

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental

**ESTABILIZACIÓN DE LA SUPERFICIE
LIBRE EN LA SOLUCIÓN DE
ECUACIONES SHALLOW-WATER POR
ELEMENTOS FINITOS.
APLICACIONES OCEANOGRÁFICAS.**

Autor: Manuel Espino Infantes

Directores: Marc A. García

Agustín Sánchez-Arcilla

Barcelona, mayo de 1994

CAPÍTULO 7.

ANÁLISIS DE LA CIRCULACIÓN INDUCIDA POR EL VIENTO EN EL ESTRECHO DE BRANSFIELD (ANTÁRTIDA) DURANTE EL VERANO AUSTRAL

El Estrecho de Bransfield es el brazo de mar que separa la Península Antártica del archipiélago Shetland del sur (figura 7.1). Desde el punto de vista oceanográfico, se trata de una zona singular en la que se desarrollan complejos procesos de intercambio hidráulico. Por otra parte, se trata de una de las áreas de la Antártida que soporta mayores densidades de tráfico marítimo, y por tanto, mayores riesgos potenciales de contaminación.

La investigación de la oceanografía del Bransfield se inicia con las expediciones del W. Scoresby y del Discovery, realizadas entre 1927 y 1930. Clowes (1934) propone, basándose en los resultados de dichas campañas, un esquema de circulación superficial que todavía hoy es una referencia obligada (figura 7.2). En la década de los 80, bajo los auspicios del programa BIOMASS, se inicia una segunda etapa de experimentos coordinados (FIBEX, SIBEX I y II) en los que se realizan muestreos con mayor resolución espacial, lo que permite mejorar la caracterización de las masas de agua del Bransfield

FIGURA 7.1. Mapa de situación del Estrecho de Bransfield

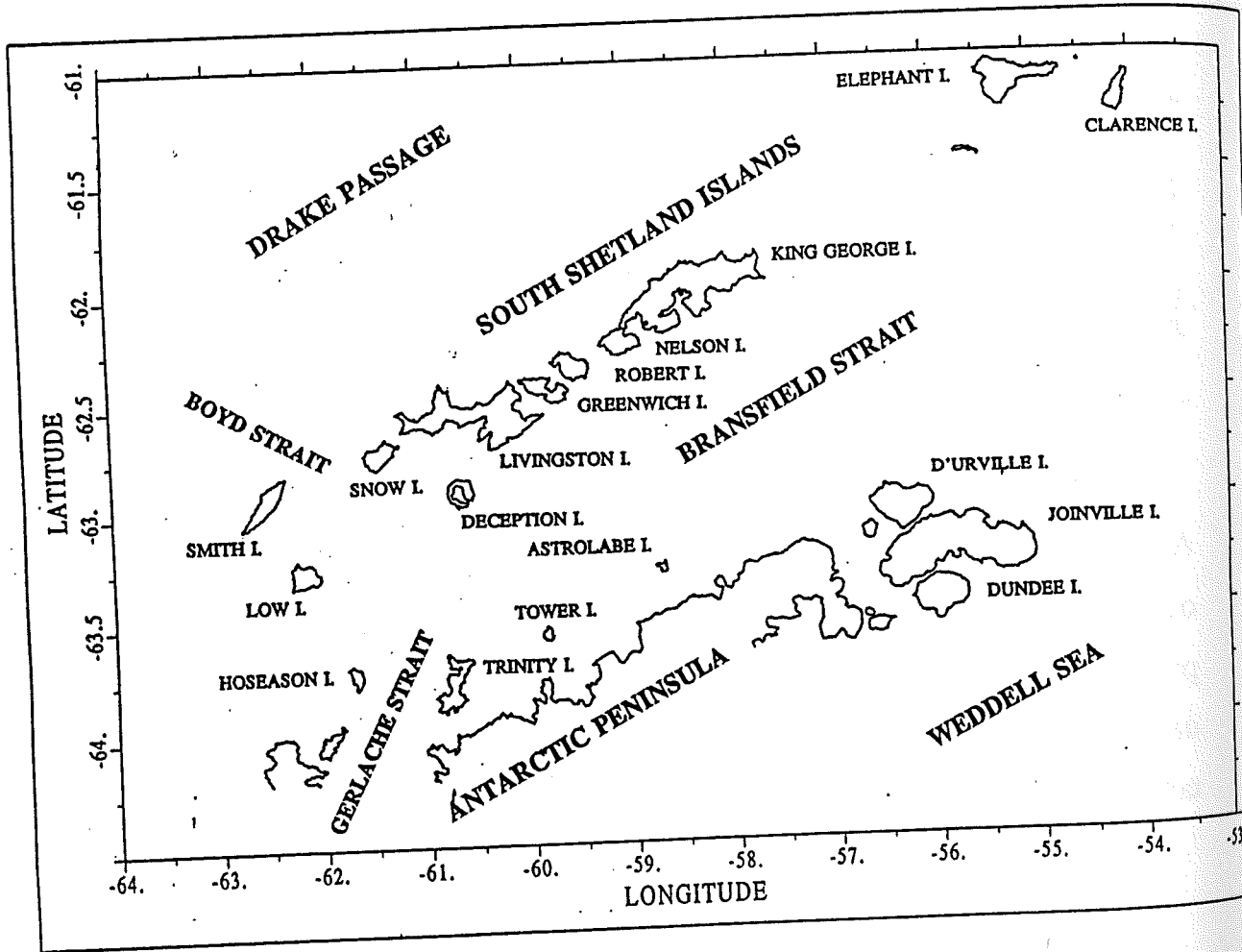
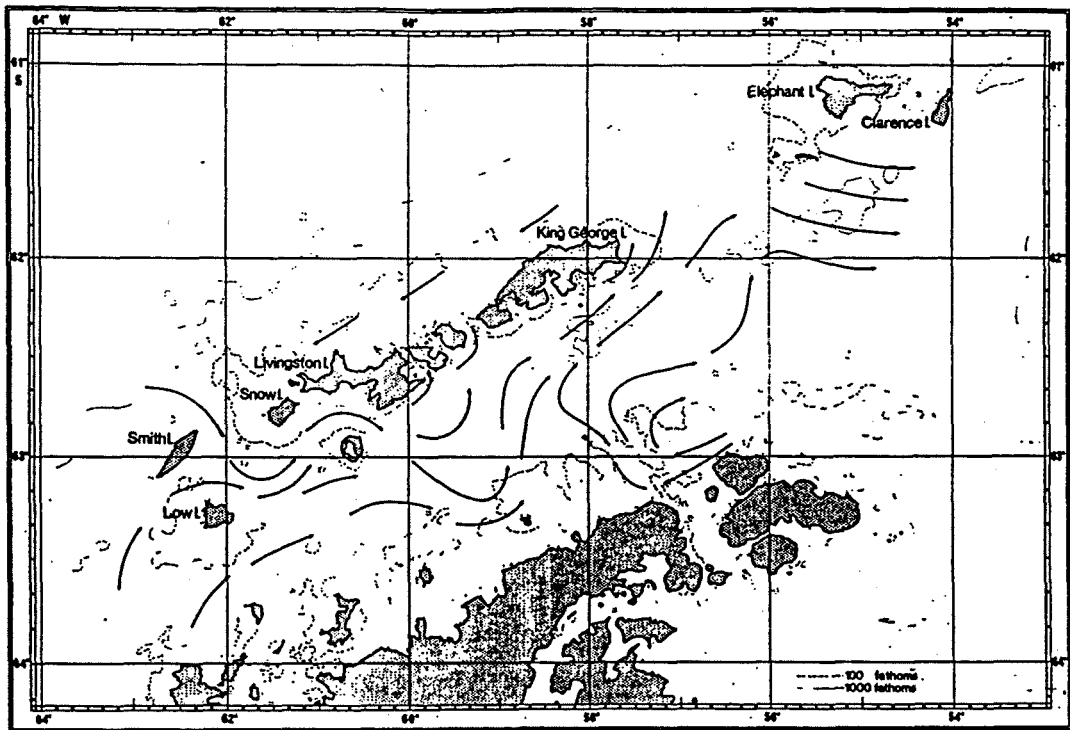


FIGURA 7.2. Esquema de circulación superficial del Estrecho de Bransfield.

Fuente: Clowes, 1934.



(figura 7.3). Hay que destacar los trabajos de diversos autores compilados por Sahrhage (1988) entre las contribuciones más importantes de este período. El programa multidisciplinario RACER (Huntley et al., 1991) es el mejor exponente de los proyectos de la tercera etapa, en los que se opta por aumentar la densidad espacial del muestreo a costa de restringir el ámbito de estudio.

Gracias a los resultados de todas estas campañas, disponemos de mucha información acerca de la hidrografía del Estrecho de Bransfield. Por el contrario se sabe poco acerca de los distintos mecanismos de transporte hidráulico. Al margen de algunos datos puntuales obtenidos con flotadores lagrangianos (Stevenson et al., 1986) y de la observación de la deriva de los icebergs (Schlatter, 1986), casi todo lo que se sabe en el terreno de la hidrodinámica regional procede de cálculos geostróficos de corrientes realizados por distintos autores con respecto a niveles de referencias someros (e.g. 500 db en Grelowski y Tokarczyk (1985) y 200 db en Niiler et al. (1991)).

Grelowski et al. (1986) han calculado el esquema de circulación geostrófica superficial que se muestra en la figura 7.4, adoptando de nuevo un nivel de referencia de 500 db. En este esquema aparecen reflejados los grandes rasgos de la circulación local. Se puede advertir la presencia de una corriente intensa -la denominada Corriente del Bransfield que atraviesa el Estrecho de suroeste a noreste- asociada a un frente de densidad que ocupa el talud continental de las Shetland del Sur separando el agua de plataforma de las masas frías y salinas procedentes del mar de Weddell. Así mismo, se intuye una corriente débil en dirección suroeste que transporta agua de Weddell bordeando

FIGURA 7.3. Distribución superficial de masas de agua en el Estrecho de Bransfield durante el verano Austral. (A) mar de Wedell; (B) plataforma continental de la Península Antártica; (C) mezcla de la zona central del Bransfield; (D) superficie Antártica del mar de Bellingshausen; (E) zona de surgencia de la costa norte islas Shetland del Sur; (F) paso de Drake y (G) zona de intercalación de agua de surgencia y del mar de Bellingshausen. Fuente: Sievers, 1982.

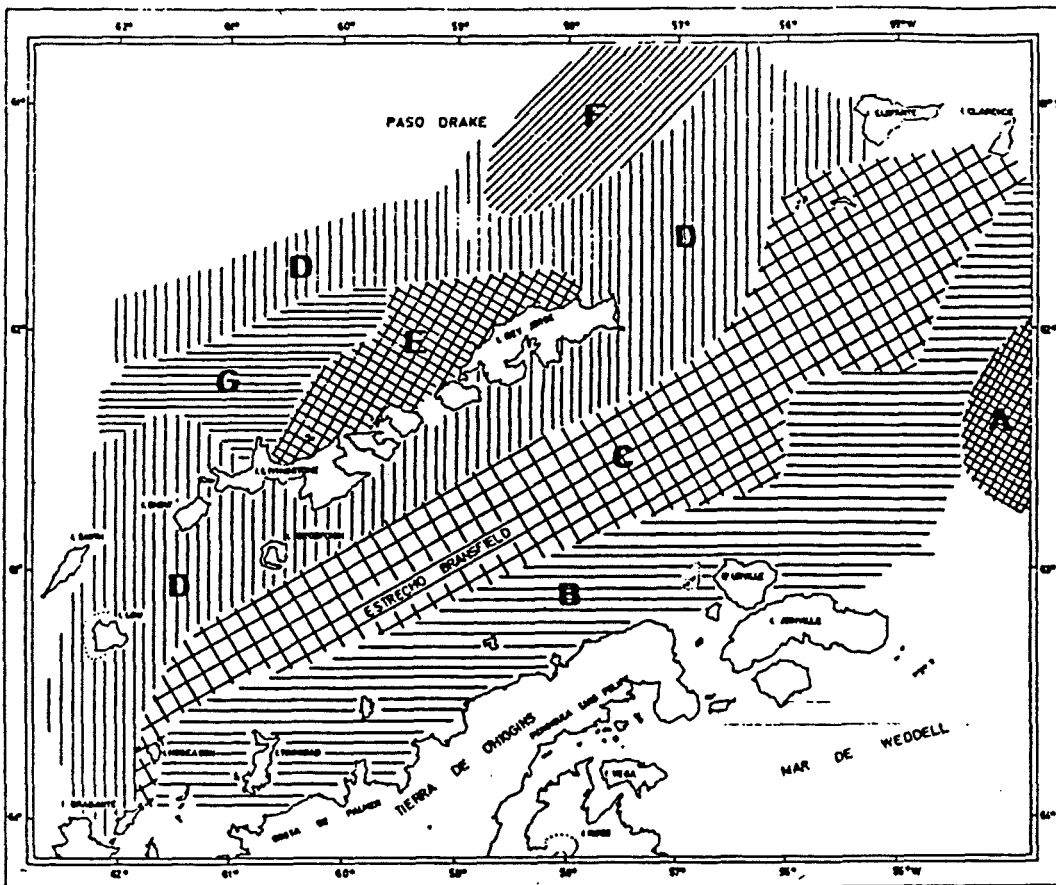
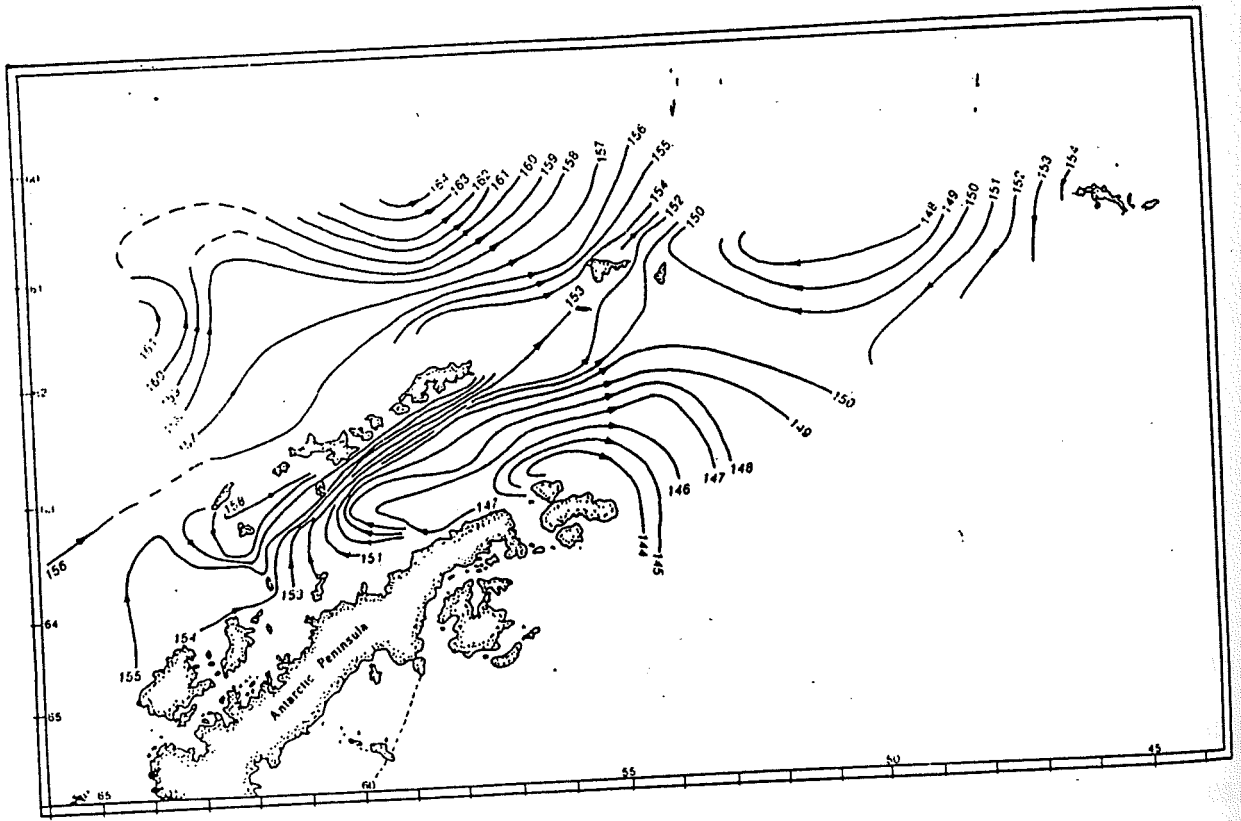


FIGURA 7.4. Esquema de circulación geostrofica superficial del Estrecho de Bransfield. Fuente: Grelowski et al., 1986.

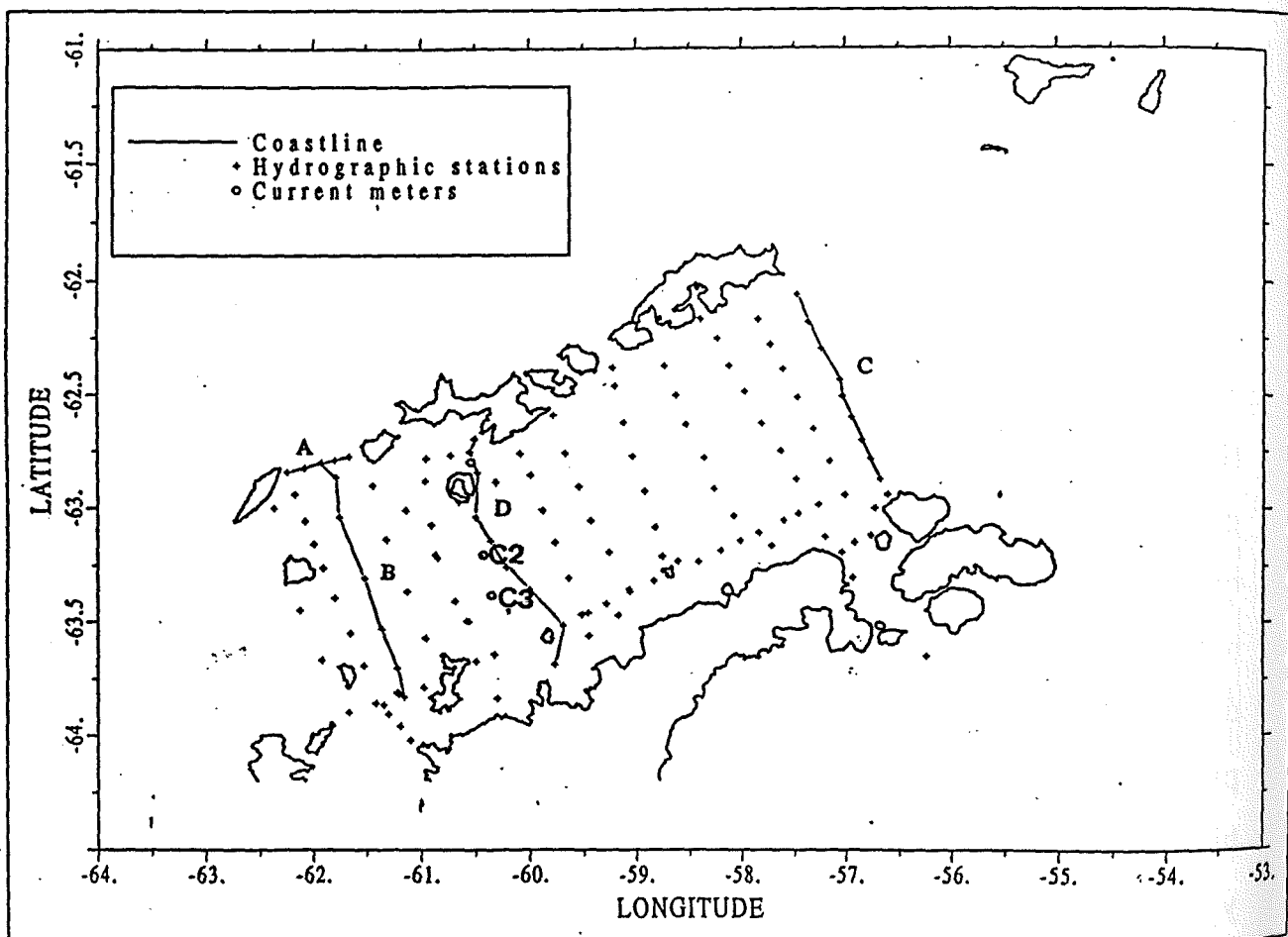


la costa de la Península Antártica, y que al llegar a la isla Trinity gira en sentido horario para unirse a la Corriente del Bransfield.

Para el estudio de la variabilidad de mesoescala, la principal limitación que plantea la información disponible es su insuficiente resolución espacial, ya que la mayor parte de las campañas realizadas en el área fueron diseñadas para determinar los grandes rasgos de la circulación regional. Además, no es posible determinar la circulación en los ámbitos litorales haciendo uso de los datos hidrográficos, puesto que, al tratarse de zonas someras en las que la fricción y los efectos no lineales son importantes, no es procedente la aplicación del método geostrofico.

En este contexto, el proyecto "Oceanografía Dinámica del Estrecho de Bransfield (CICYT / ANT91-1279)" ha pretendido llenar algunos de los vacíos de conocimiento existentes (S.-Arcilla y García, 1991); en particular, y entre otros, el que se refiere a la circulación inducida por los vientos locales propios del verano austral. Las actividades desarrolladas por el equipo del LIM/UPC durante la campaña antártica BIOANTAR 93 se enmarcan dentro de este proyecto (García et al., en prensa). Se obtuvieron perfiles de parámetros hidrográficos en una malla de estaciones concentrada en las cuencas occidental y central del Estrecho de Bransfield. El espaciamiento característico entre estaciones (figura 7.5) correspondía a la magnitud estimada para el radio de deformación de Rossby local (15-30 km), por lo que es fiable utilizar los resultados de la campaña para investigar rasgos de mesoescala de las estructuras hidrográficas locales. Asimismo, en los puntos indicados en la figura 7.5 como C2 y C3 se fondearon y recuperaron tras 3 meses de operación sendas cadenas de correntímetros. También se registraron otros datos de corrientes mediante

FIGURA 7.5. Mapa de localización de las estaciones hidrográficas realizadas en la campaña antártica BIOANTAR 93 y de las cadenas de correntímetros C2 y C3.



