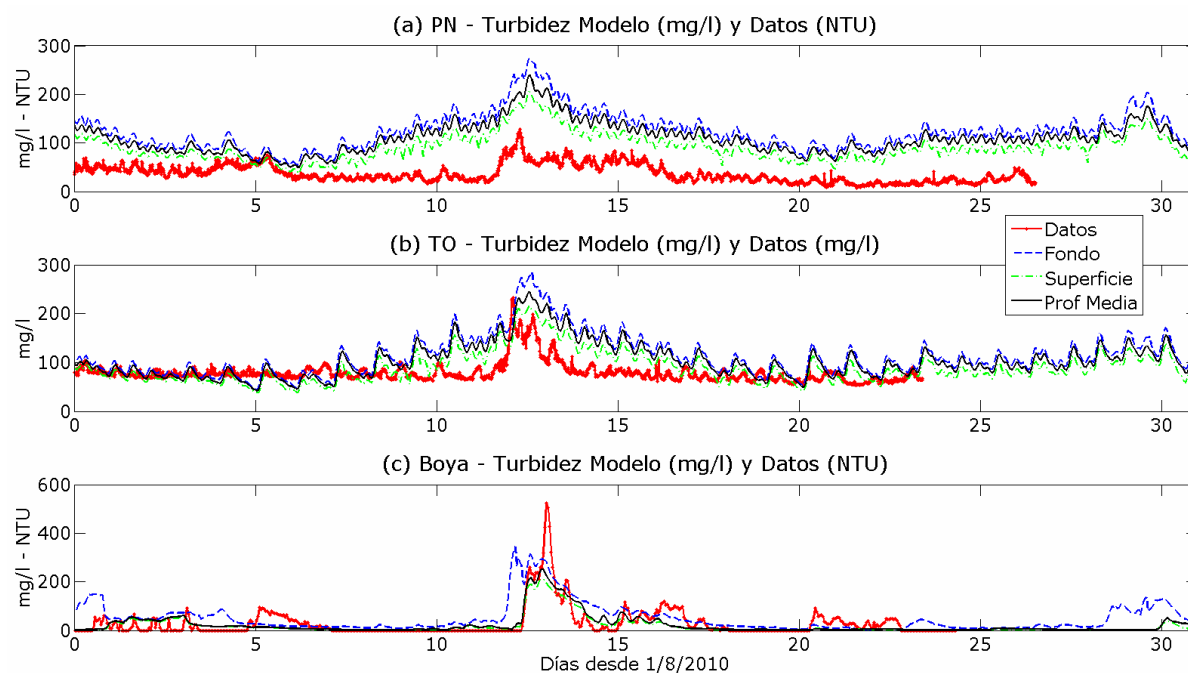


Figura C.40: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsfe03; agosto 2010.