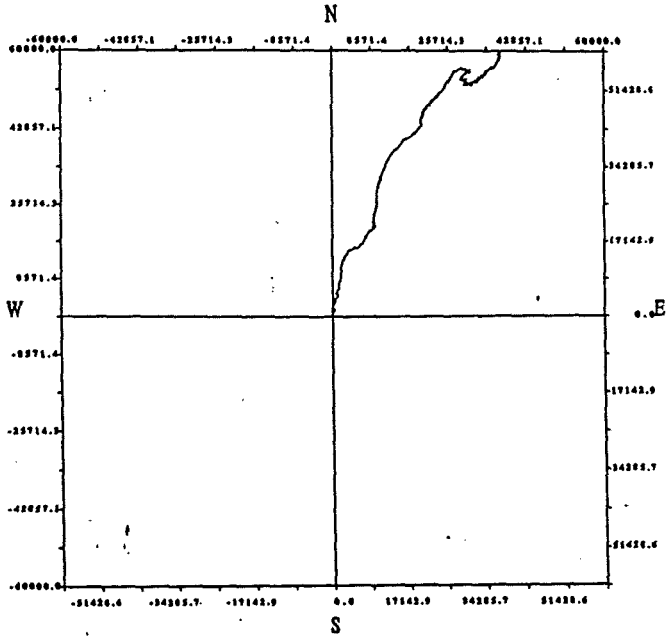
perfilador Doppler en algunas zonas de plataforma de especial interés. La campaña oceanográfica se simultaneó con la adquisición de imágenes NOAA-/AVHRR y los datos del satélite europeo ERS-1 (imágenes SAR y datos de viento WSC) correspondientes al área de estudio.

Los datos obtenidos con correntímetros confirman, en términos generales, la preponderancia de la corriente de marea por encima de cualquier otra contribución al flujo (López et al., en prensa). El aporte integrado en el tiempo del viento y de la circulación geostrófica se manifiesta en la magnitud y en la dirección de la corriente residual. La figura 7.6 muestra los vectores progresivos de los registros de la corriente obtenidos en las cadenas C2 y C3. A partir del recorrido virtual de los vectores, es posible estimar el módulo y la dirección, promediados vectorialmente. Los valores resultantes son los siguientes (CICYT, 1993):

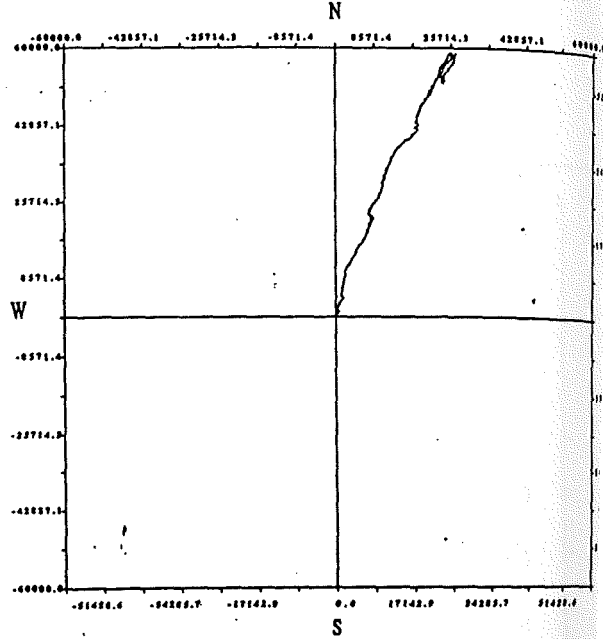
Correntímetro	Profundidad (m)	Velocidad (cm/s)	Dirección
C2	20	6.8	NNE
C2	50	6.1	NNE
C2	200	1.7	NNE
C2	400	1.8	N
C3	20	4.0	WSW
C3	200	2.3	W

FIGURA 7.6a. Diagrama de vectores progresivos para los registros de la cadena C2.

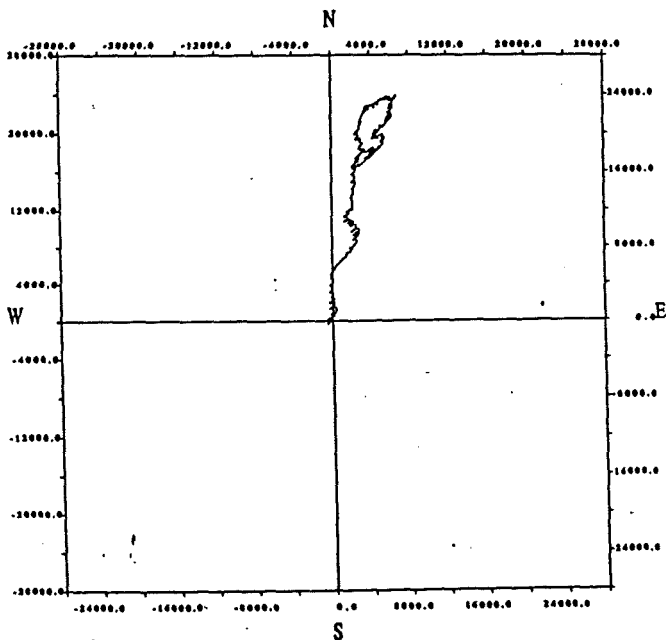
CORRENTIMETRO BRANSFIELD, (C2.1)
 Fichero: 10-12-92 10513 datos
 10-12-92 a 21- 2-93 10513 datos



CORRENTIMETRO BRANSFIELD, 22
 Fichero: 10-12-92 10513 datos
 10-12-92 a 21- 2-93 10513 datos



CORRENTIMETRO BRANSFIELD, 23
 Fichero: 10-12-92 10513 datos
 10-12-92 a 21- 2-93 10513 datos



CORRENTIMETRO BRANSFIELD, 24
 Fichero: 10-12-92 10513 datos
 10-12-92 a 21- 2-93 10513 datos

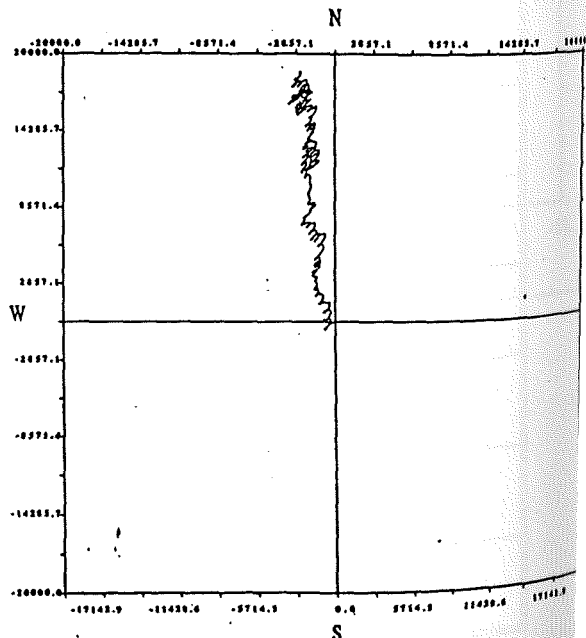
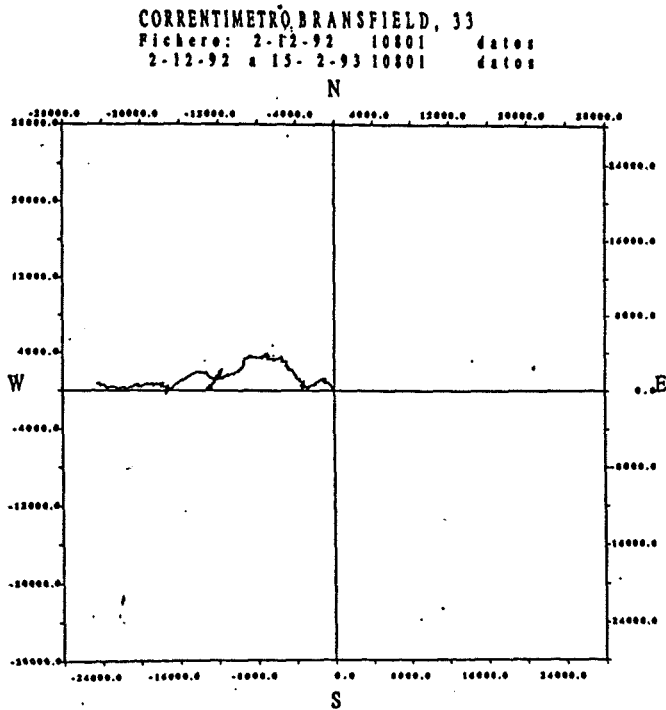
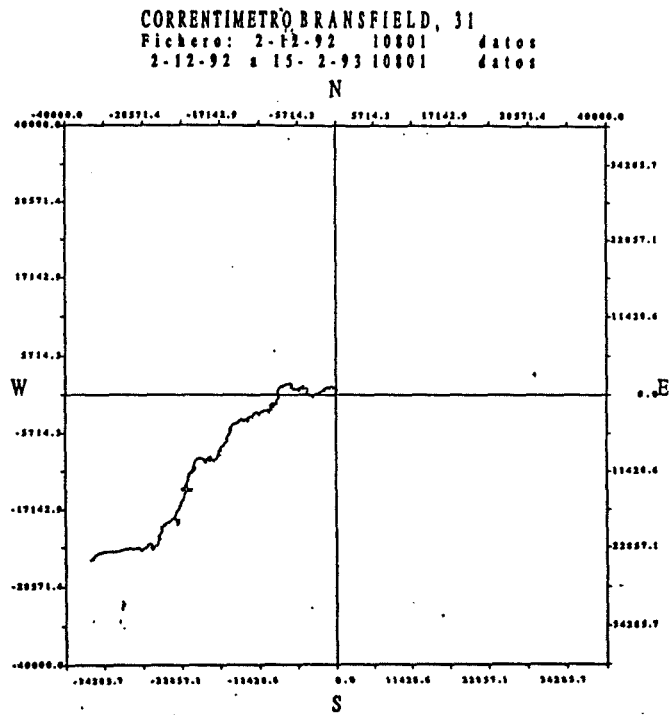


FIGURA 7.6b. Diagrama de vectores progresivos para los registros de la cadena C3.

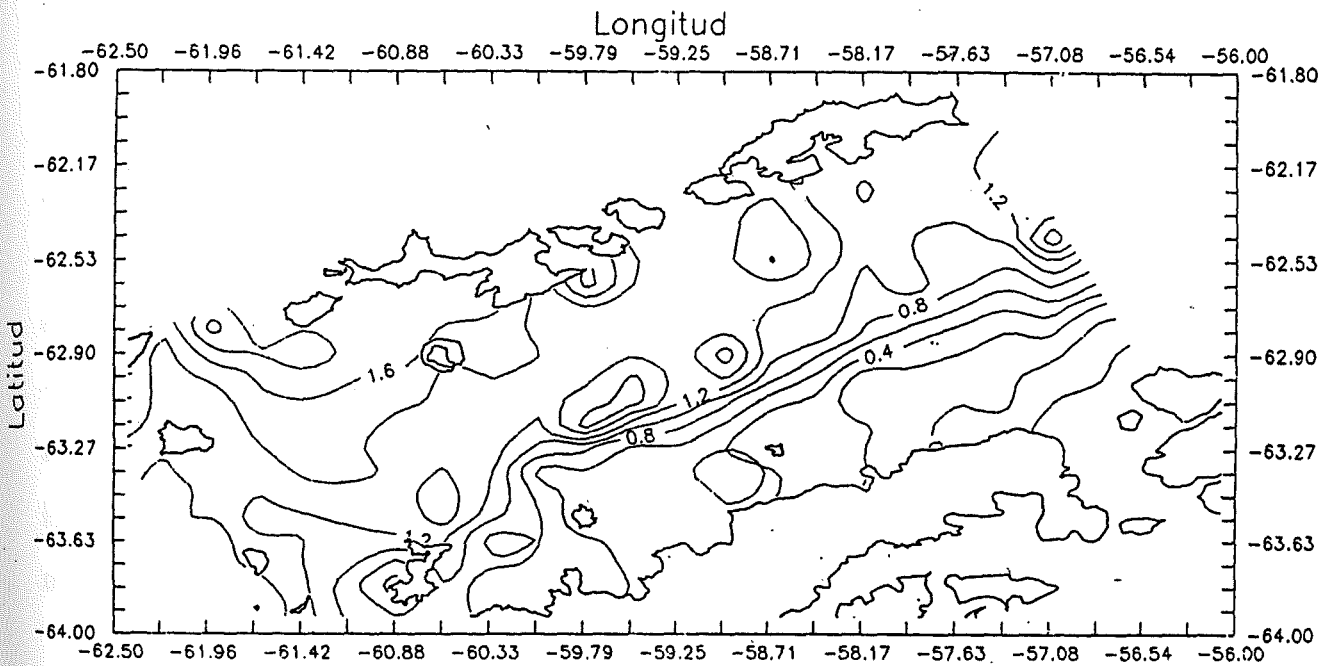


Las direcciones netas calculadas con los datos de la cadena C3 concuerdan con la hipótesis de que la circulación geostrófica sobre la plataforma continental de la Península Antártica se dirige hacia el SW. Por su parte, tanto las direcciones de C2 como las de C3 son compatibles con el supuesto giro horario existente al noroeste de Isla Trinity, sugerido también por los resultados hidrográficos de la campaña BIOANTAR 93 (figura 7.7).

La disponibilidad de un modelo como ECADIS permite evaluar la contribución del viento a la circulación media en el Estrecho de Bransfield durante el verano austral, frente a la aportación del flujo geostrófico. Por otra parte, es posible simular con ayuda del modelo numérico la circulación residual en todo el área de estudio, incluidos los ámbitos de plataforma continental, soslayando las restricciones que impiden la aplicación del método dinámico de cálculo de corrientes a zonas someras.

Aunque es un hecho conocido que en regiones como el Estrecho de Bransfield, donde la corriente de marea es muy significativa, existe una interacción no lineal entre ésta y la corriente residual, que no puede ser objeto de este estudio al ser ECADIS un modelo estacionario.

FIGURA 7.7. Estrecho de Bransfield. Distribución de temperatura a 5 m. Resultados de la campaña BIOANTAR 93. Fuente: García et al., en prensa.



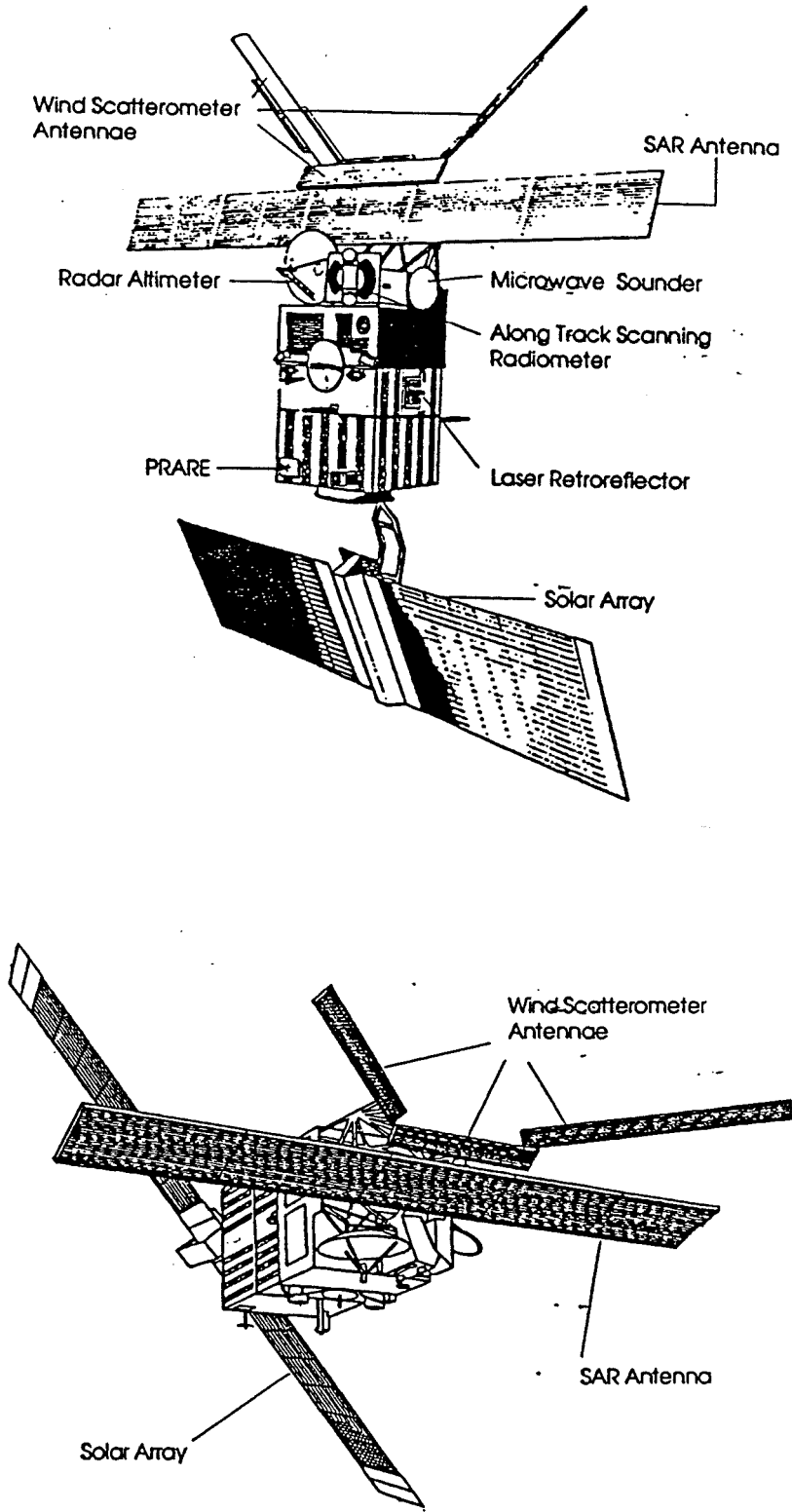
7.1. Caracterización del viento en el Estrecho de Bransfield durante el verano austral

La red de observatorios meteorológicos existentes en el Estrecho de Bransfield es demasiado poco densa para poder definir, a partir de sus registros, los rasgos característicos de las solicitaciones de viento que actúan sobre la región de estudio durante el verano austral. En este contexto, los "productos" WSC.FDC elaborados a partir de los registros del dispersómetro de viento (wind scatterometer) con que está equipado el satélite ERS-1, y que la Agencia Espacial Europea (ESA) distribuye, emergen como la fuente de información más adecuada para el cálculo de las distribuciones de esfuerzos tangenciales asociados a episodios de viento representativos de las condiciones meteorológicas locales. La ESA ha suministrado al Laboratorio de Ingeniería Marítima datos WSC.FDC correspondientes al verano austral 92/93, en el marco del proyecto piloto "Applications of ERS-1 products to Geophysical Research in Antarctica".

El ERS-1 ("First European Remote Sensing Satellite") usa una tecnología muy avanzada de microondas para coleccionar medidas e imágenes independientemente de las condiciones atmosféricas. Para ello cuenta entre su instrumentación con el AMI ("Active Microwave Instrument"), un radar -sensor activo de microondas- que opera a una frecuencia de 5.3 GHz con polarización vertical.

El AMI integra dos sensores, el radar de apertura sintética (SAR) y el dispersómetro de viento (WSC). El WSC consta de tres antenas dispuestas como se muestra en la figura 7.8. Estas iluminan la superficie del mar oblicuamente

FIGURA 7.8. Satélite ERS-1. Disposición de las antenas del AMI.



y reciben una fracción de la energía dispersada por ella. El principal propósito del WSC es obtener información acerca del módulo y dirección de los campos de viento superficiales en el mar a partir de los cambios en la reflectividad radar del agua asociados a las pequeñas ondulaciones de la superficie marina que provoca el viento. Como la energía en estas ondulaciones se incrementa con la intensidad del viento, también aumenta con él la dispersión medida en el WSC.

El principio de medida del WSC esta basado en la dependencia de la sección radar normalizada (σ_0) respecto de la rugosidad de la superficie del océano, que a su vez es función de la intensidad del viento. Por otro lado, σ_0 presenta anisotropía con respecto al ángulo formado por el vector viento y la dirección de la antena del radar que recibe la señal, lo que hace que si medimos σ_0 en una misma área desde varias direcciones distintas se pueda determinar el campo de vientos superficiales en términos tanto de intensidad como de dirección (ver figura 7.10).

La conversión de los valores de la sección radar normalizada en vectores viento se consigue asumiendo un modelo matemático que define la relación entre σ_0 , intensidad del viento, dirección del viento, ángulo de incidencia del pulso dispersado y la polarización de la señal (figura 7.9).

La complejidad y versatilidad de los instrumentos del ERS-1 permiten la generación de una amplia variedad de productos. Entre ellos están los productos FDC ("Fast Delivery"), que pueden ser generados y distribuidos por las estaciones de tierra de la Agencia Espacial Europea apenas tres horas después

FIGURA 7.9. Modelo matemático que define la relación entre la dirección del viento, velocidad del viento y la sección radar normalizada.

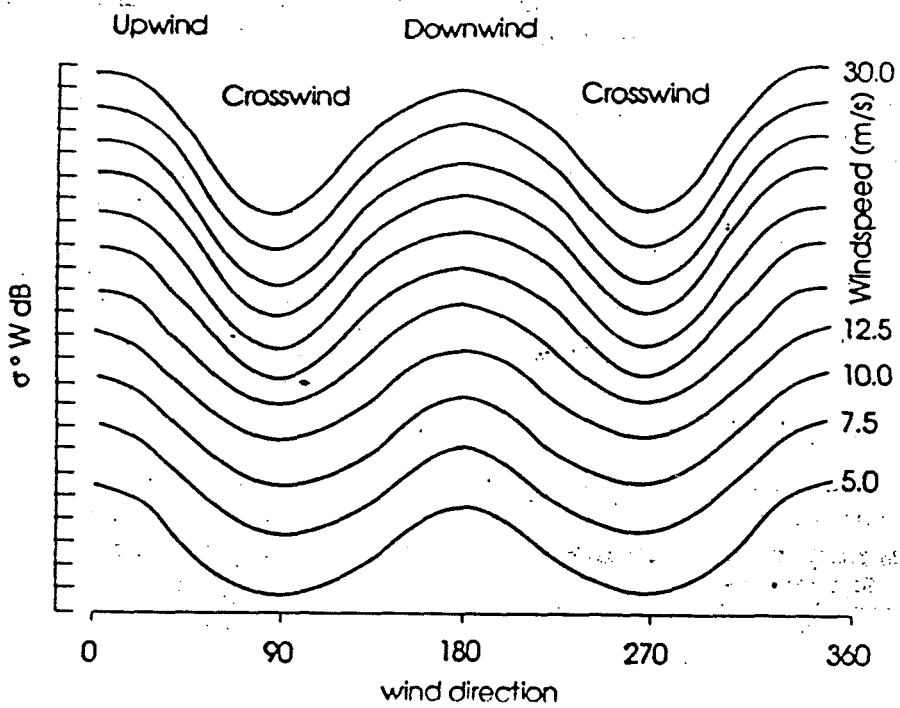
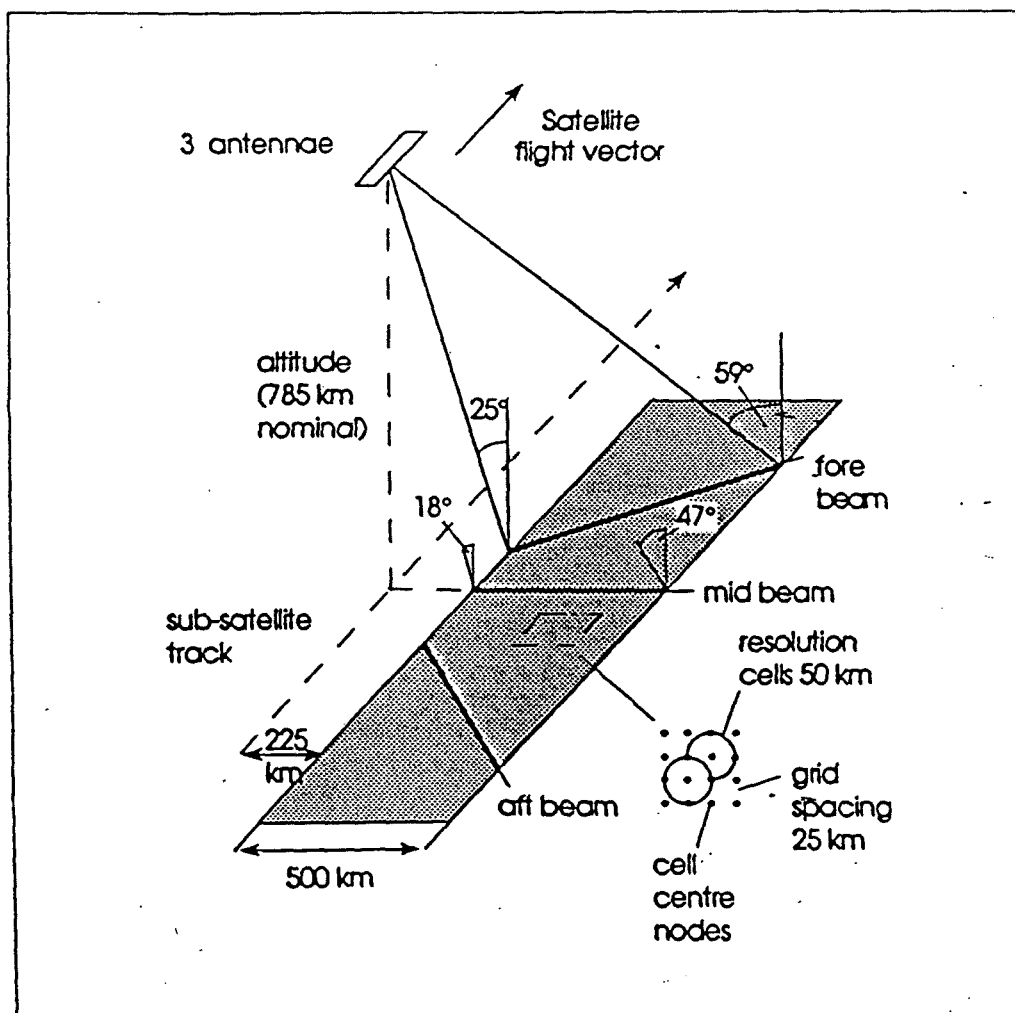


FIGURA 7.10. Geometría de funcionamiento del "Wind Scatterometer"

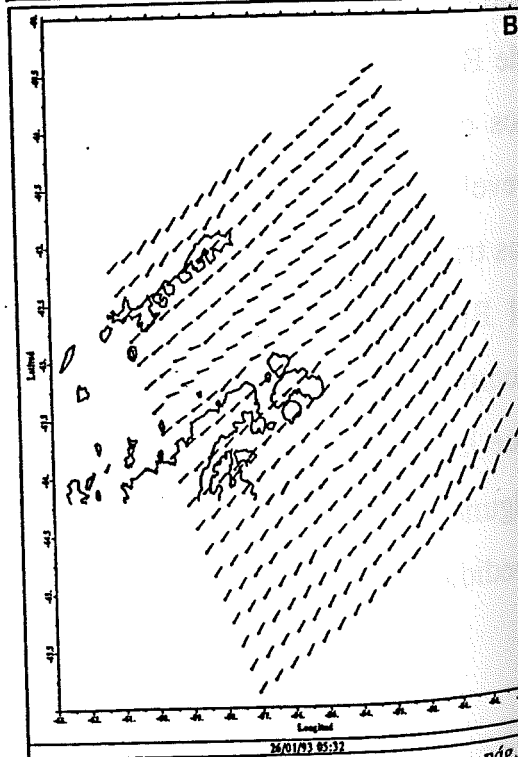
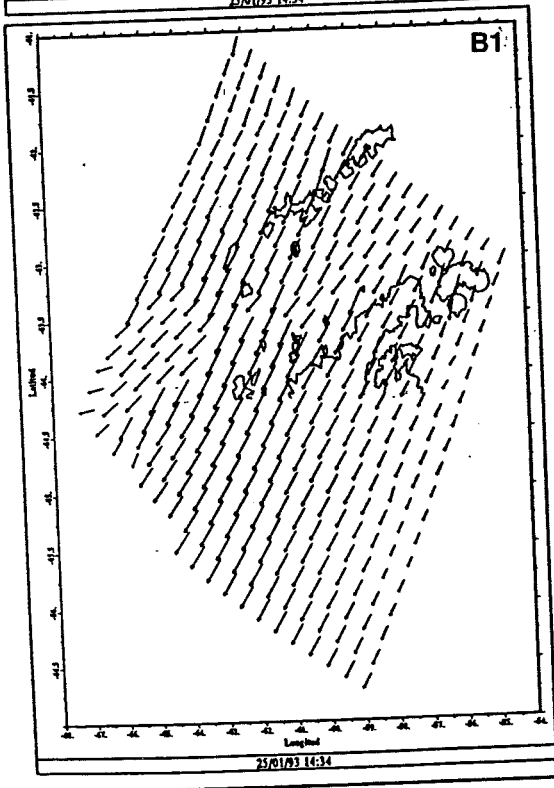
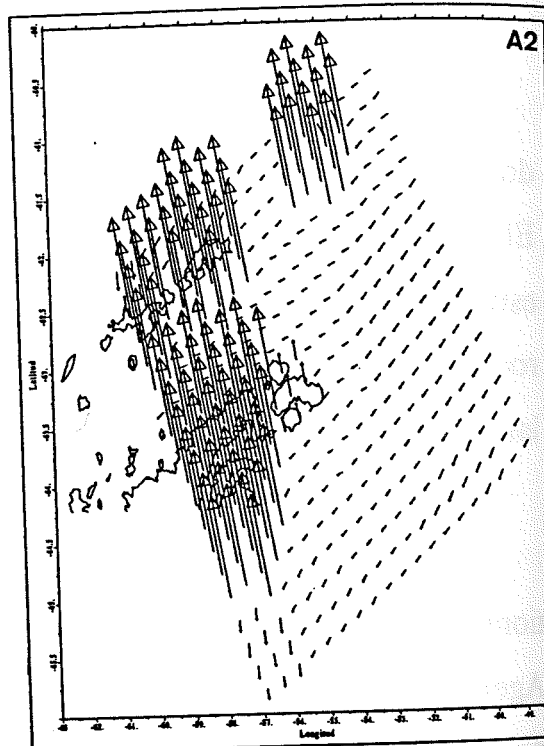
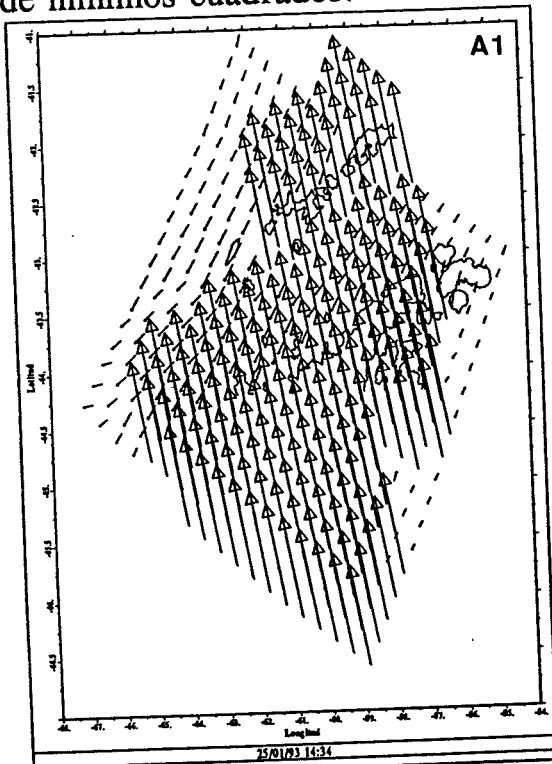


de que el satélite haya efectuado la observación. En concreto, los datos WSC.FDC dan una estima de la intensidad y dirección del viento. Para ello, los datos brutos registrados por el satélite se transforman en medidas de σ_0 , y estas a su vez se convierten en las estimas de los vectores velocidad de viento.

Los productos WSC.FDC cubren un área de $500 \times 500 \text{ km}^2$ proporcionando velocidades y direcciones de viento para una malla regular de 19×19 nodos. El algoritmo que se utiliza para la transformación de los datos utiliza tres estimas por celda (= espacio rectangular formado por 8 nodos de la malla que rodean a un noveno nodo, ver figura 7.10), para así facilitar la corrección de las ambigüedades en la dirección.

De acuerdo con las peticiones incluidas en el proyecto piloto "Applications of ERS-1 products to Geophysical Research in Antarctica (PP2-E1)", la Agencia Espacial Europea facilitó al LIM los productos WSC.FDC correspondientes a un área que engloba las cuencas occidentales y central del Estrecho de Bransfield y al periodo Diciembre de 1992 - Abril de 1993. El análisis de los campos de viento superficial correspondientes al Estrecho de Bransfield, reveló que los datos del dispersómetro estaban contaminados por el efecto de las transiciones mar-tierra y tierra-mar, propia de un mar semicerrado como es el Bransfield (ver e.g. figura 7.11a). Por otro lado, también se observó, comparando los datos WSC con estimas geostróficas de los campos de viento, que las ambigüedades en la dirección no habían podido ser bien corregidas en algunos nodos, algo común para este tipo de datos cuando no se dispone de medidas in situ para compararlos (Wurtele et al., 1982 y Brown et al., 1982).

FIGURA 7.11. Estrecho de Bransfield. Campos de vientos medidos a través del "Wind Scatterometer" del ERS-1. a) Sin eliminar los códigos de error. b) Corregidas las ambigüedades para la dirección e interpolando según un método de mínimos cuadrados.



Por esta razón, se estableció un método simple de corrección para los dos problemas anteriores (García et al., 1993). En primer lugar, se eliminaron los vectores de viento que eran erróneos de acuerdo con los códigos de error incluidos en los archivos de datos proporcionados por la ESA. En una segunda etapa, los campos filtrados se compararon con estimas geostróficas proveniente de los análisis meteorológicos de superficie locales para ese mismo día, y se invirtieron las direcciones del viento donde correspondía. Finalmente, se interpoló un campo de viento sobre los nodos de la malla utilizando un método de mínimos cuadrados (ver e.g. figura 7.11b).

De los campos de viento evaluables a partir de los productos WSC.FDC correspondientes al verano austral 92-93, se han seleccionado 21. 6 son del viento del N, 3 del NE, 1 del E, 1 del S, 4 del SW, 2 del W y 4 del NW. El resto de campos ha sido desechado porque el número de datos con código de error en los archivos WSC.FDC era lo suficientemente elevado para que el método de interpolación por mínimos cuadrados fuera de dudosa eficacia.

El resultado del filtrado, corrección de las posibles ambigüedades en la dirección e interpolado posterior sobre una malla computacional de 431 nodos de las 21 series seleccionadas se pueden ver en las figuras 7.12 a 7.15. Promediando vectorialmente estos campos se ha calculado una "distribución climatológica a corto plazo" correspondiente al verano austral 92/93, que se muestra en la figura 7.16.

Las estadísticas de los datos de viento registrados para los observatorios del área de las Shetland del Sur (ver figuras 7.17, 7.18 y 7.19) vienen a confirmar que las 21 distribuciones de vientos seleccionadas son representativas

FIGURA 7.12. Estrecho de Bransfield. Distribuciones de viento seleccionadas.

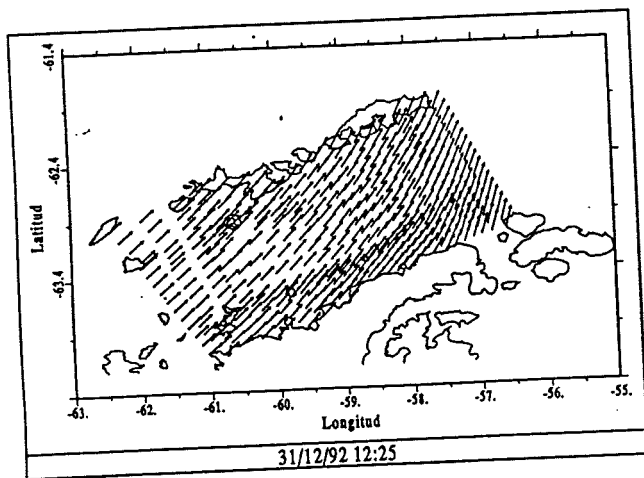
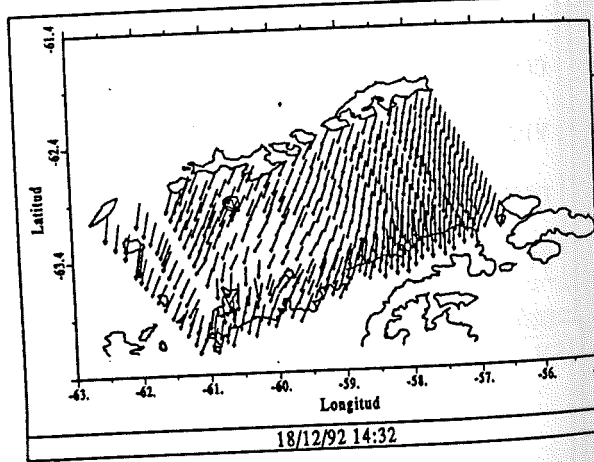
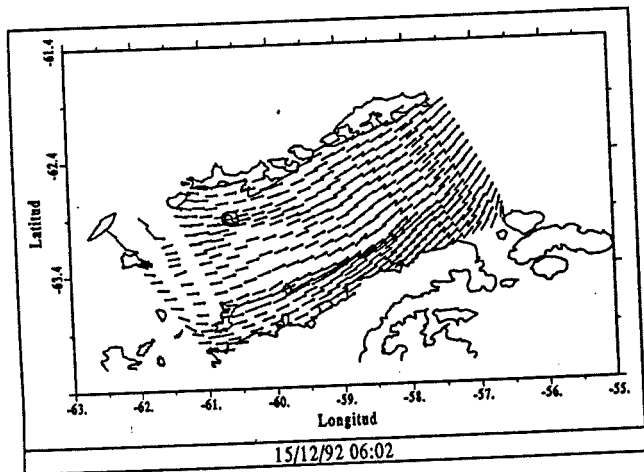
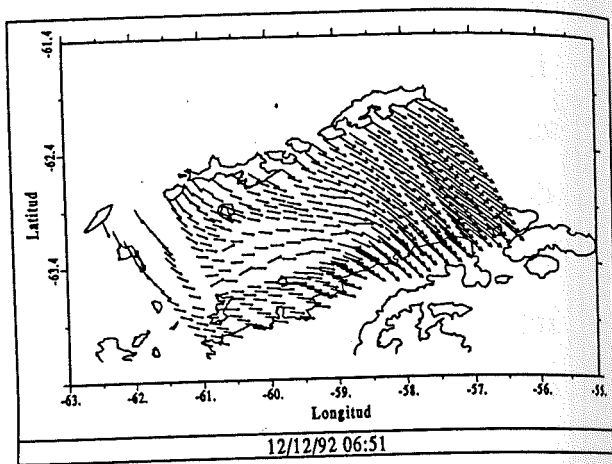
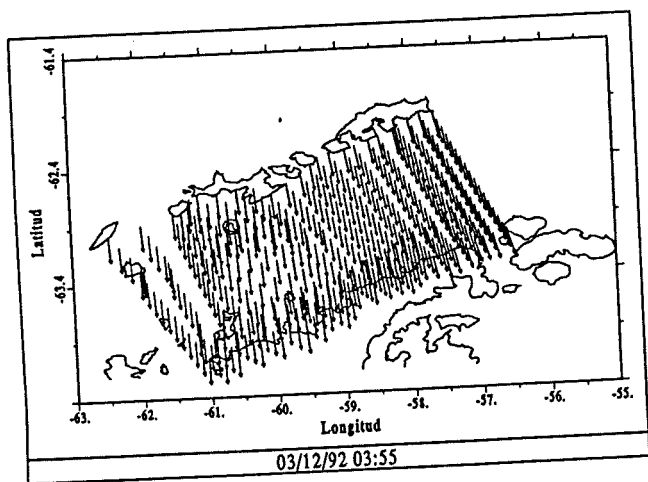


FIGURA 7.13. Estrecho de Bransfield. Distribuciones de viento seleccionadas.

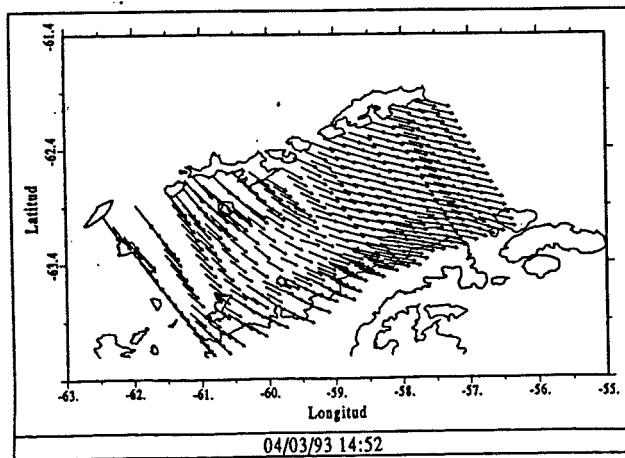
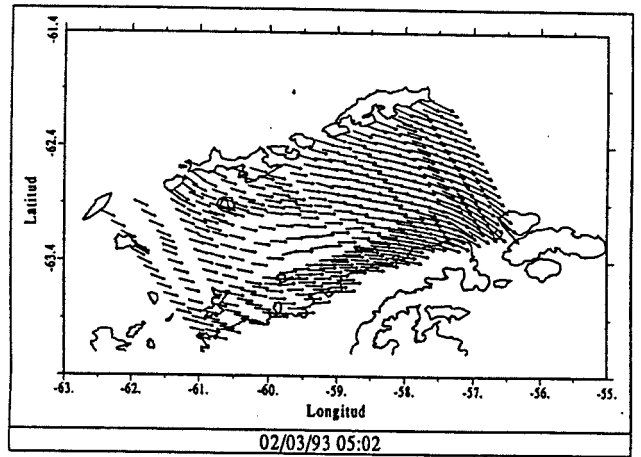
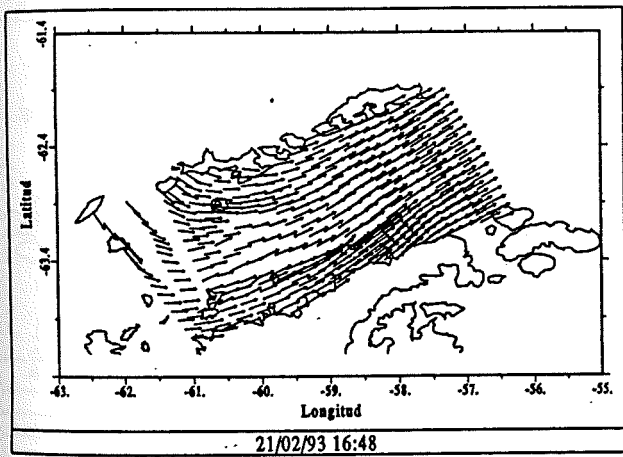
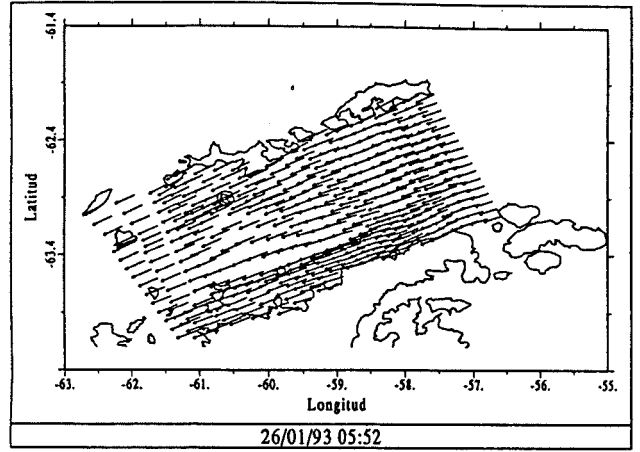
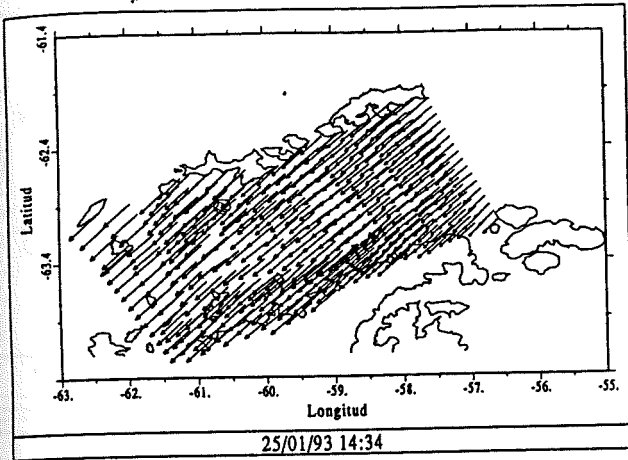


FIGURA 7.14. Estrecho de Bransfield. Distribuciones de viento seleccionadas.