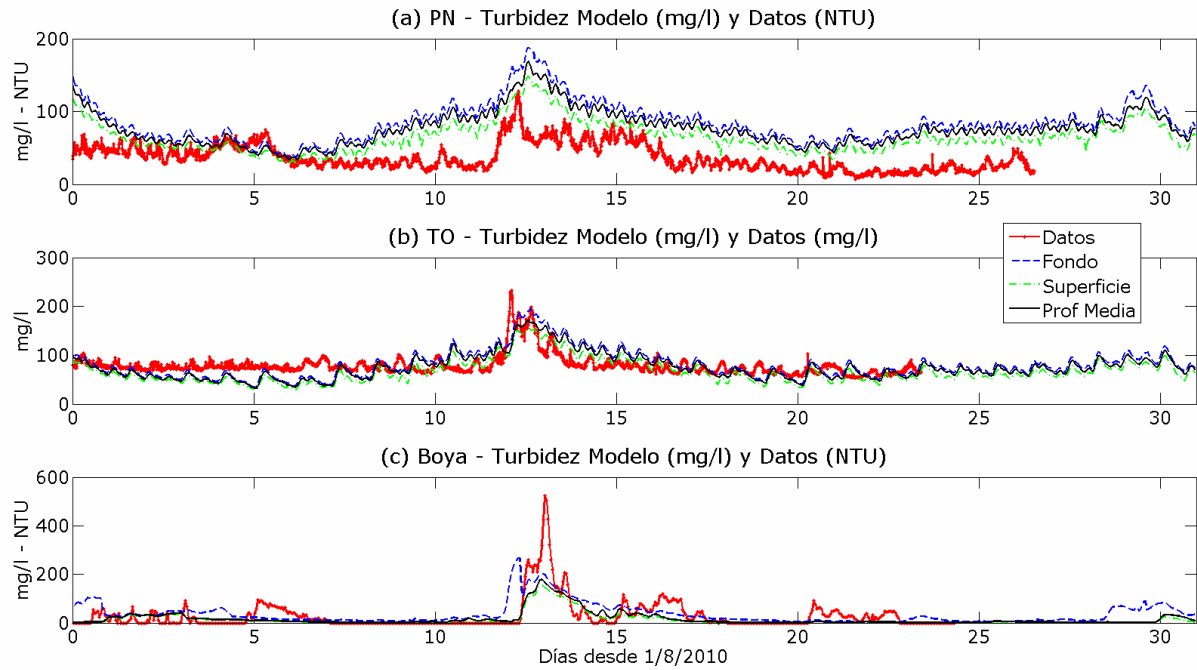


Figura C.41: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsfe04; agosto 2010.

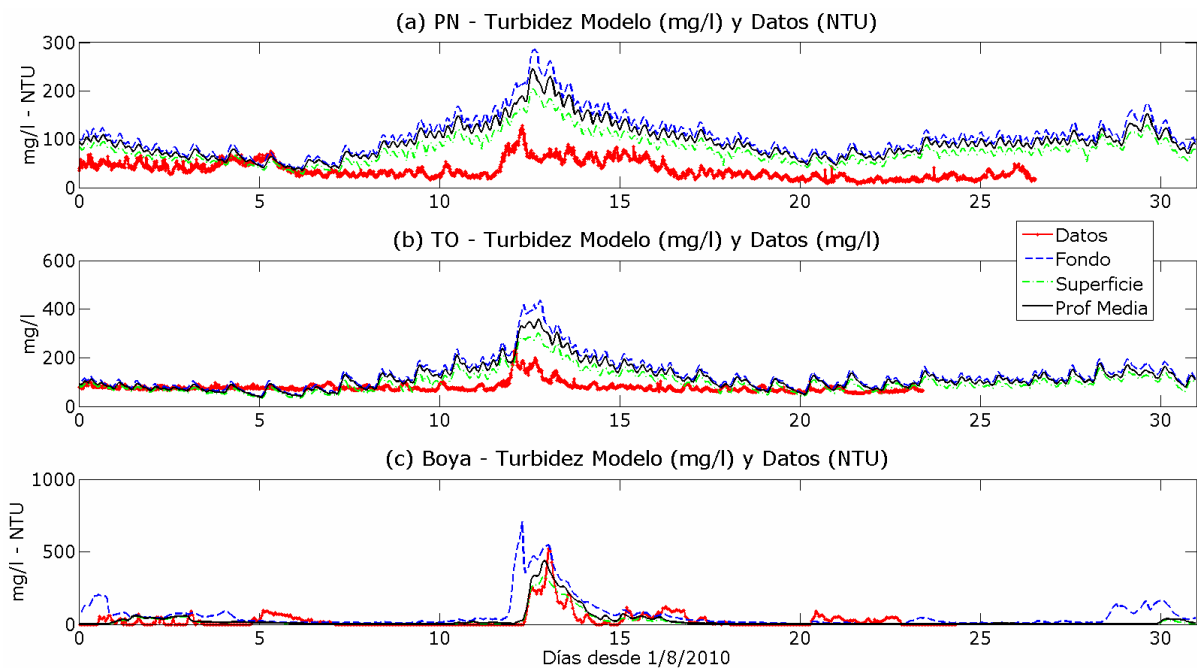


Figura C.42: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsfe03hom; agosto 2010.