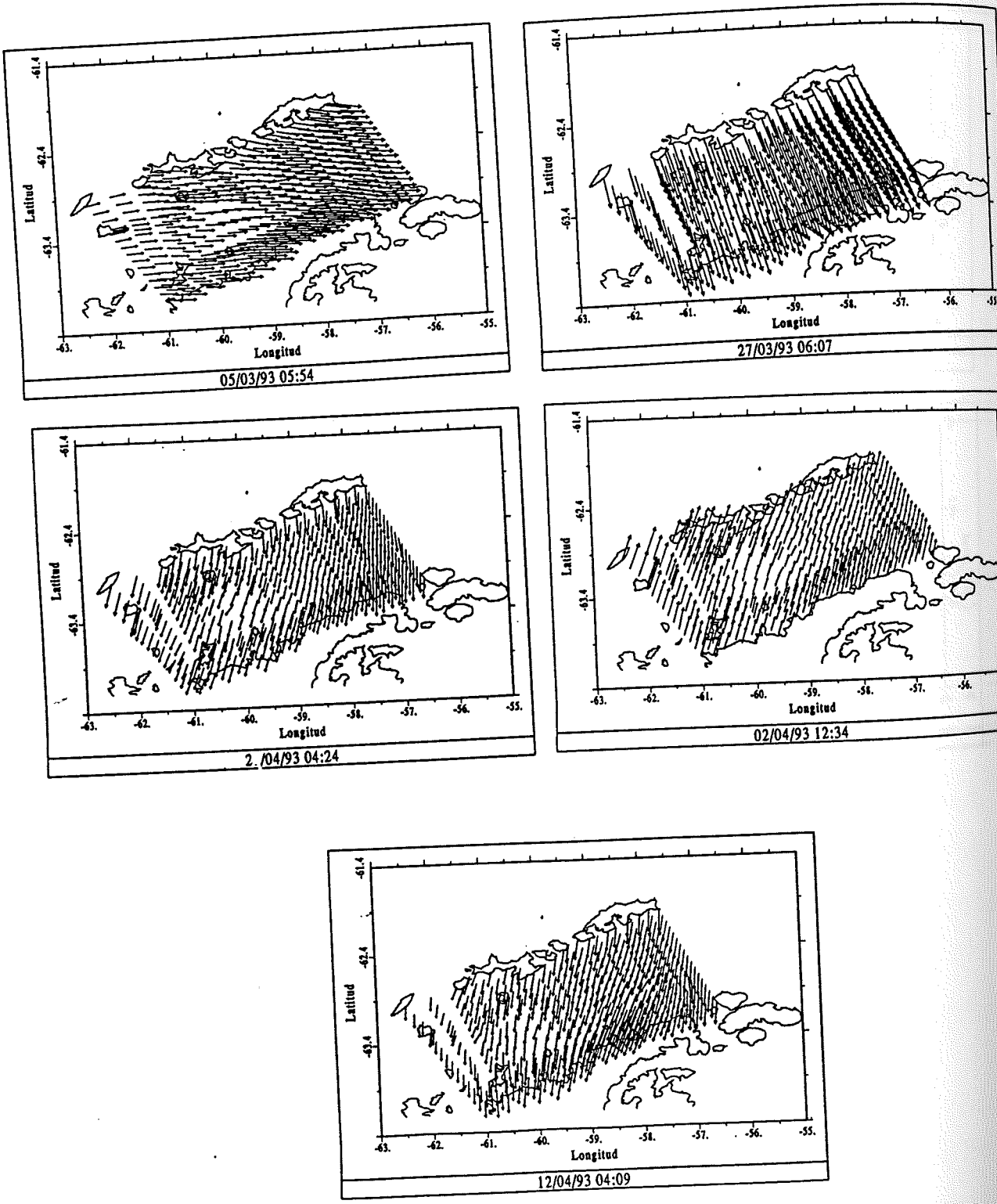


FIGURA 7.15. Estrecho de Bransfield. Distribuciones de viento seleccionadas.

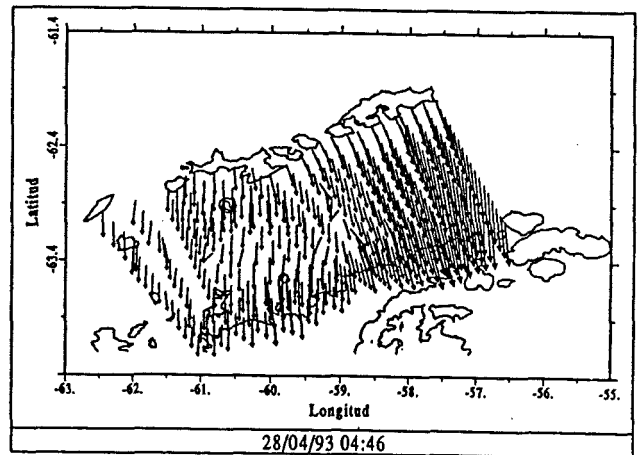
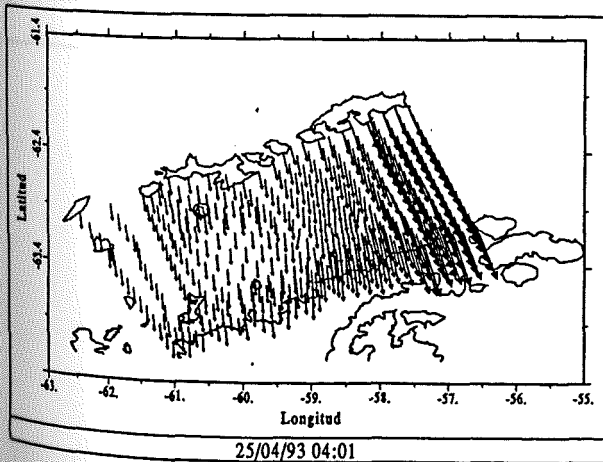
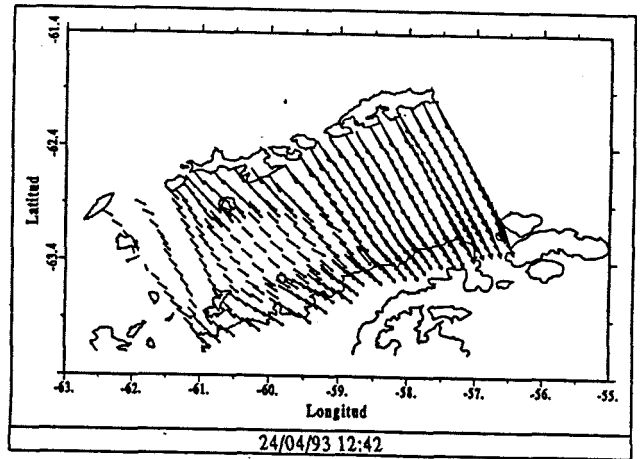
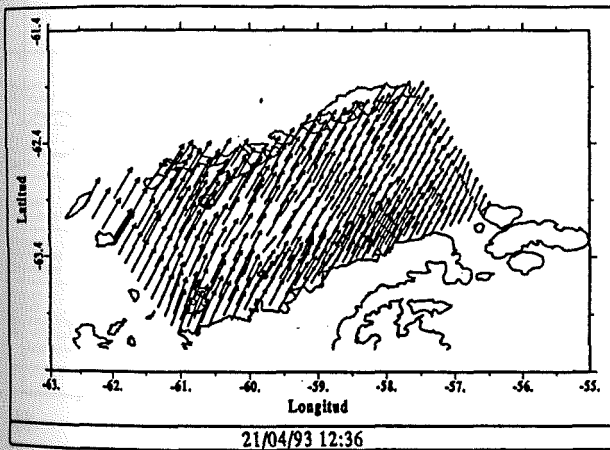
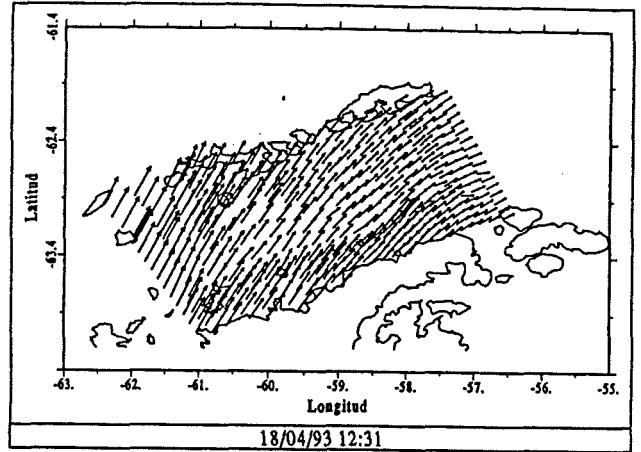
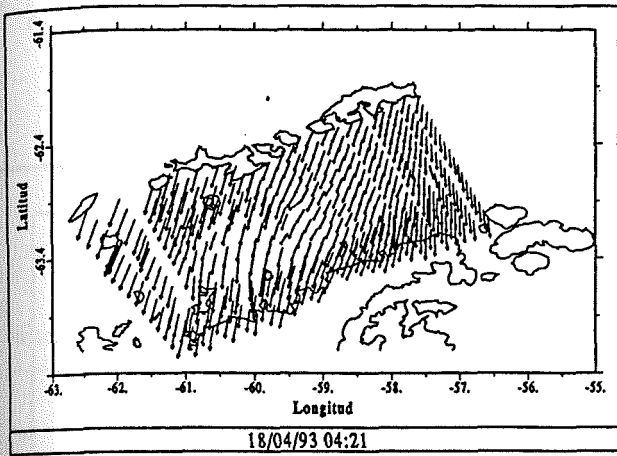


FIGURA 7.16. Estrecho de Bransfield. "Viento climatológico a corto plazo" correspondiente al verano austral 92/93.

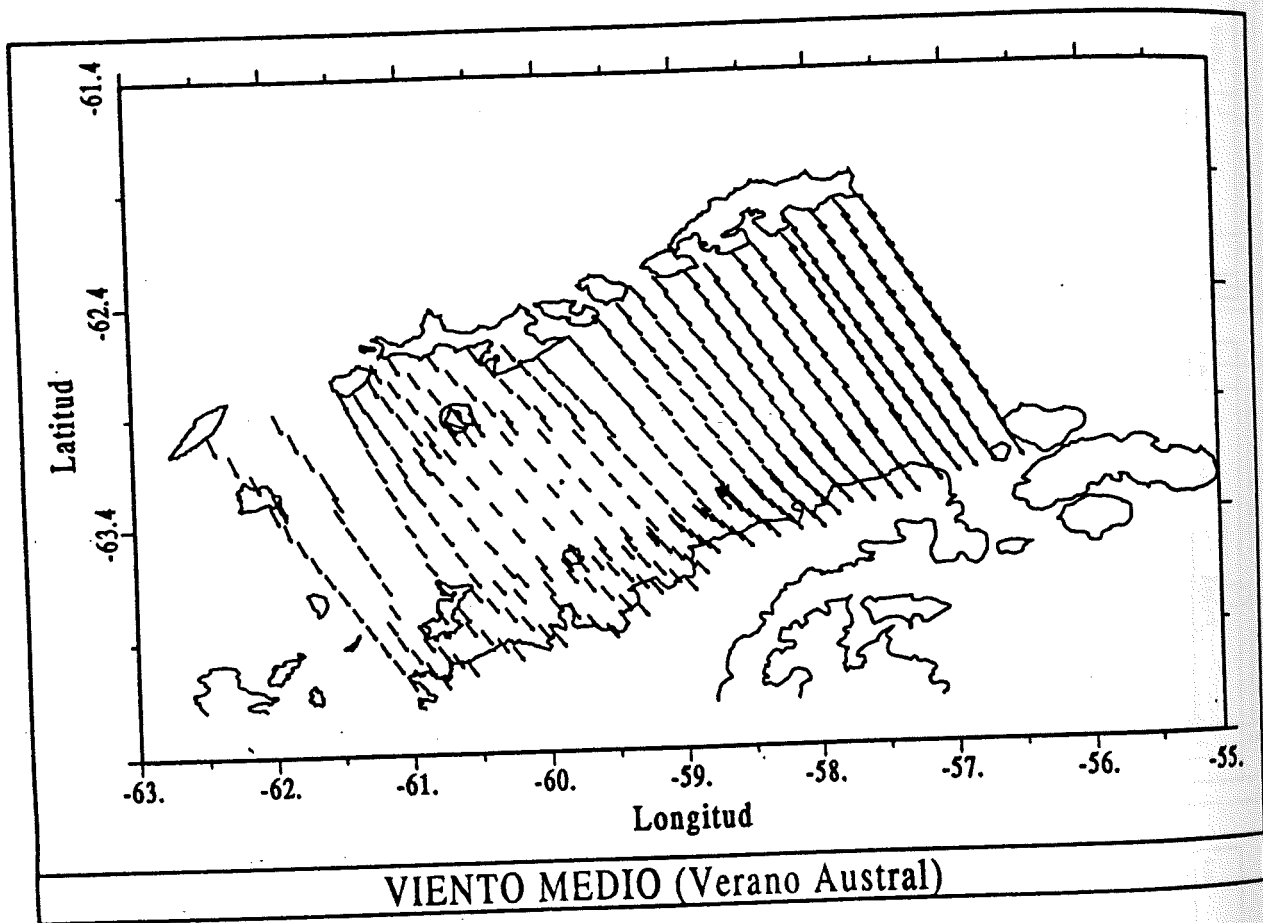
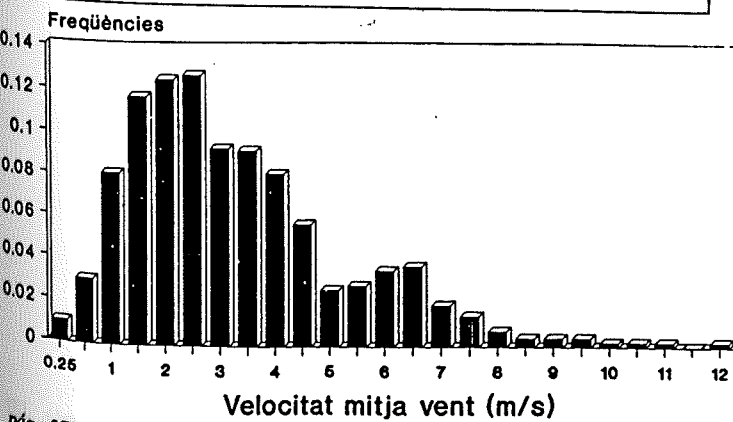
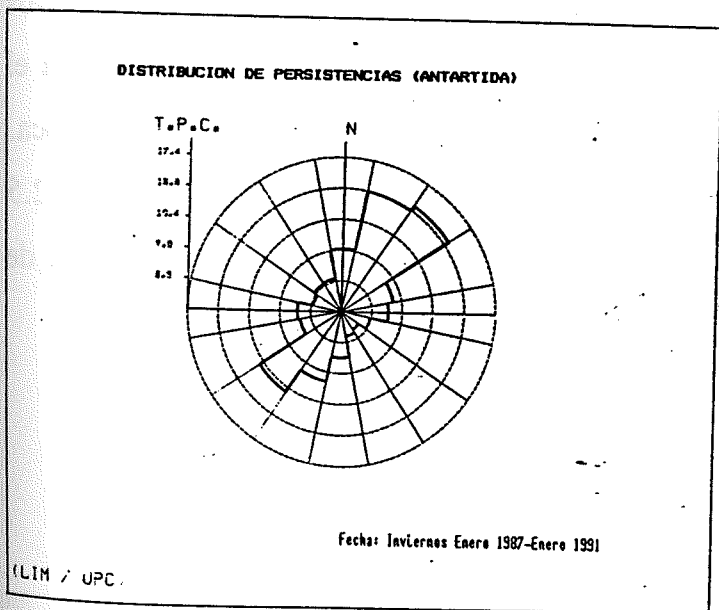
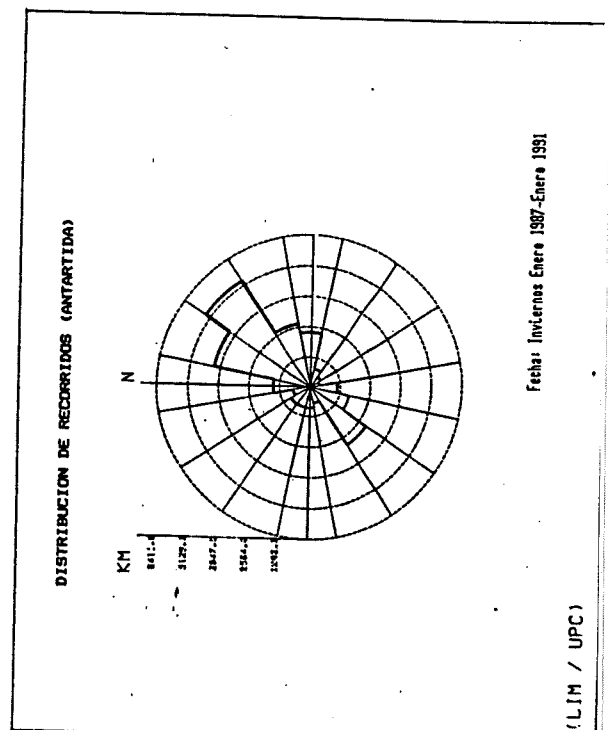
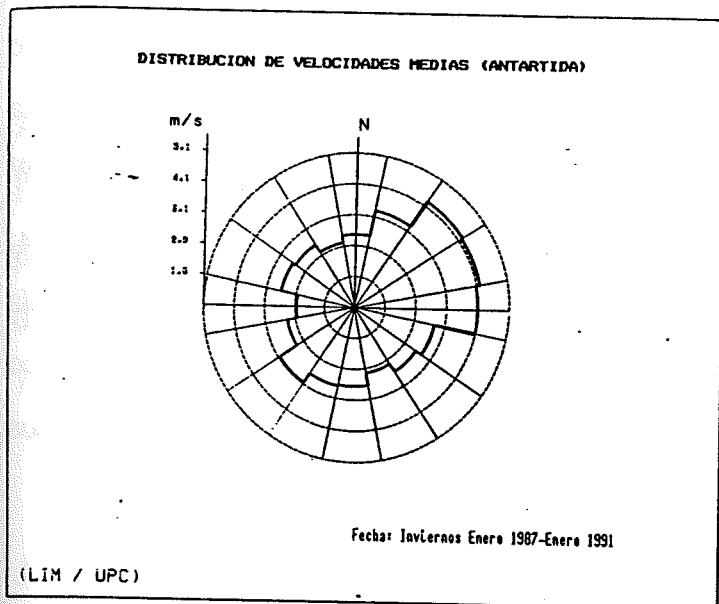


FIGURA 7.19. Distribución de velocidades medias, recorridos y persistencias para el viento de Bahía Sur, Isla Livingston. Fuente: Espino et al. (1991)



para esa estación en el Estrecho de Bransfield. Por una lado, si comparamos las frecuencias de representación, son muy parecidas en nuestro caso con las publicadas para Admiralty Bay (isla King George) e isla Decepción, aunque no es así para Bahía Sur (isla Livingston), lo cual es lógico si se conoce la acusada influencia de la orografía local que hace que la influencia de los vientos del NW sea muy escasa (Espino et al., 1991). Para las velocidades medias, por contra, tenemos mejores acuerdos con los datos meteorológicos registrados en Bahía Sur entre 1987 y 1993 que con los publicados por el Instituto Hidrográfico Británico para Admiralty Bay y Decepción, a los cuales siempre consideramos demasiado altos.

Pudiendo considerar los 21 campos seleccionados como representativos de las condiciones del verano austral, pueden ser buenos candidatos para el cálculo de un "viento climatológico a corto plazo" correspondiente a esta época. El resultado es un campo de vientos del NNW con velocidades medias de 2.5 m/s, lo que es congruente con las distribuciones estivales de frecuencia de presentación y velocidad media del viento local.

7.2. Diseño de pases del modelo ECADIS

Consideramos un área de estudio limitada al sur por la Península Antártica, al norte por las islas Shetland del Sur y al este y oeste por las líneas imaginarias que unen la isla de d'Urville con King George y isla Smith pasando por isla Low con la Península Antártica, respectivamente (figura 7.20). Este dominio se discretiza en 384 elementos y 431 nodos como muestra la figura 7.21.

Para analizar el efecto del viento local sobre la circulación hemos diseñado cinco pases del modelo ECADIS con "inputs" diferenciados:

- Caso 1: sin viento

- Caso 2: con viento del NW (distribución del 05.03.93 06:07 h, ver figura 7.22)

- Caso 3: con viento del NE (distribución del 25.01.93 14:34 h, ver figura 7.23)

- Caso 4: con viento del SW (distribución del 02.04.93 12:34 h, ver figura 7.24)

- Caso 5: con la "distribución climatológica a corto plazo" de la figura 7.25

FIGURA 7.20. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Batimetría.
Unidades en m.