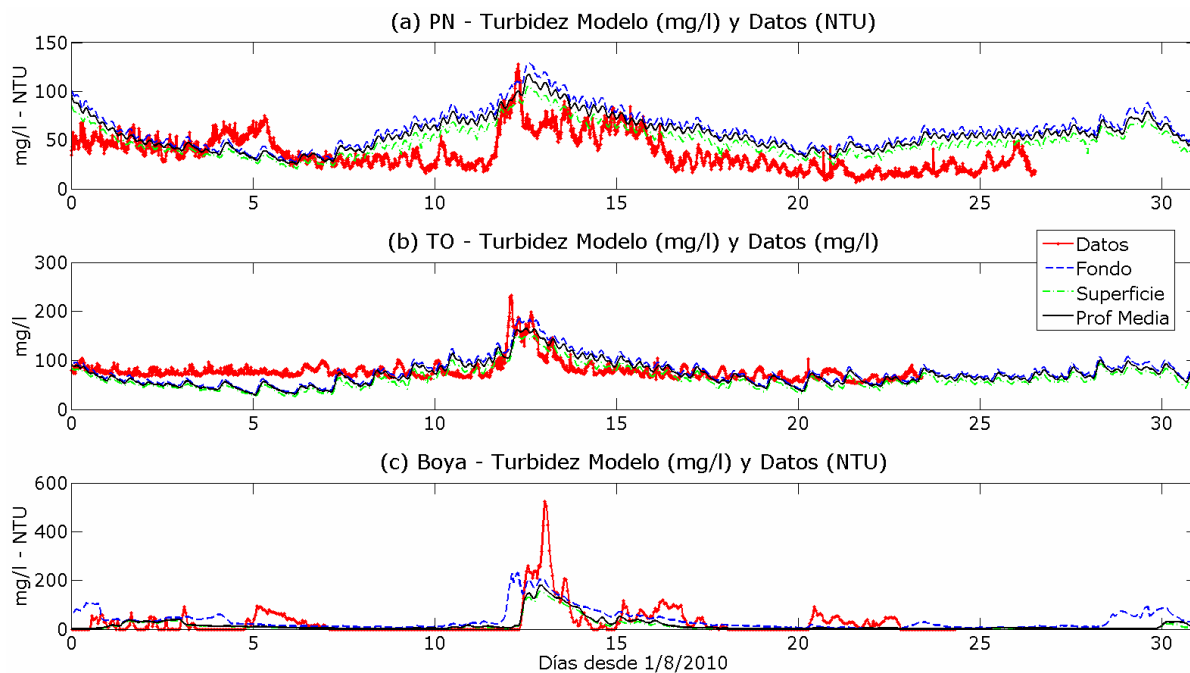


Figura C.43: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsfe04hom; agosto 2010.

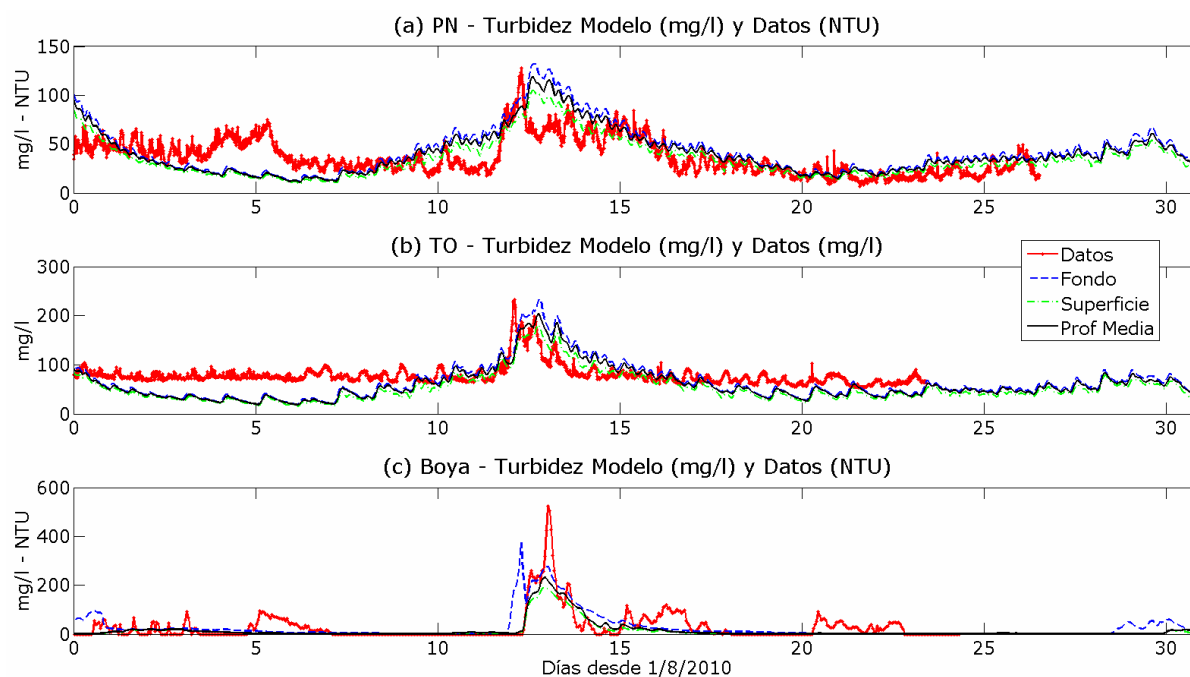


Figura C.44: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsfe03homtc3; agosto 2010.

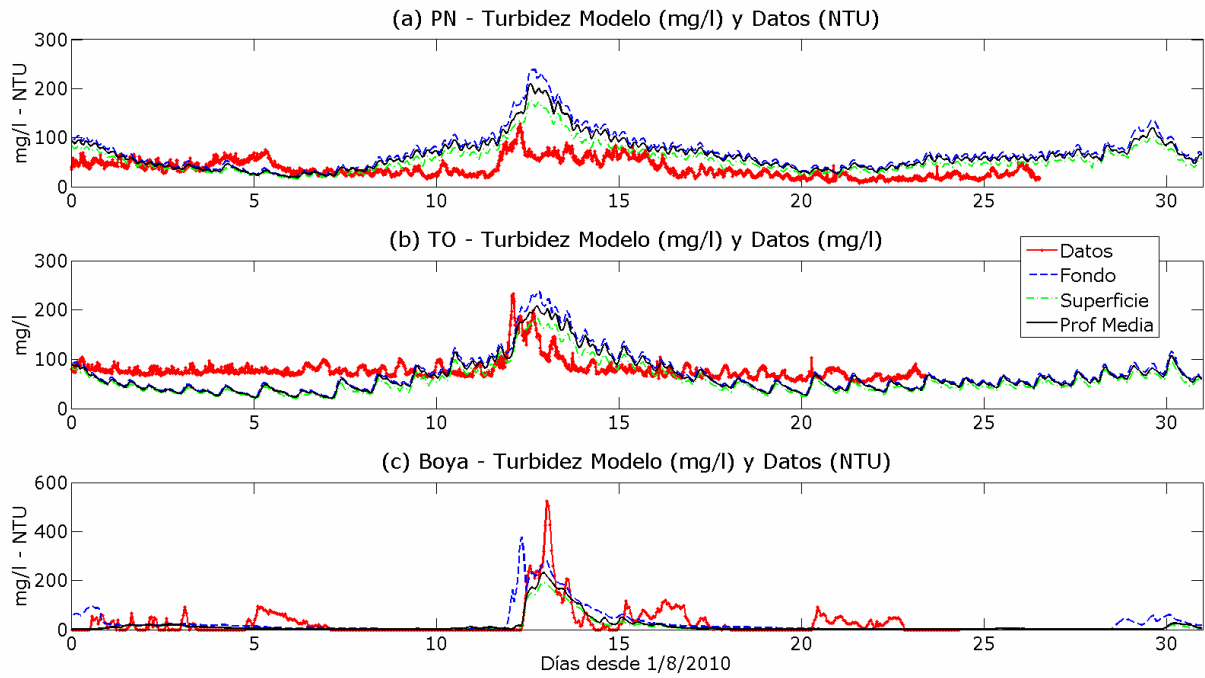


Figura C.45: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsfe03tc3; agosto 2010.