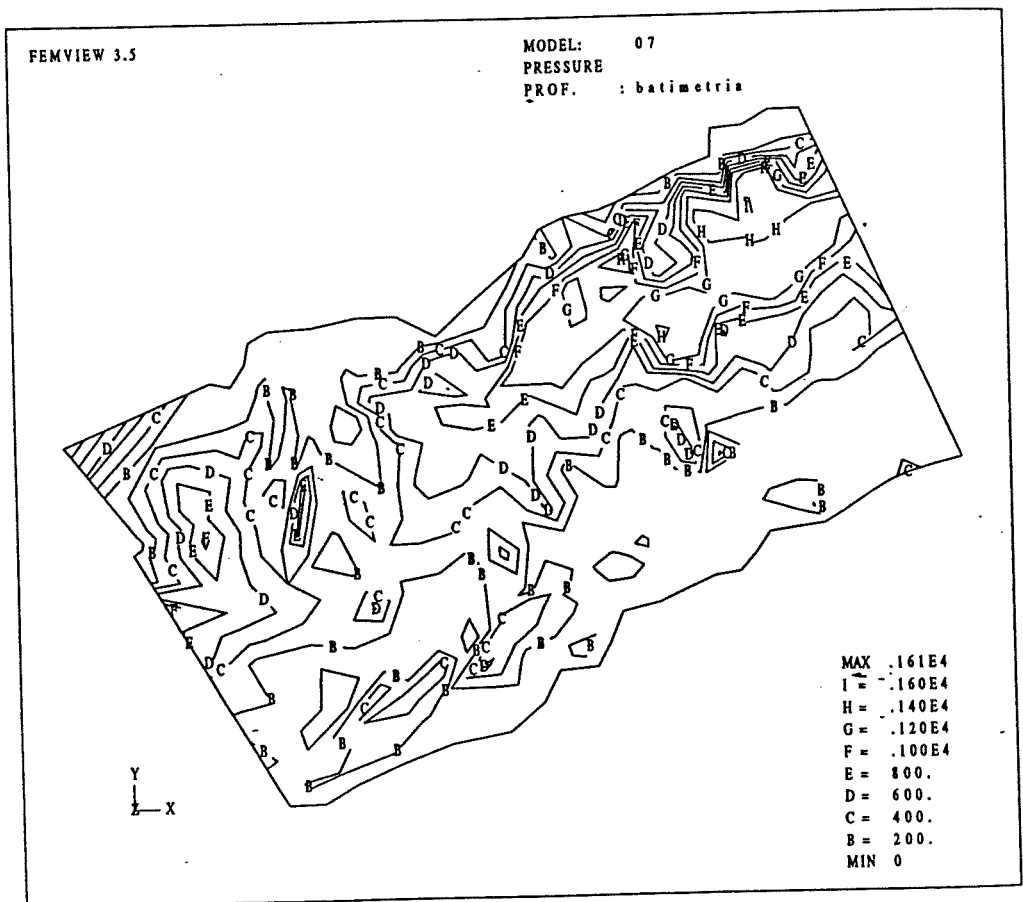


FIGURA 7.21. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Malla computacional empleada.

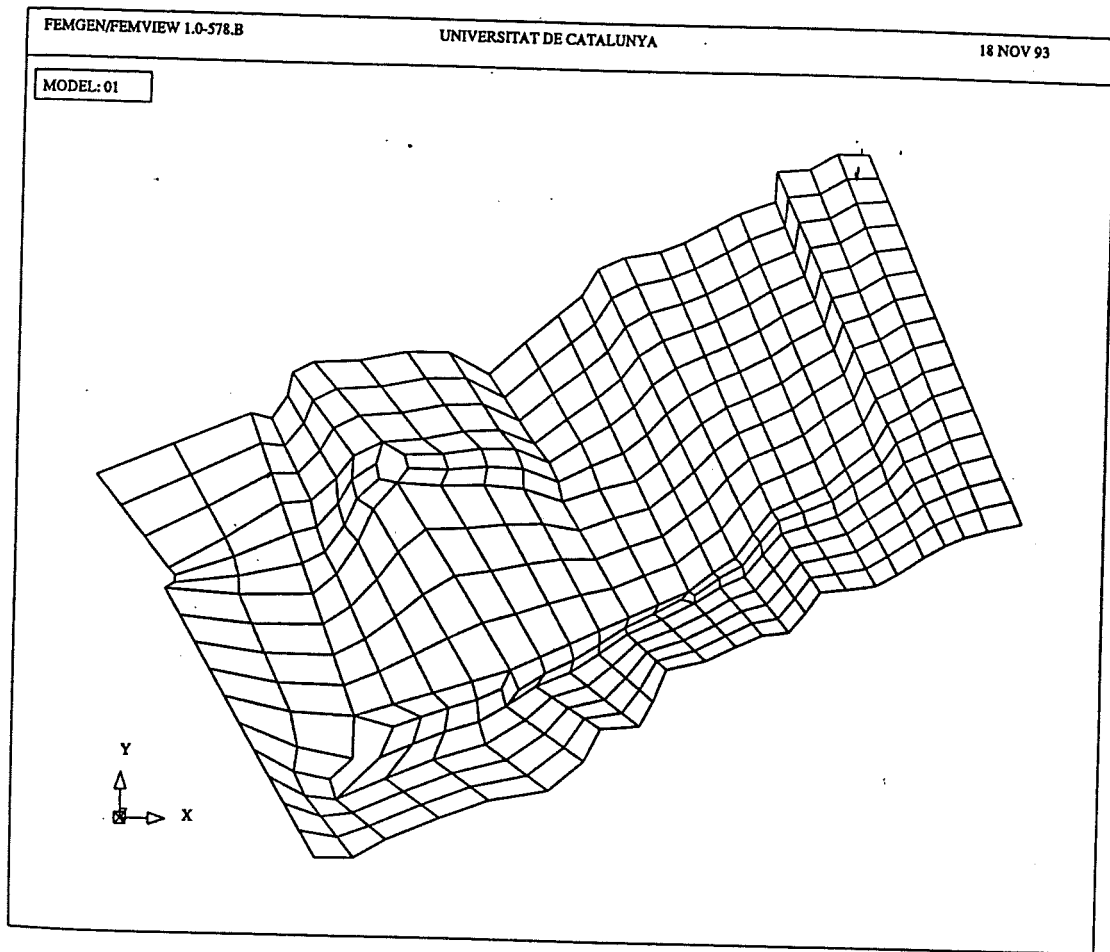


FIGURA 7.22. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Campo de tensiones superficiales para un episodio de viento del NW (05/03/93 06:07). Unidades Nw/m^2 .

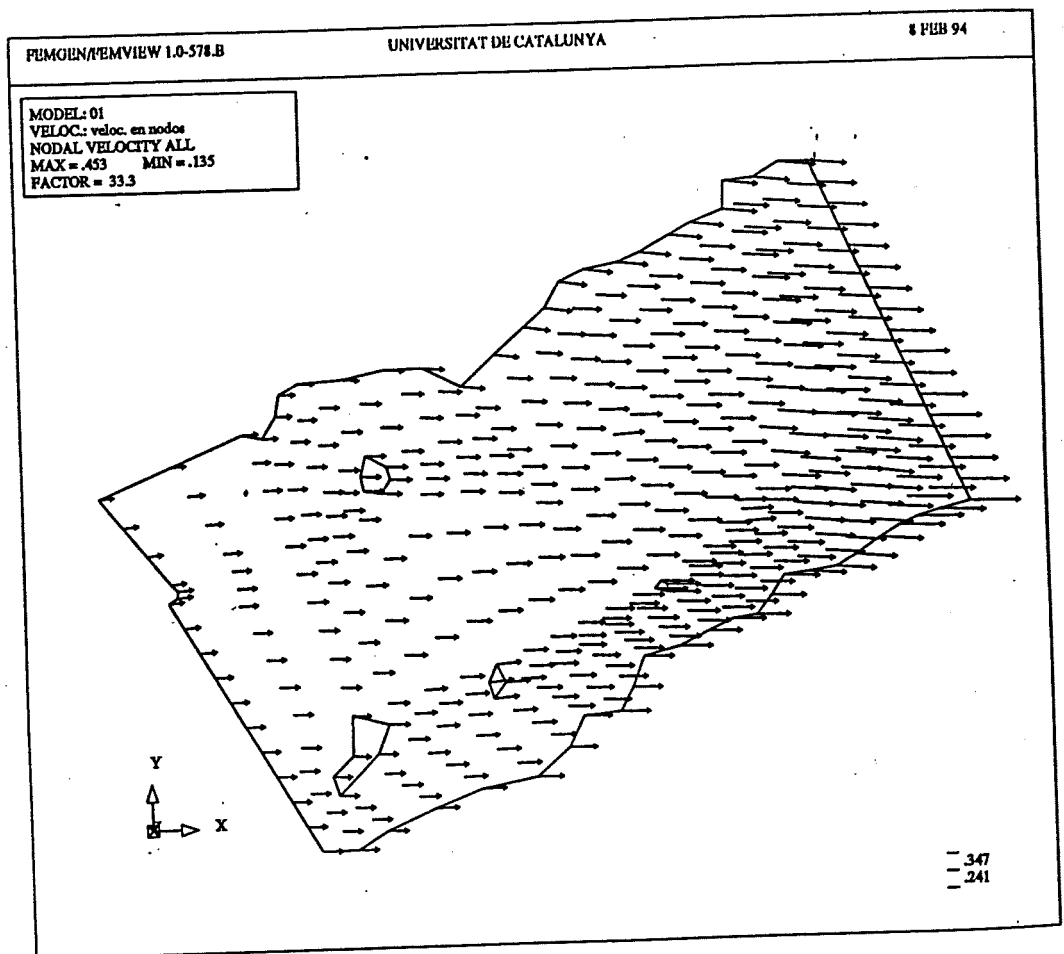


FIGURA 7.23. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Campo de tensiones superficiales para un episodio de viento del NE (25/01/93 14:34). Unidades Nw/m^2 .

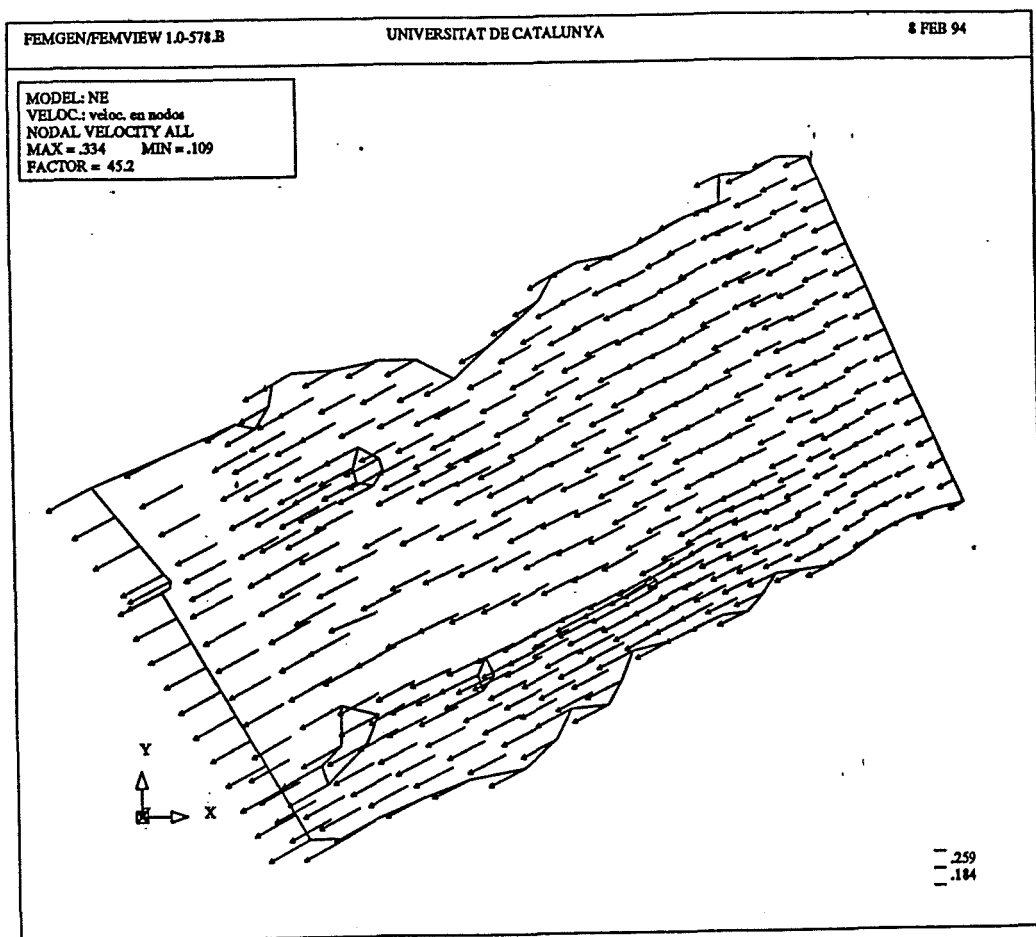


FIGURA 7.24. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Campo de tensiones superficiales para un episodio de viento del SW (02/04/93 12:34). Unidades Nw/m^2 .

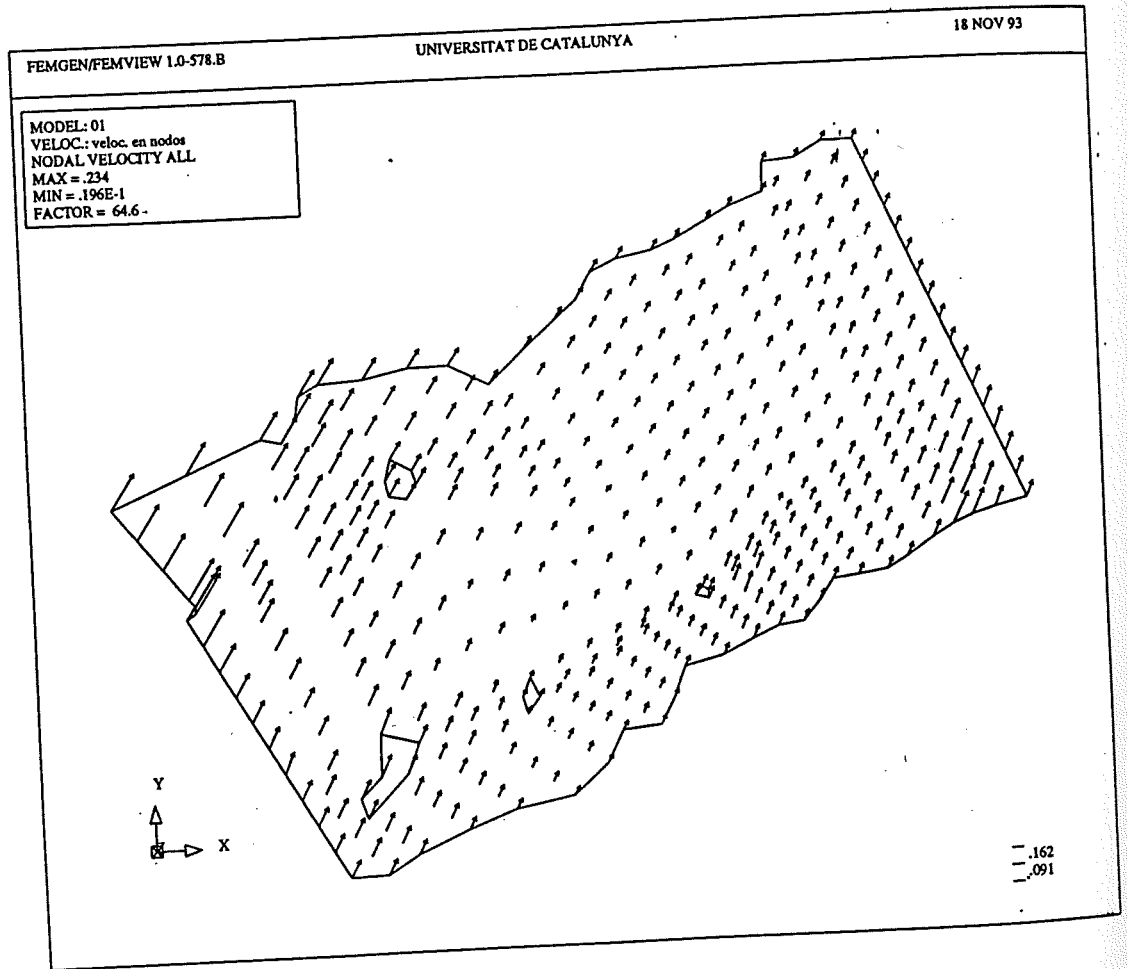
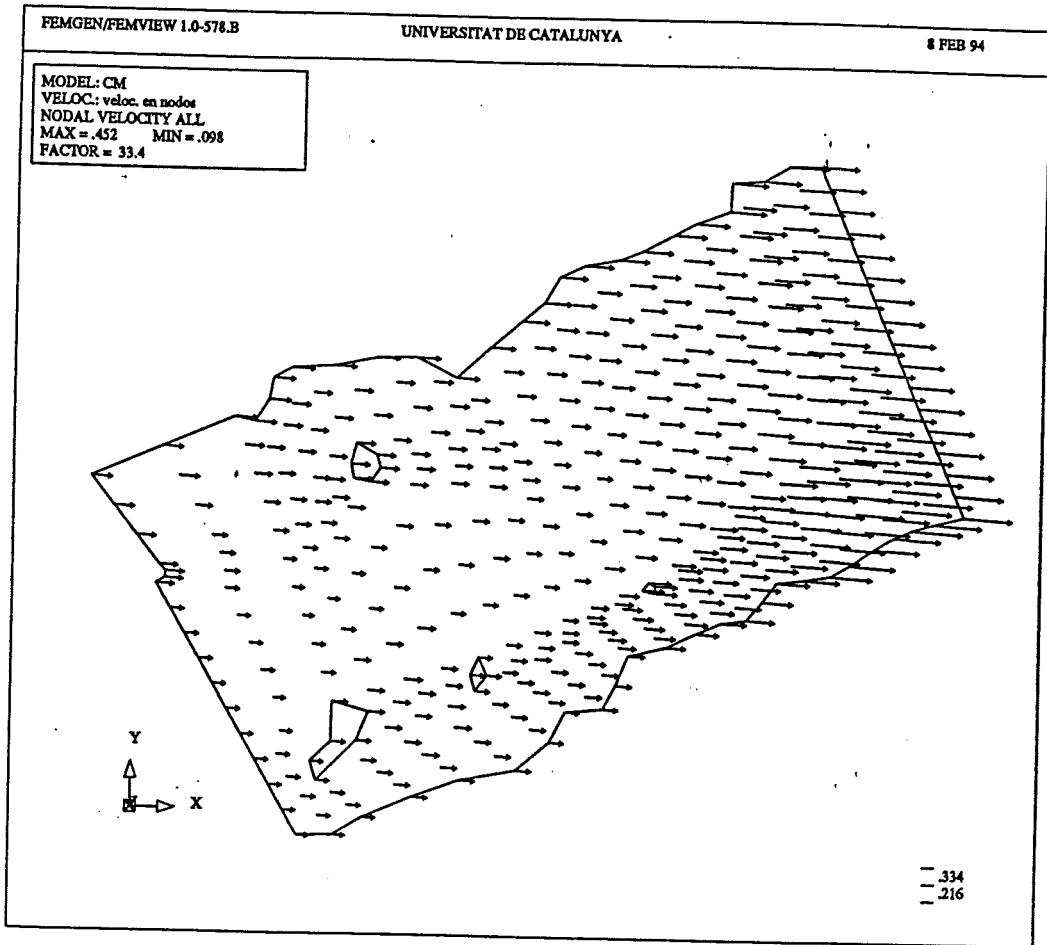


FIGURA 7.25. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Campo de tensiones superficiales para la "distribución climatológica a corto plazo". Unidades Nw/m^2 .



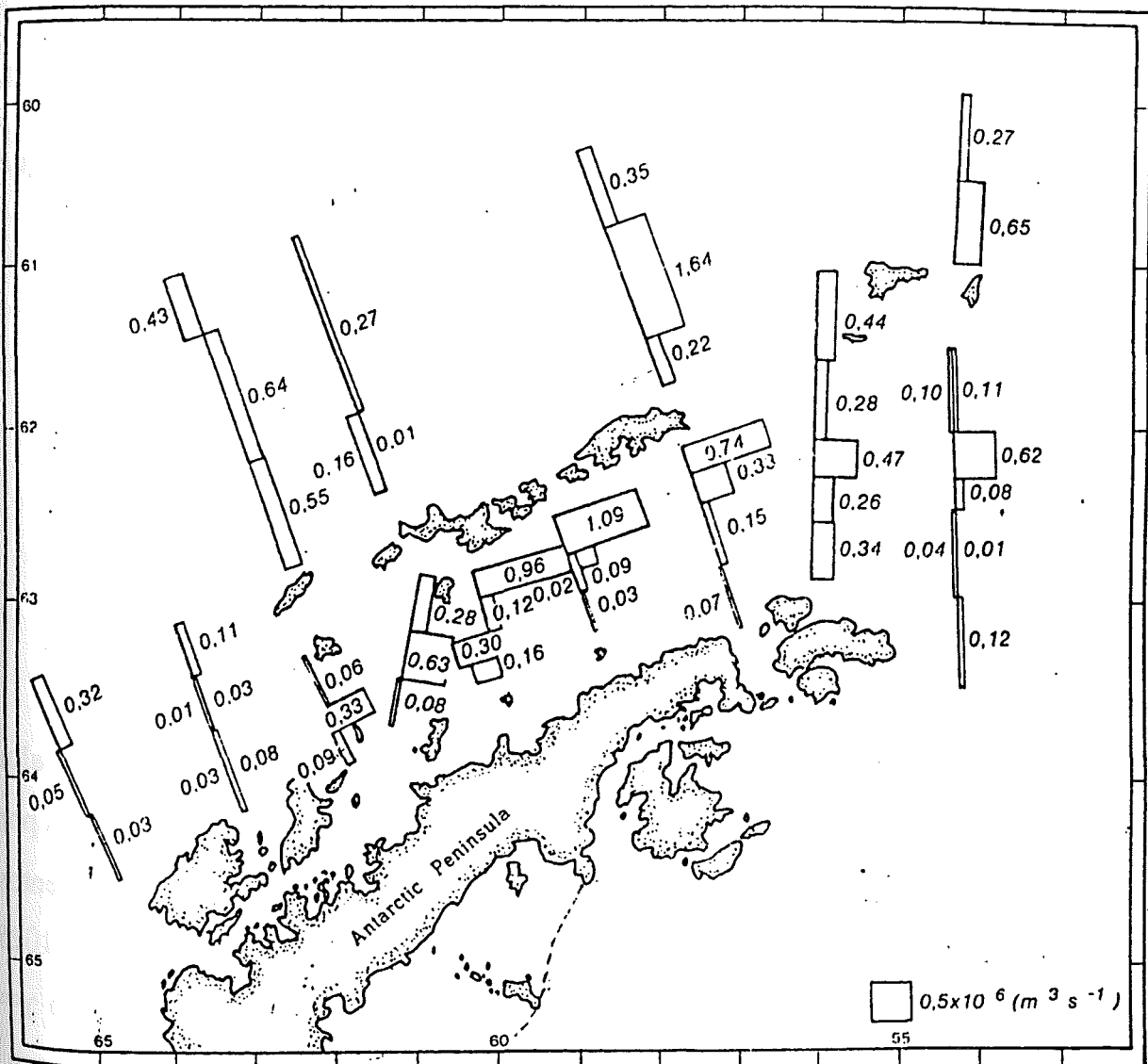
En todos los casos se supone densidad homogénea y 2 grados de libertad verticales, puesto que la información disponible acerca de la variación vertical de las variables de campo es limitada. Las tensiones de viento se evalúan empleando la formulación (6.2), a partir de los datos de la intensidad y dirección.