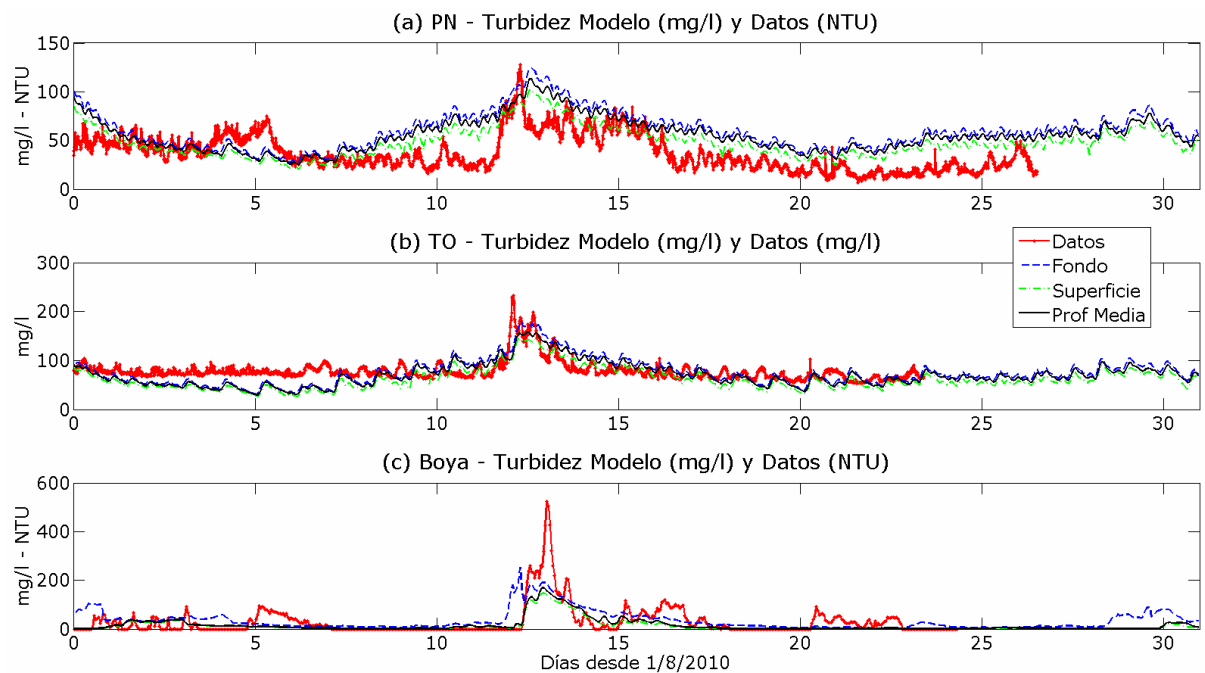


Figura C.46: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsfe04homsGd; agosto 2010.