Para la elección de las condiciones de contorno se ha tenido en cuenta el cálculo de caudales en la capa de 0 a 500 db realizada para el área del Bransfield por Grelowski et al. (1986) a partir del cálculo geostrófico ya mencionado (figura 7.26).

Las condiciones correspondientes al contorno costero son de tipo Dirichlet homogéneas para los dos grados de libertad considerados. Para los contornos de mar abierto, cuando se busca conocer el efecto del viento independientemente de la circulación geostrófica (lo que no deja de ser, en el fondo, un ejercicio académico), las condiciones de contorno que se aplican son de tipo Neumann homogéneas para los dos grados de libertad verticales. Para resolver conjuntamente el flujo geostrófico y la circulación inducida por el viento, se aplican las siguientes condiciones de contorno:

- Para el primer grado de libertad vertical ($IDOFV=1$), asociado a la velocidad media de la columna de agua se han estudiado dos casos: imponer tanto en los contorno Este como Oeste un campo de velocidades acorde con el esquema de caudales propuesto por Grelowski et al. (1986), o sólo imponer ese mismo campo de velocidades en el contorno Oeste y en el contorno Este condiciones Neumann homogéneas (=

FIGURA 7.26. Estrecho de Bransfield. Transporte de masas de agua ($10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) en la capa de 0 a 500 db. Fuente: Grelowski et al. (1986).



imponer condiciones de contorno aguas arriba). En ambos casos en los nodos de los contornos norte y sur que no son contorno sólido se escogen condiciones de contorno Dirichlet homogéneas.

- Para el segundo grado de libertad vertical (IDOFV=2) se adoptan condiciones Neumann homogéneas.

Los parámetros adimensionales y los coeficientes libres del modelo que se han elegido son los siguientes:

$$L=10000 \text{ m}$$

$$U=0.1 \text{ m/s.}$$

$$A_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$A_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$g=9.8 \text{ m/s}^2$$

$$f=-0.0001 \text{ s}^{-1}$$

Se suponen unos coeficientes de viscosidad turbulenta constantes, de valor $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$, $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ (ambos dentro de los valores recomendados por la bibliografía y que nos permiten asegurar que los términos turbulentos predominan sobre los advectivos), así como una densidad homogénea $\rho=1025 \text{ kg/cm}^3$. El valor del coeficiente de fricción con el fondo se escoge como $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$.

Los pases se realizan con un parámetro de penalización $\lambda=10^{-4}$, valor con el que conseguimos no malcondicionar el sistema de ecuaciones y a la vez

imponer la condición de incompresibilidad de forma adecuada. En cuanto al criterio de convergencia, se adopta un radio $\epsilon=0.01$ m/s.

7.3. Resultados

Caso 1

En el caso de que no consideremos ningún tipo de esfuerzo debido al viento sobre la superficie libre e imponamos condiciones de contorno Dirichlet en los dos contornos de mar abierto transversales al eje del estrecho compatibles con el esquema de caudales publicado por Grelowski et al. (1986), se observa para la solución del campo medio de velocidades (figura 7.27) la existencia de una corriente intensa con sentido SW-NE, identificable con la Corriente del Bransfield descrita por numerosos autores (e.g. Niiler et al., 1991). Dicha corriente bordea a la isla Decepción, dividiéndose en dos brazos que se unen de nuevo para transitar por la plataforma continental de las Shetland del Sur. El flujo sobre la plataforma continental de la Península Antártica es muy débil, lo que concuerda con lo descrito en la bibliografía. Se aprecia además la existencia de un giro horario al NE de isla Trinity, similar al descrito por López et al. (en prensa). El flujo es hacia el E sobre el cañon que separa isla Decepción de Livingston. A lo largo del talud continental de las Shetland del Sur, los meandros de la corriente en dirección NE demuestran el control que la topografía del fondo ejerce sobre la misma, este es un rasgo también descrito de la Corriente del Bransfield (Figa et al., 1993).

Este esquema de circulación se produce conjuntamente con un campo de altura de superficie libre como el de la figura 7.28, donde, las isolíneas de altura de superficie libre se asemejan a las gráficas de alturas dinámicas calculadas para el área (ver e.g. figura 7.4). La diferencia está en que los

FIGURA 7.27. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Sin viento. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Dirichlet en los contornos E y W. Campo de velocidades medias (IDOFV=1). Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

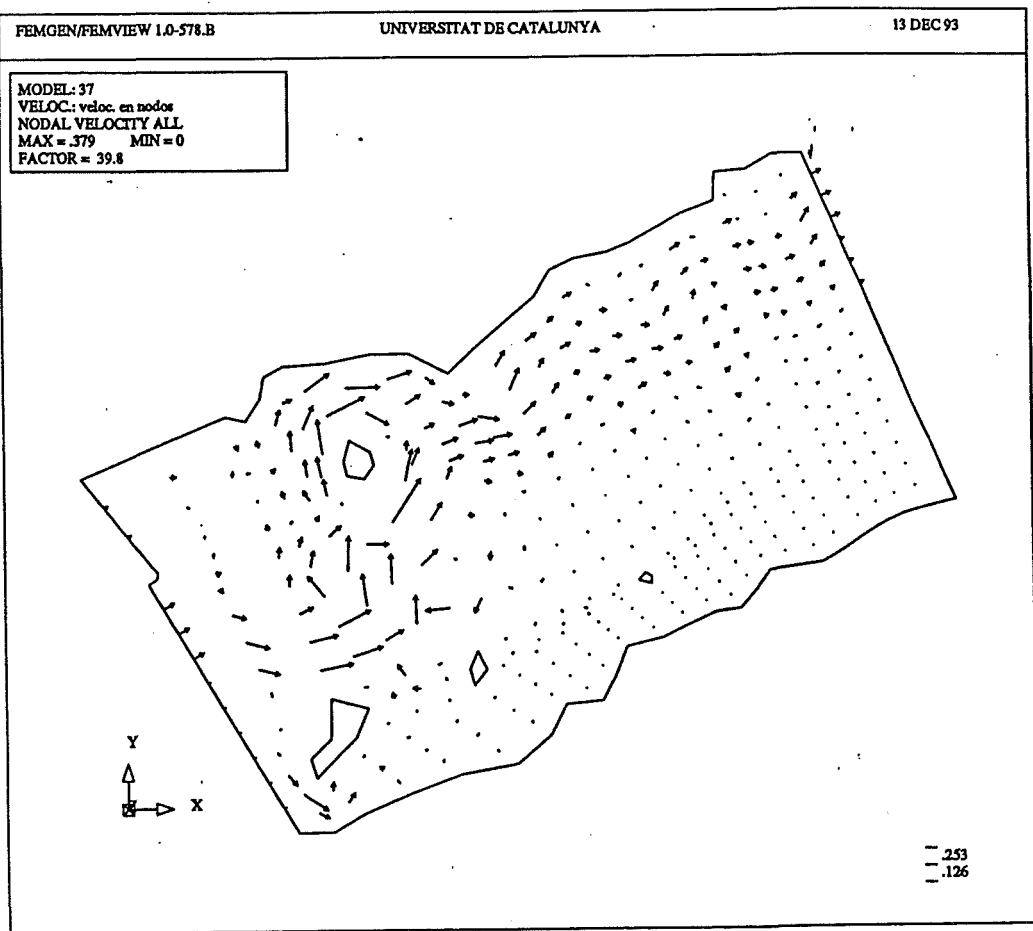
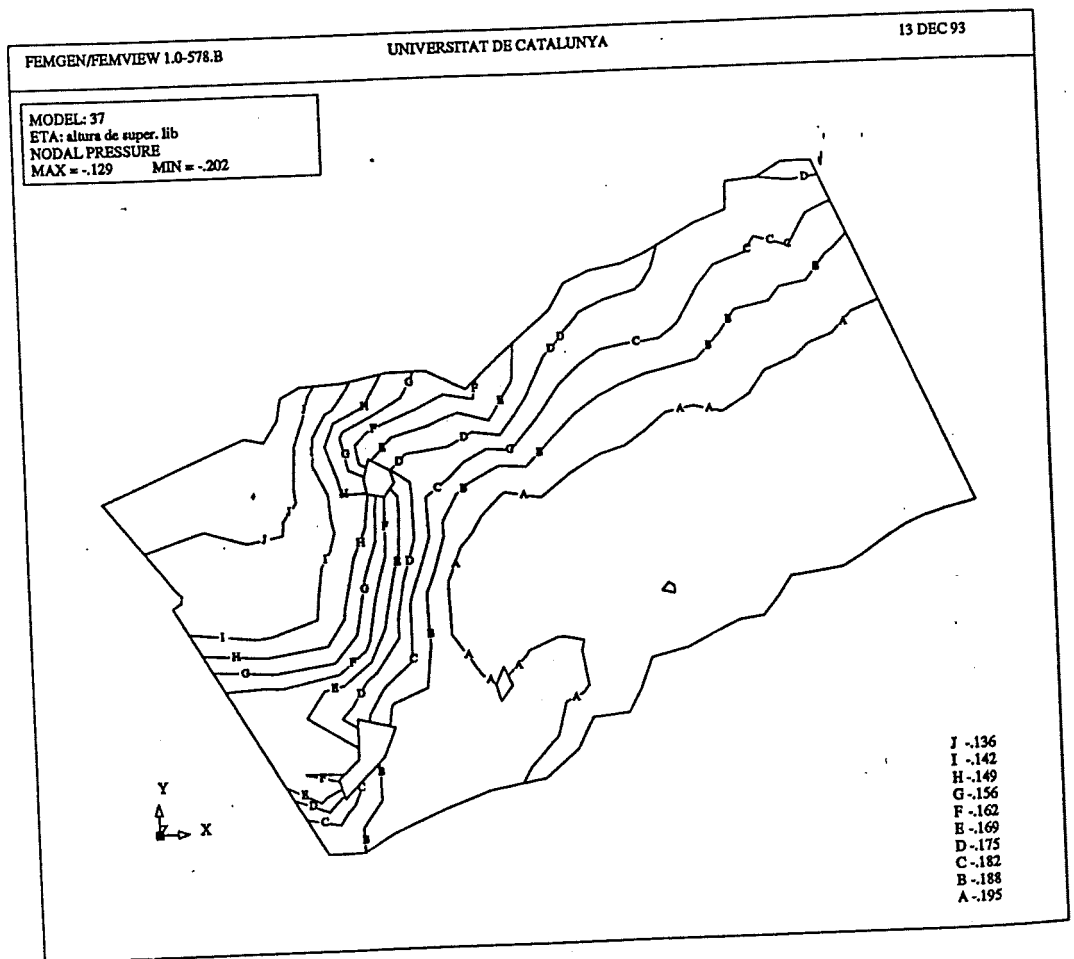


FIGURA 7.28. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Sin viento. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Dirichlet en los contornos E y W. Campo de alturas de superficie libre. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m.



gradientes en este caso son mayores, puesto que, habiendo considerado la densidad homogénea, la parte barotrópica del gradiente de presión debe cumplir numéricamente un papel que está repartido entre las contribuciones barotrópicas y baroclínicas. Por tanto, los resultados de η son sólo válidos cualitativamente.

Para el mismo caso anterior, pero imponiendo condiciones Neumann homogéneas en el contorno este, los rasgos del campo de velocidades medias son aproximadamente iguales (figura 7.29), excepto sobre la plataforma de la Península Antártica, donde se observa la presencia de una corriente dirección NE, contraria a la esperada. El campo de alturas de la superficie libre es similar al anterior (figura 7.30).

Caso 2

El primer campo de viento considerado es del NW. Si imponemos condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto, el resultado para el campo de velocidades medias resultantes es el que se presenta en la figura 7.31. En él, se puede observar la entrada de agua del Weddell que genera una contracorriente dirección SW sobre la plataforma de la Península Antártica, que choca con otra corriente dirección NE produciendo la presencia de un vórtice antihorario en el centro del Bransfield y otro de signo contrario al este. El campo de alturas de la superficie libre es coherente con la dirección del viento (figura 7.32), si bien la acumulación de agua en la esquina SE del dominio computacional puede ser una consecuencia espúrea de las condiciones de contorno.

FIGURA 7.29. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Sin viento. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Dirichlet en el contorno W y Neumann homogéneas en el E. Campo de velocidades medias (IDOFV=1). Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

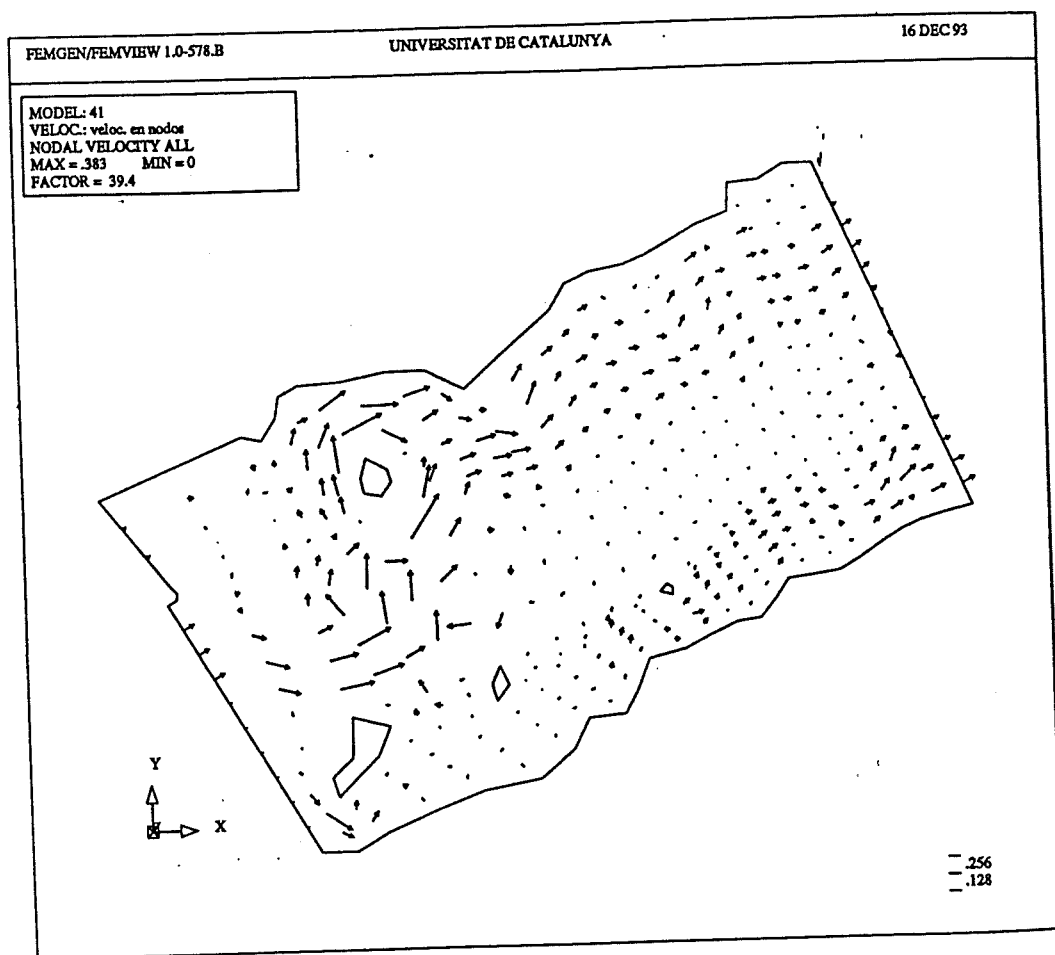


FIGURA 7.30. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Sin viento. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Dirichlet en el contorno W y Neumann homogéneas en el E. Campo de alturas de superficie libre. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m.

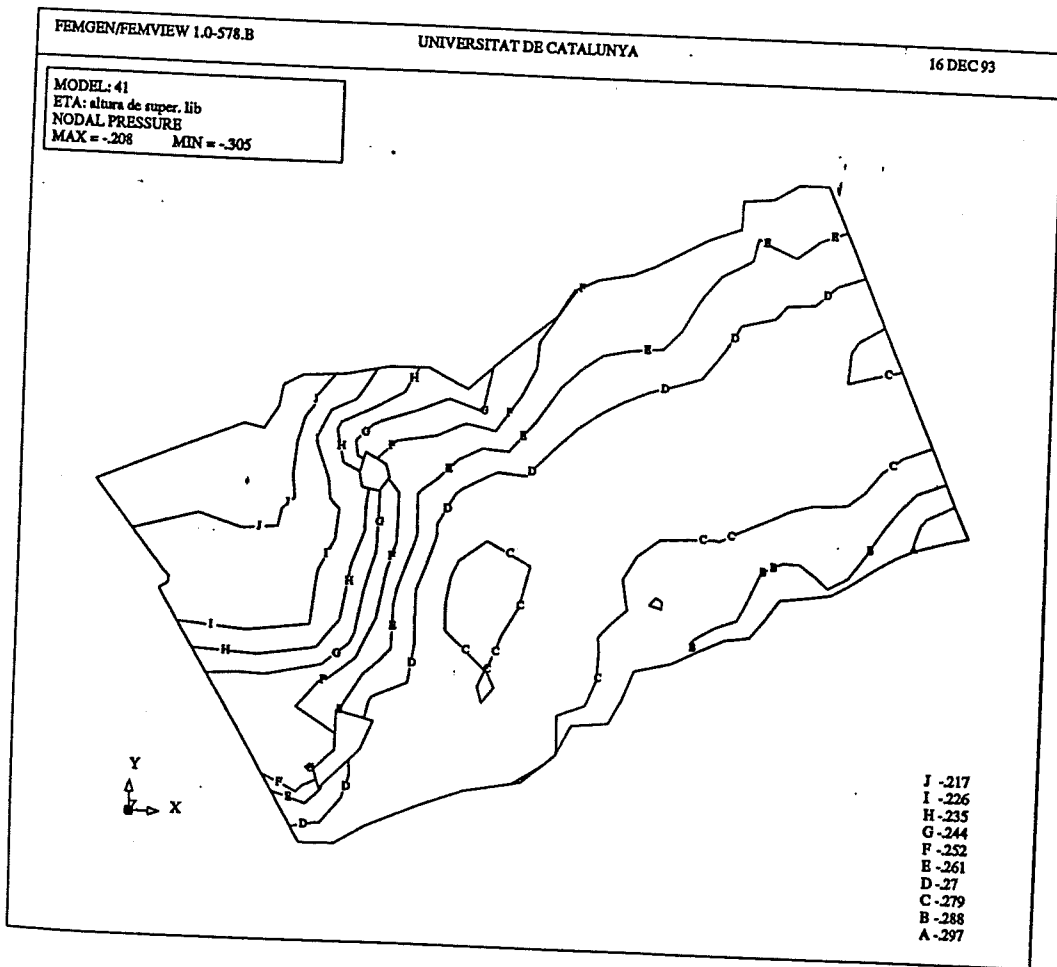


FIGURA 7.31. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento del NW. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg}/\text{m}^3\text{s}$. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Campo de velocidades medias (IDOFV=1). Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