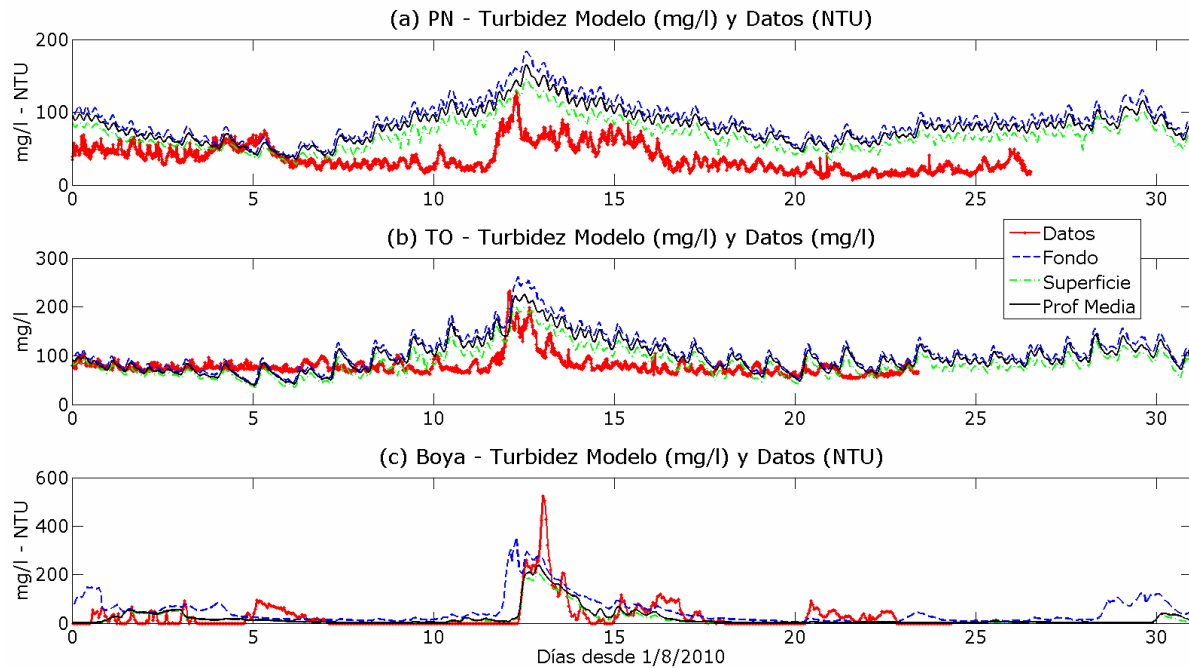


Figura C.47: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida y obtenida con el modelo en fondo, superficie y profundidad media en (a) Pilote Norden, (b) Torre Oyarvide y (c) Boya Oceanográfica. Configuración Wsfe03homsGd; agosto 2010.

C.4. VALIDACIÓN DEL MODELO

C.4.1. Comparación con medidas indirectas de concentración en Montevideo

Se utilizaron las medidas indirectas del perfil de concentración de sedimento en suspensión registradas en la estación PB en Montevideo durante varios meses del período 2009 para analizar el comportamiento del modelo en la zona. Estas medidas se determinaron a partir del ajuste del retorno del eco de la señal acústica de un ADCP ubicado sobre el fondo (Bellón et al., 2010). A pesar de no ser medidas directas de turbidez o concentración las mismas se consideran como una guía del comportamiento de la concentración de sedimento en la zona.

En las Figuras C.48 y C.49 se presenta la comparación de las series temporales medidas y obtenidas con el modelo a diversas profundidades (capas y bin aumentan desde el fondo a la superficie) para los períodos de tiempo enero a marzo, y abril a junio de 2009, respectivamente. También se presentan los errores medios cuadráticos del ajuste para cada serie. Se observa en ciertos casos las medidas y el modelo muestran un comportamiento similar y en otros no. Básicamente hay diferencias en la variación temporal de las concentraciones mínimas; mientras el que corresponde al modelo presenta una variabilidad temporal en función de las tensiones de marea y de oleaje, los datos muestran un valor basal. Por otro lado se observa los grandes eventos de incremento de concentración obtenidos de las medidas son representados correctamente por el modelo. Durante el período enero a marzo 2009 los errores varían entre 21 y 27 mg/l según la capa, mientras que para el período de abril a junio 2009 en el fondo los errores se incrementan a 42 mg/l y hacia la superficie son de 25 mg/l.

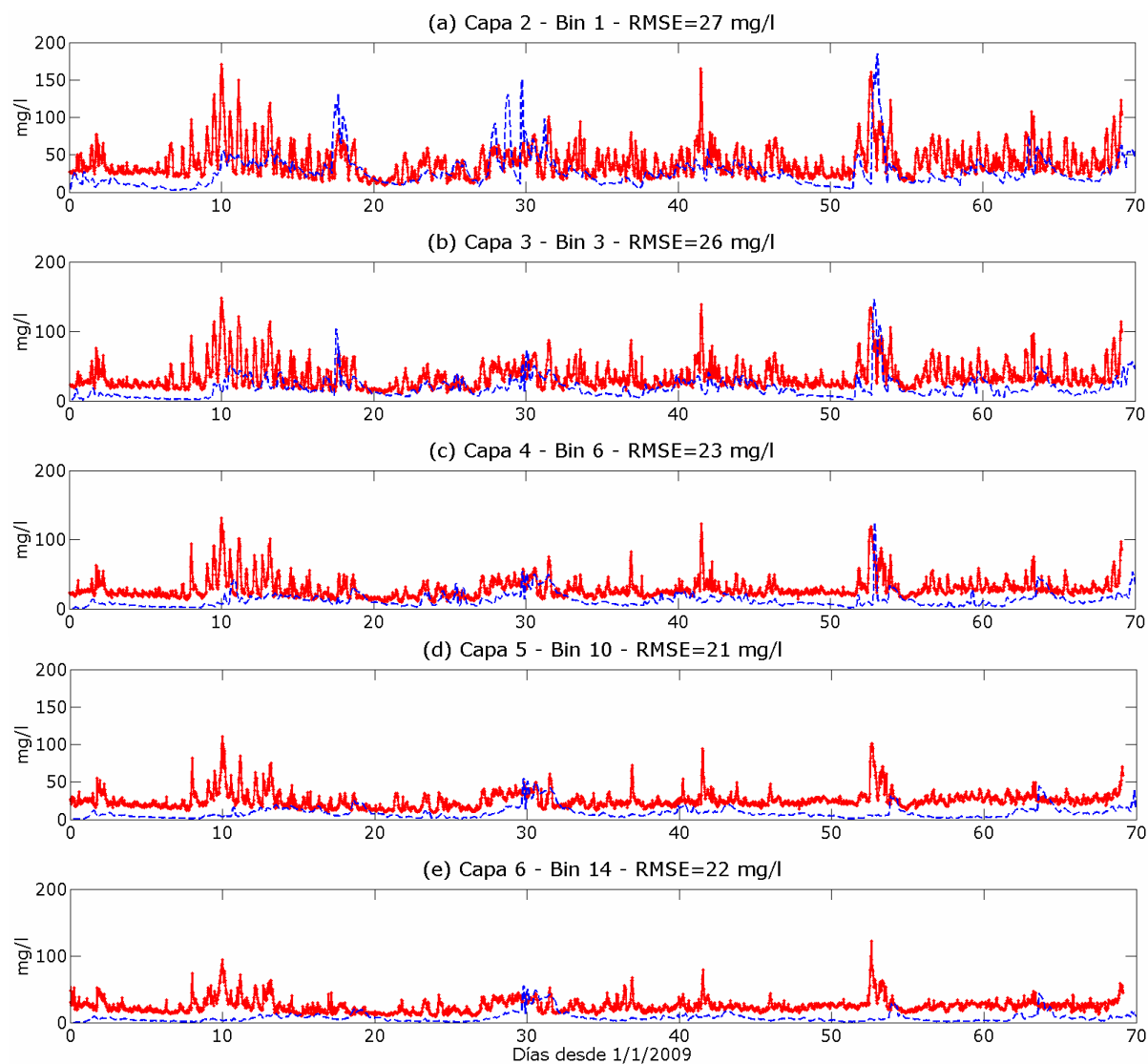


Figura C.48: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida en PB y obtenida con el modelo en fondo en diferentes profundidades, y errores medios cuadráticos (RMSE) para el período de medición enero, febrero y marzo de 2009.