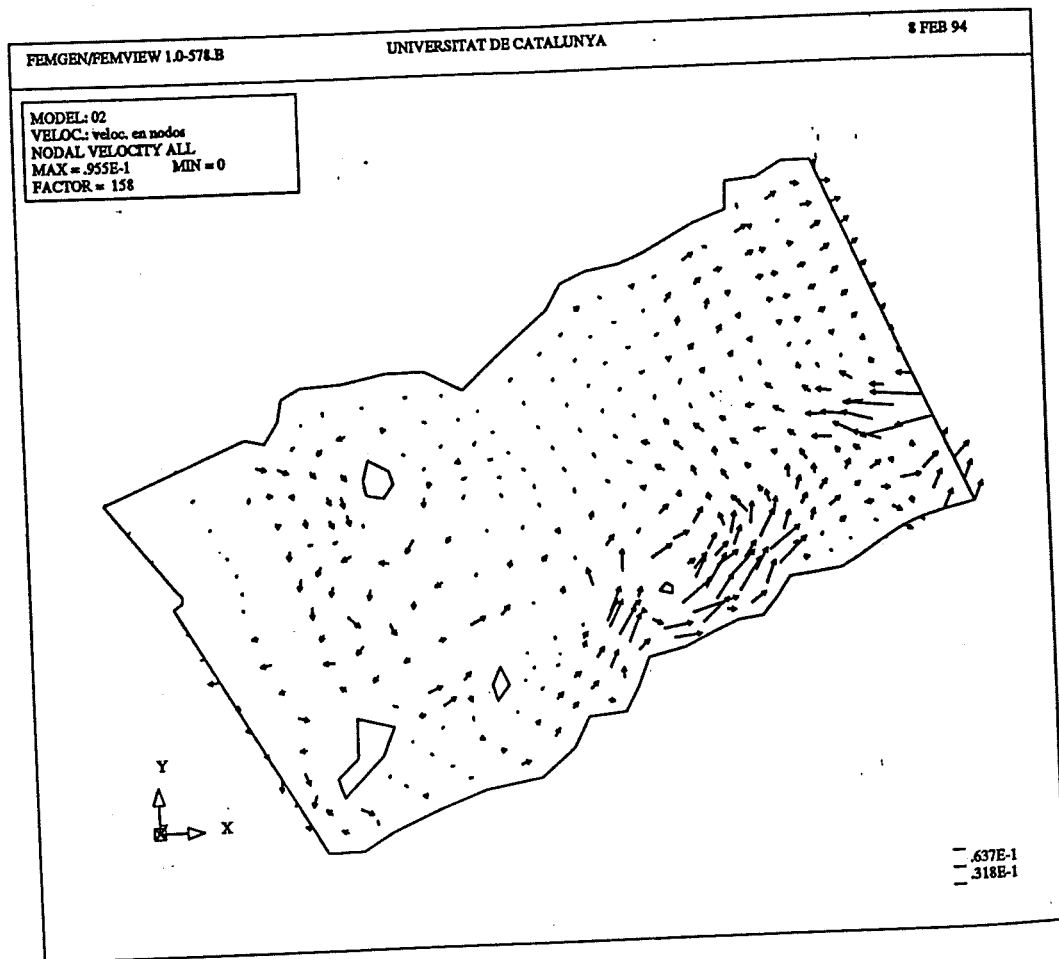
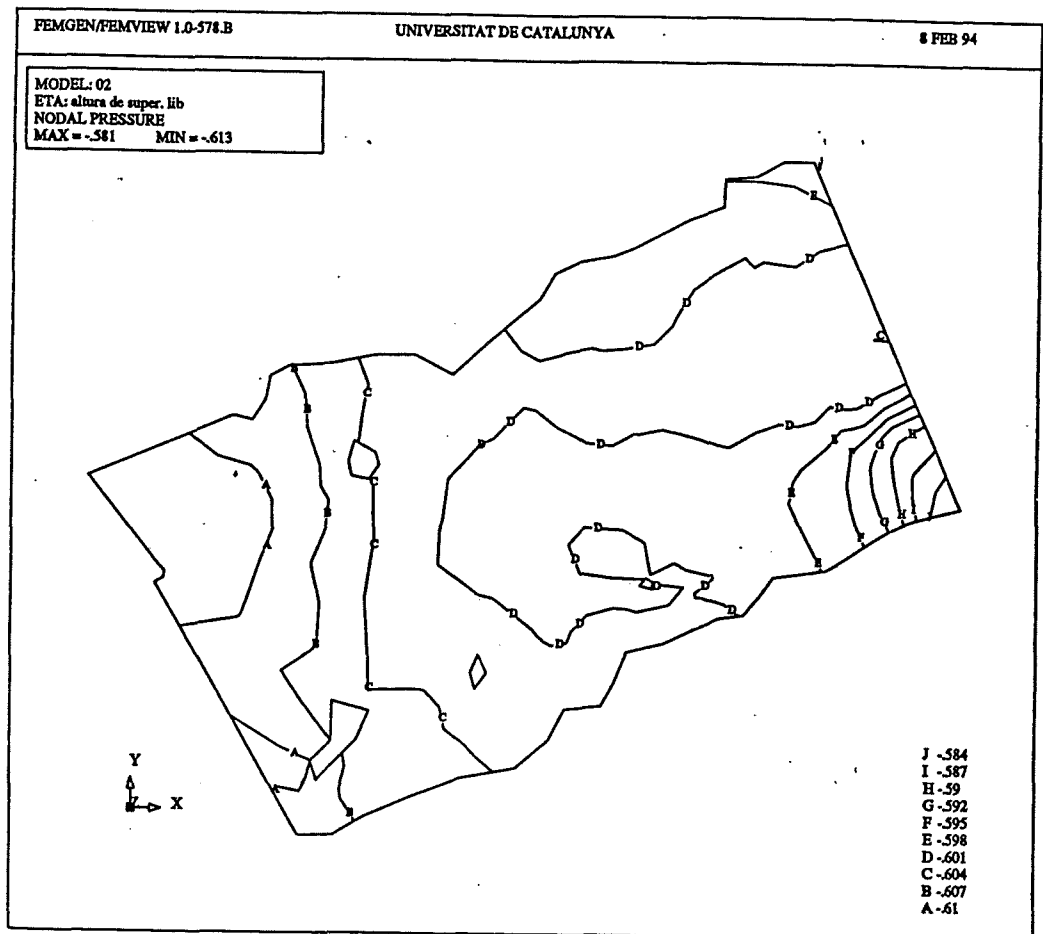


FIGURA 7.32. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento del NW. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Campo de alturas de superficie libre. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m.



Estos rasgos básicos de la circulación media no se adivinan cuando se considera la variación vertical de la corriente. En la figura 7.33 está representada la solución para el segundo grado de libertad vertical de la velocidad. En las figuras 7.34 y 7.35 se exhiben los campos de velocidad solución en la superficie libre y en el fondo, respectivamente. El aspecto de la circulación superficial en las zonas de plataforma de las Shetland y de la Península Antártica es el de un flujo con una orientación desplazada hacia la izquierda respecto al campo de vientos, mientras que en el fondo el sentido es opuesto.

Caso 3

En segundo lugar consideramos un viento de NE. Sin prescribir la circulación en los contornos laterales, los resultados para el campo de velocidades medias (figura 7.36) presentan rasgos semejantes a los de la circulación residual (una circulación sobre la plataforma de la Península Antártica en dirección W, una corriente dirección E entre Livingston y Decepción, y un giro anticiclónico al NE de Trinity). El campo de altura de superficie libre (figura 7.37) estaría de acuerdo con la dirección del viento, pero de nuevo observamos una acumulación de agua achacable a las condiciones de contorno Neumann homogéneas en el extremo SW del dominio.

En la figura 7.38 está representada la solución para el segundo grado de libertad vertical de la velocidad, y en las figuras 7.39 y 7.40 se presentan, respectivamente, el campo de velocidades superficiales y del fondo.

FIGURA 7.33. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento del NW. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Solución para el segundo grado de libertad vertical (IDOFV=2), de la velocidad. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

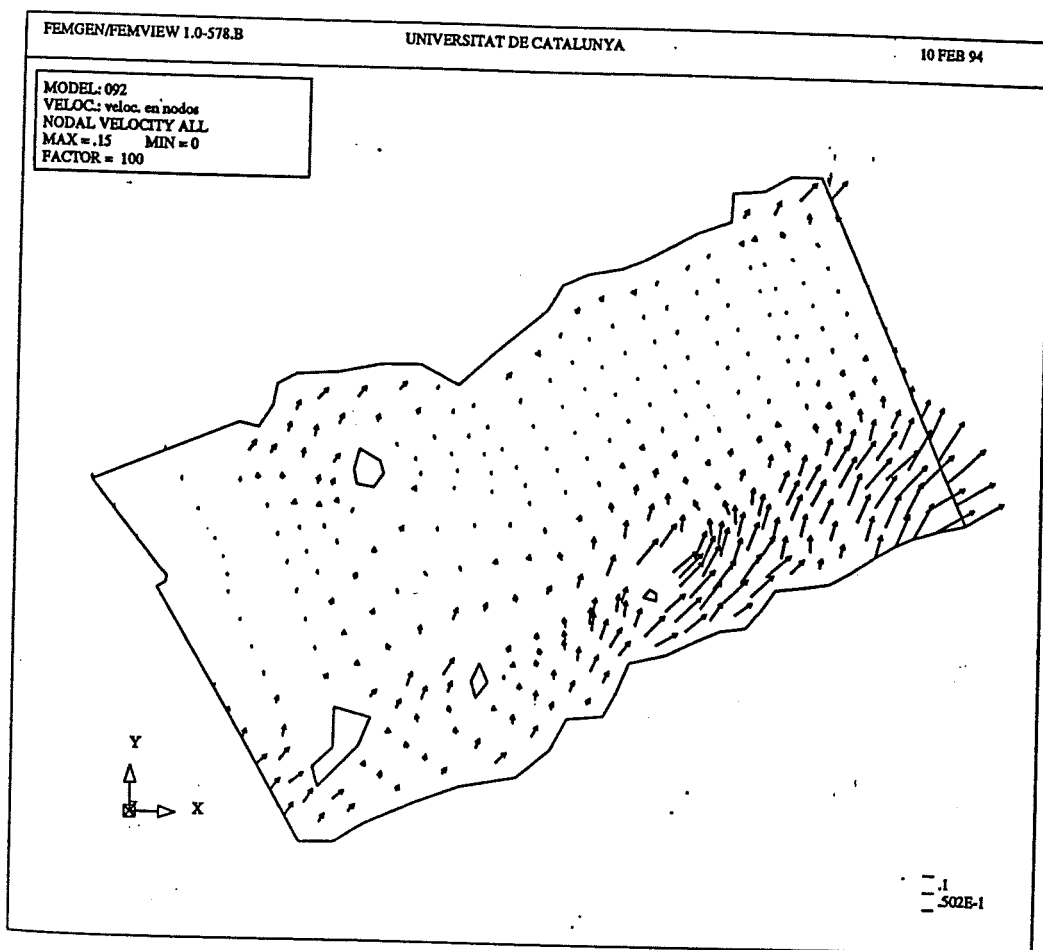


FIGURA 7.34. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento del NW. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg}/\text{m}^3\text{s}$. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Campo de velocidades superficiales. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

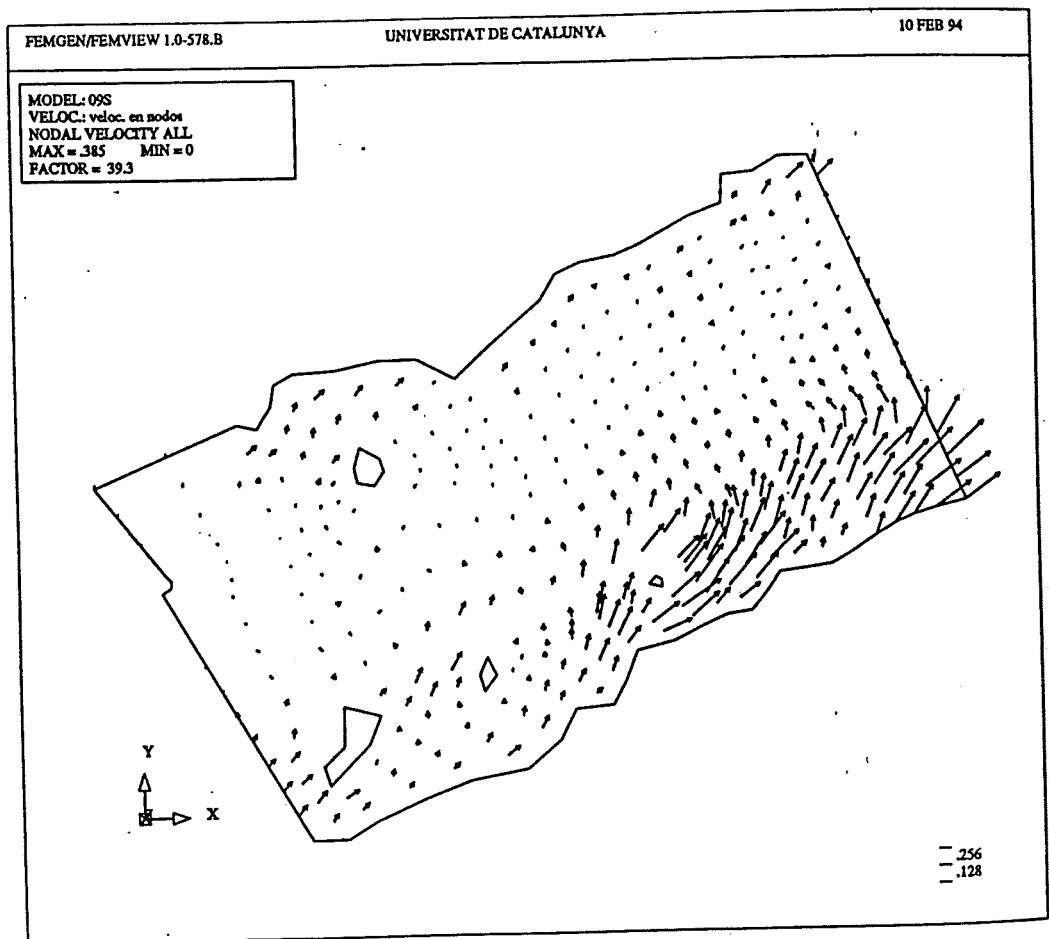


FIGURA 7.35. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento del NW. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Campo de velocidades en el fondo (extremo superior de la capa límite). Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

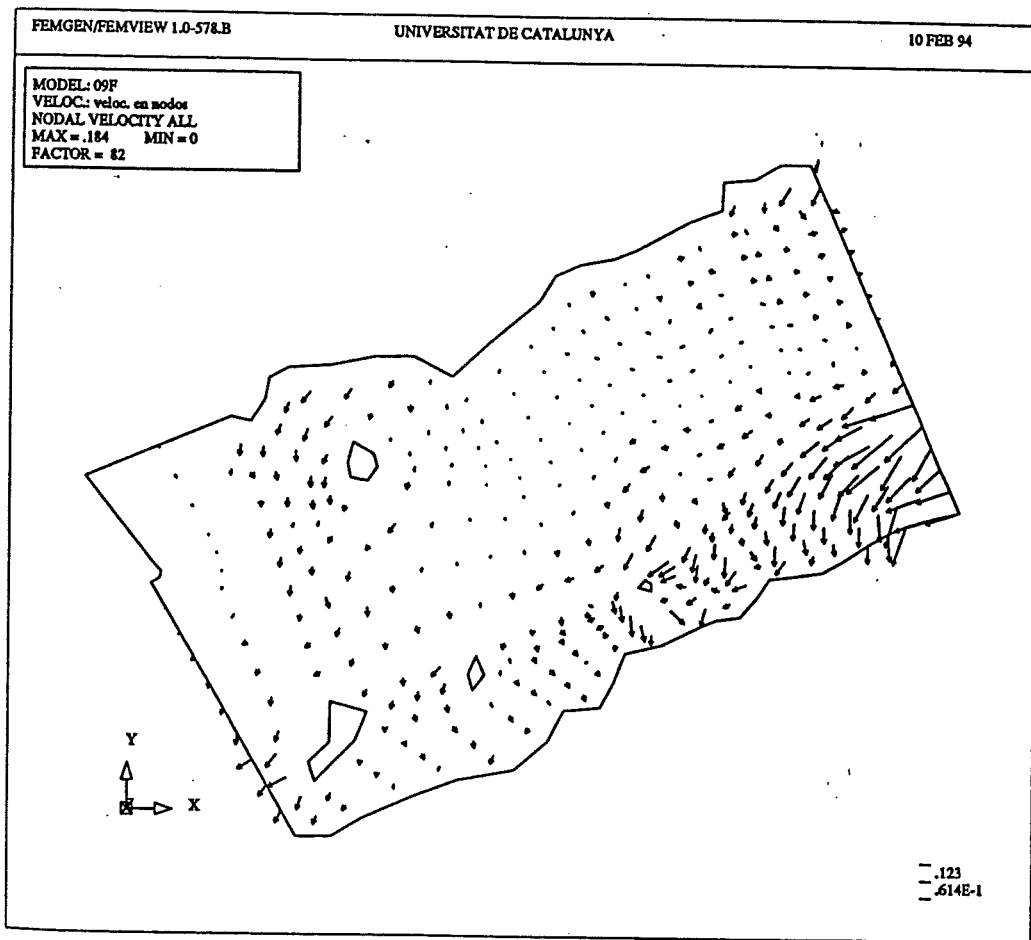


FIGURA 7.36. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento del NE. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Campo de velocidades medias (I-DOFV=1). Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

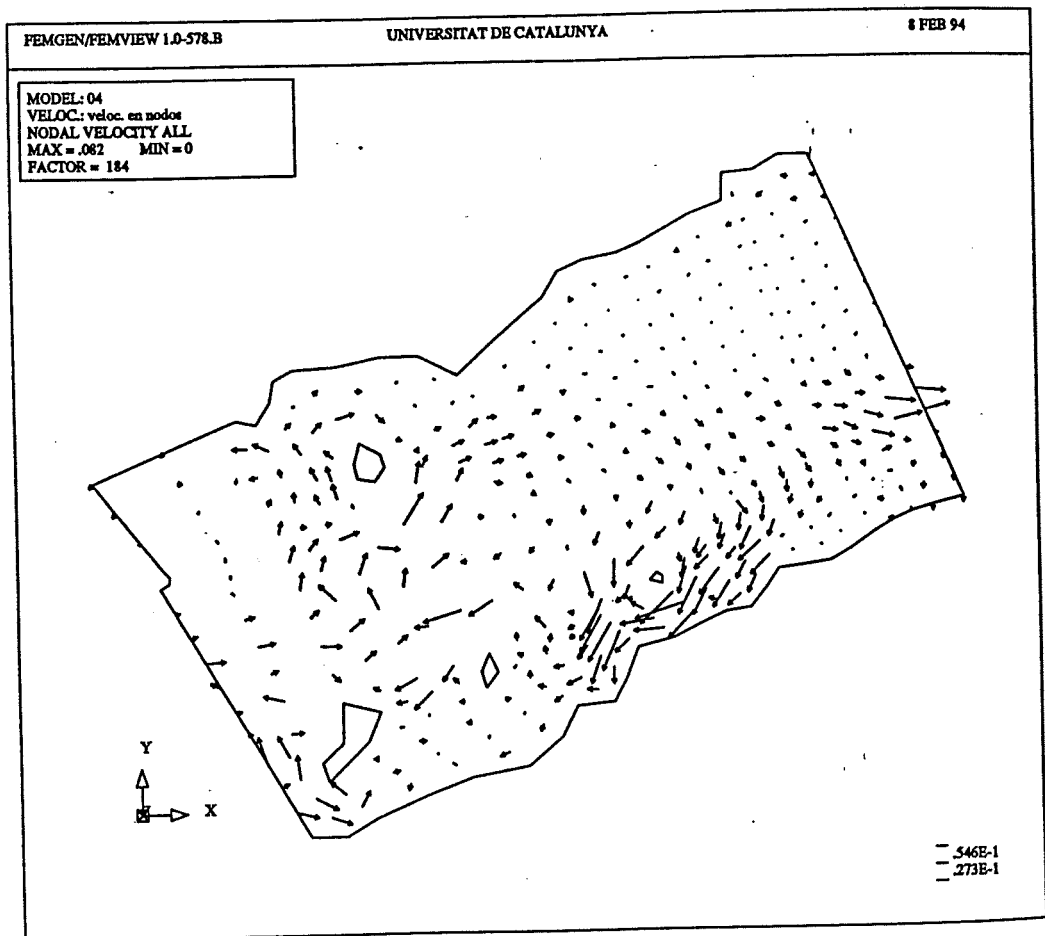


FIGURA 7.37. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento del NE. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Campo de alturas de superficie libre. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m.