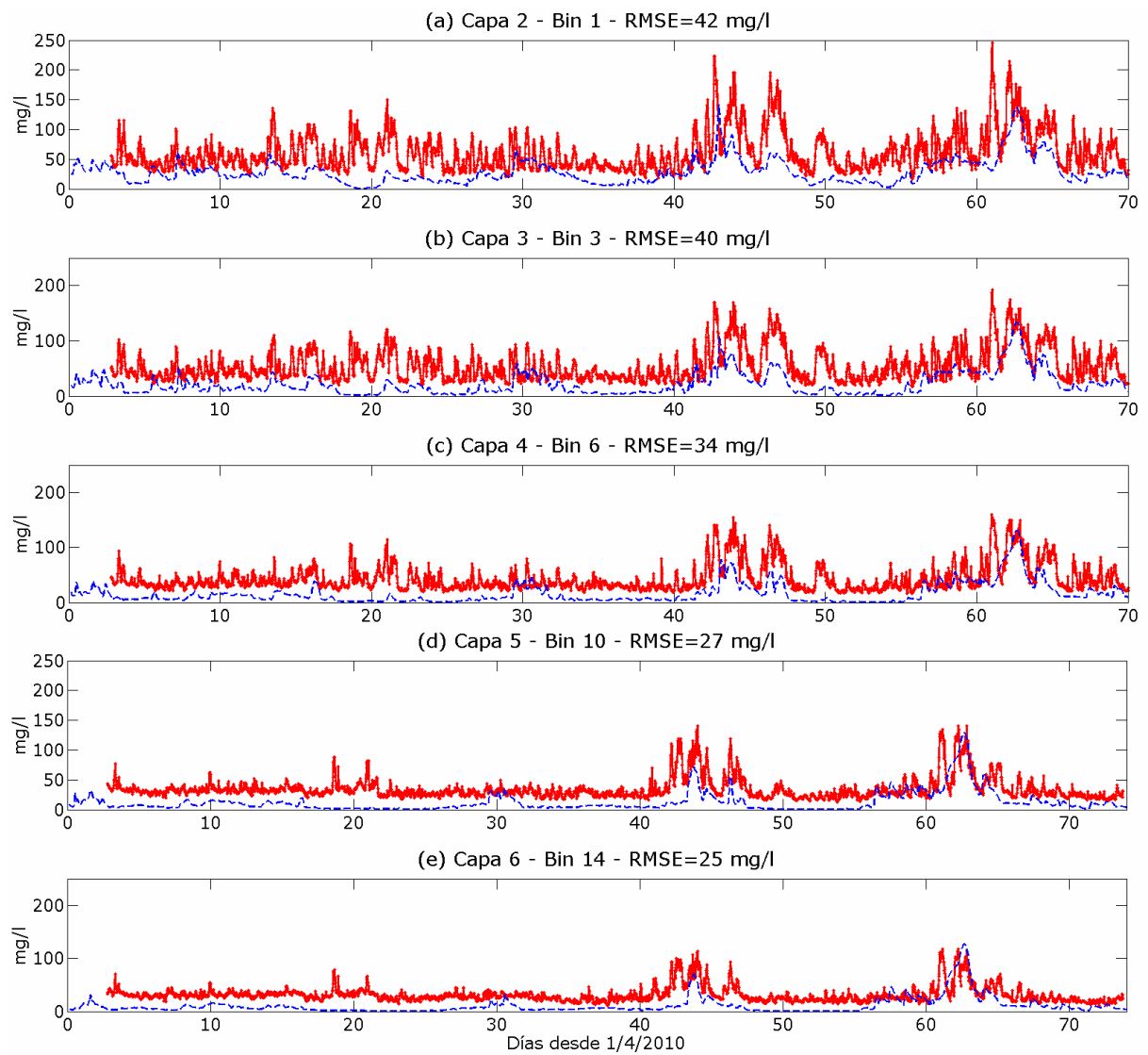


Figura C.49: Comparación de la evolución temporal de la concentración de sedimento en suspensión medida en PB y obtenida con el modelo en fondo en diferentes profundidades, y errores medios cuadráticos (RMSE) para el período de medición abril, mayo y junio de 2009.

DINÁMICA GLOBAL DE SEDIMENTOS FINOS EN EL RÍO DE LA PLATA

Mónica Fossati