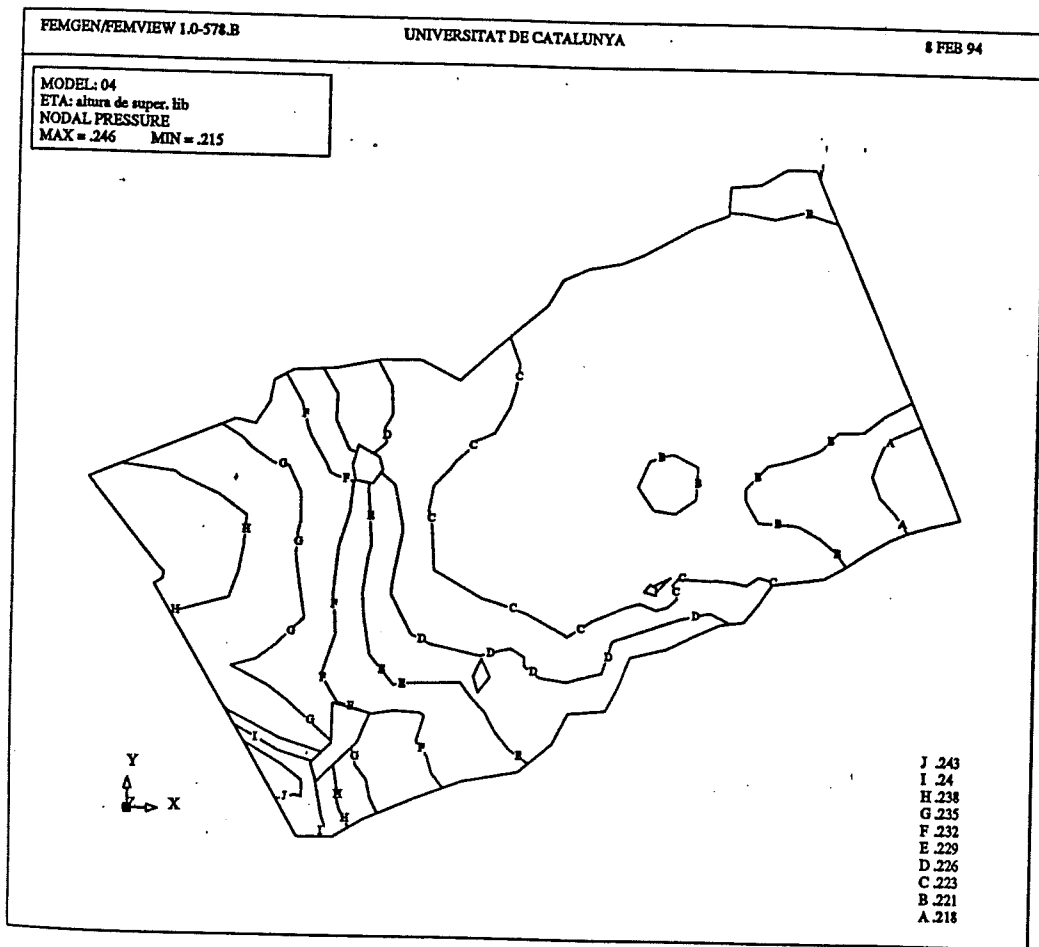


FIGURA 7.38. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento del NE. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Solución para el segundo grado de libertad vertical (IDOFV=2), de la velocidad. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

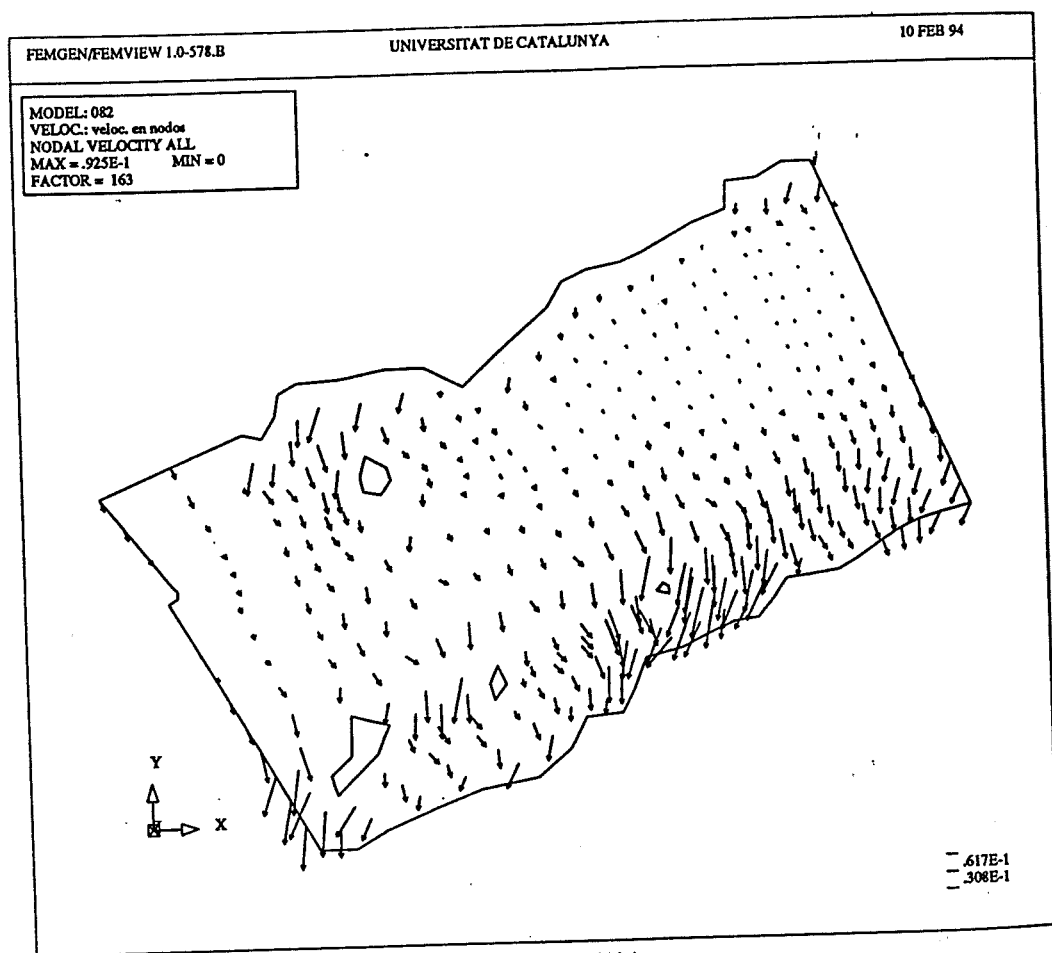


FIGURA 7.39. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento del NE. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Campo de velocidades superficiales. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

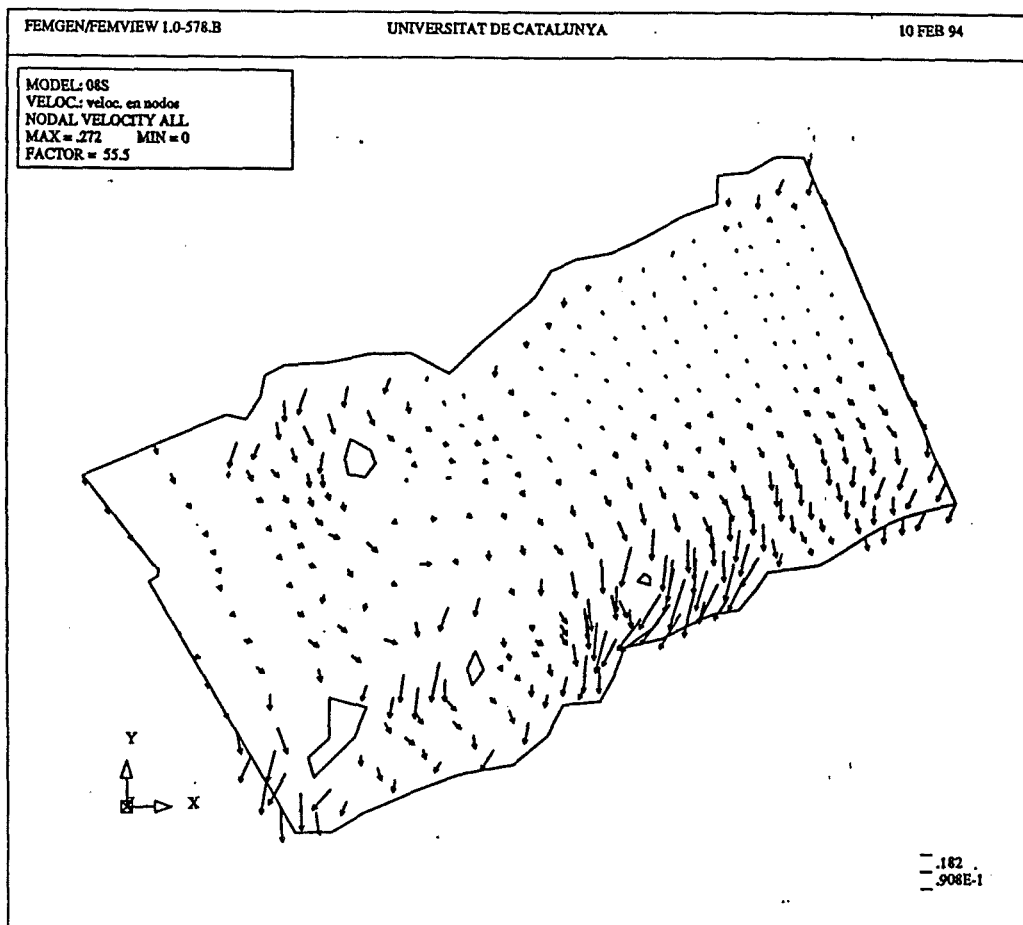
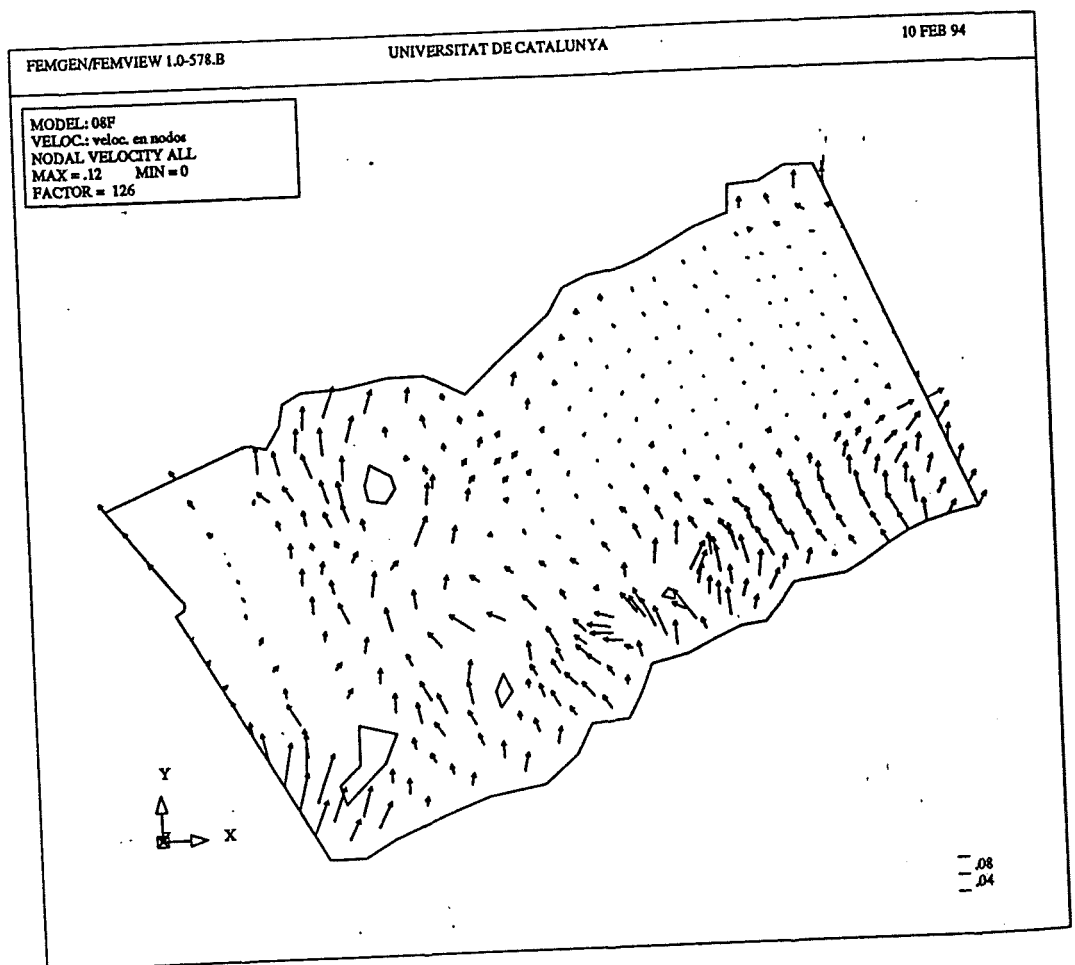


FIGURA 7.40. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento del NE. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Campo de velocidades en el fondo (extremo superior de la capa límite). Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.



Caso 4

El tercer campo de viento que se considera es del SW. El campo de velocidades medias que se obtiene con condiciones de contorno Neumann homogéneas en los contornos laterales (figura 7.41) muestra una circulación predominante dirección E sobre la plataforma de la Península Antártica, aunque se advierte una entrada de agua procedente del Weddell a lo largo del margen continental. El campo de alturas de la superficie libre (figura 7.42), la solución para el segundo grado de libertad vertical de la velocidad (figura 7.43) y los campos de velocidades superficiales y fondo (figuras 7.44 y 7.45, respectivamente) presentan las mismas características vistas hasta ahora para los otros dos episodios, pero acordes con la dirección del viento de SW.

Caso 5

Cuando imponemos como sollicitación el campo de tensiones sobre la superficie libre calculado a partir del "viento climatológico a corto plazo", y no prescribimos la corriente en los contornos de mar abierto, los resultados para el campo medio de velocidades (figura 7.46), para el campo de alturas de la superficie libre (figura 7.47), para el segundo grado de libertad vertical de la velocidad (figura 7.48), velocidades en la superficie (figura 7.49) y en el fondo (figura 7.50) son cualitativamente iguales a los resultados del episodio de viento del NW, diferenciándose sólo en los valores de los módulos de los campos vectoriales.

Si con este mismo "viento climatológico" se imponen condiciones de contorno Dirichlet en los dos contornos de mar abierto transversales al eje del

FIGURA 7.41. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento del SW. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3$. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Campo de velocidades medias (1-DOFV=1). Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

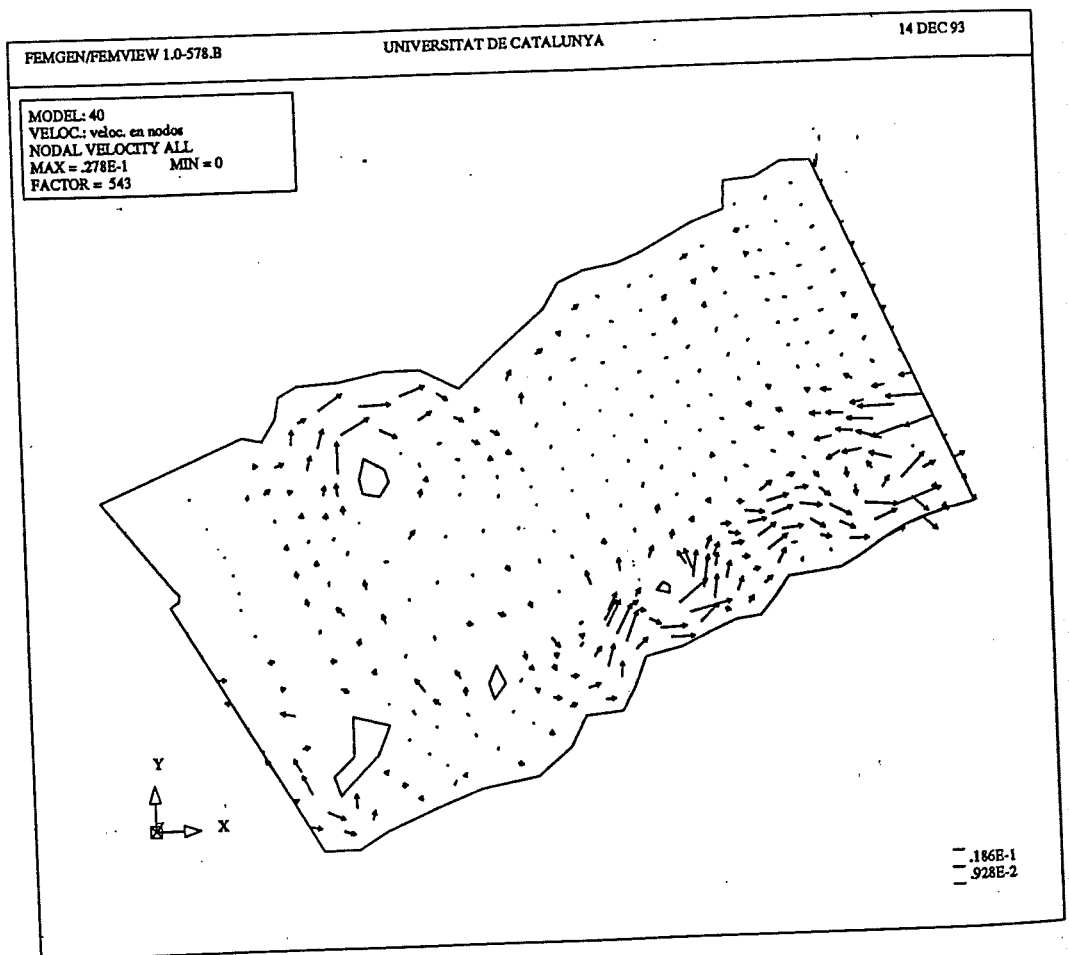


FIGURA 7.42. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento del SW.
 $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Campo de alturas de superficie libre. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m.

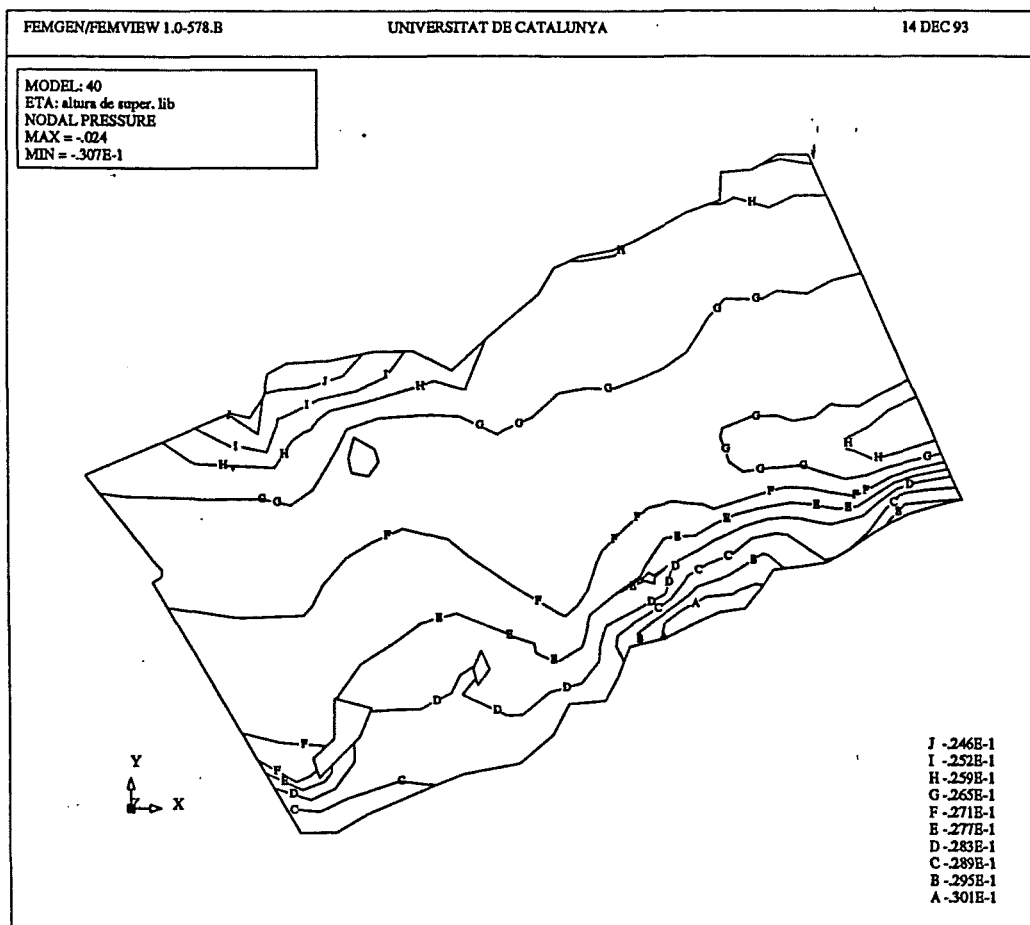


FIGURA 7.43. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento del SW. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg}/\text{m}^3\text{s}$. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Solución para el segundo grado de libertad vertical (IDOFV=2), de la velocidad. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

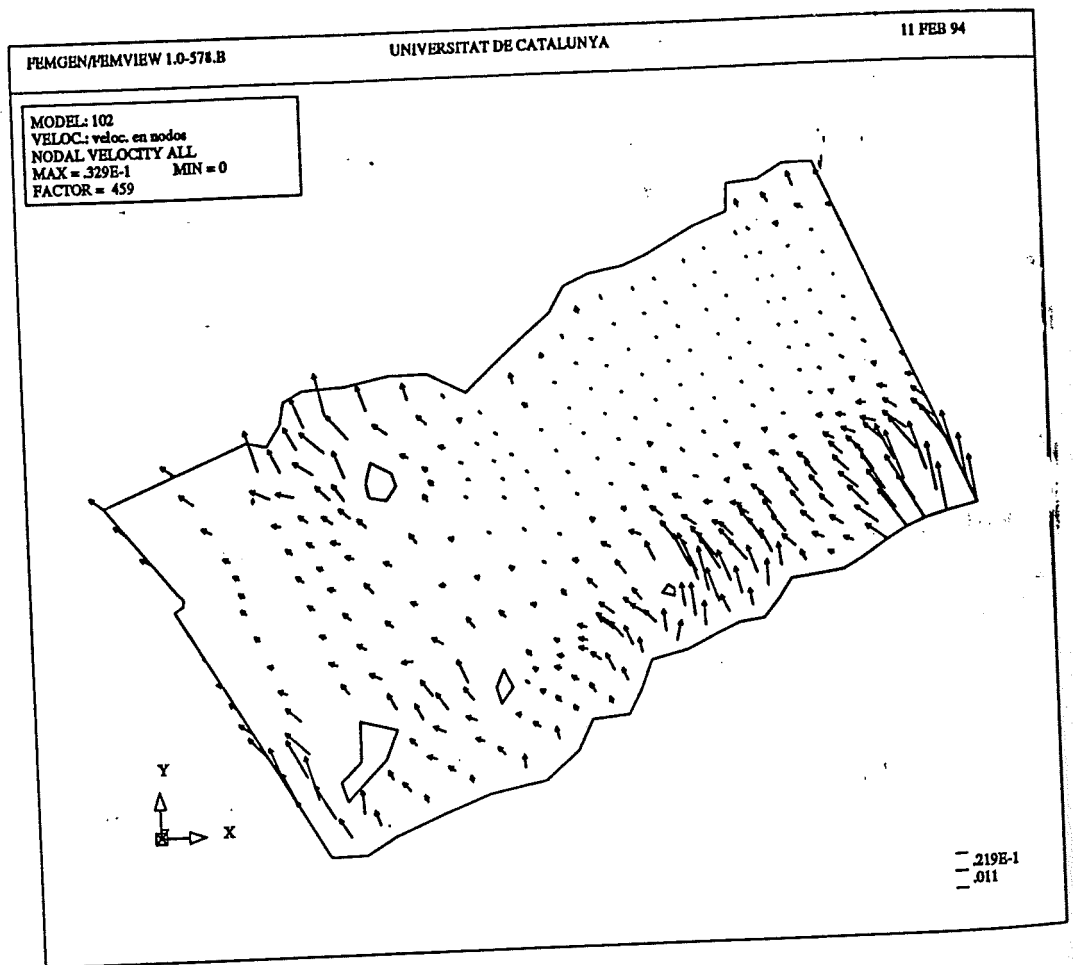


FIGURA 7.44. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento del SW. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Campo de velocidades superficiales. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

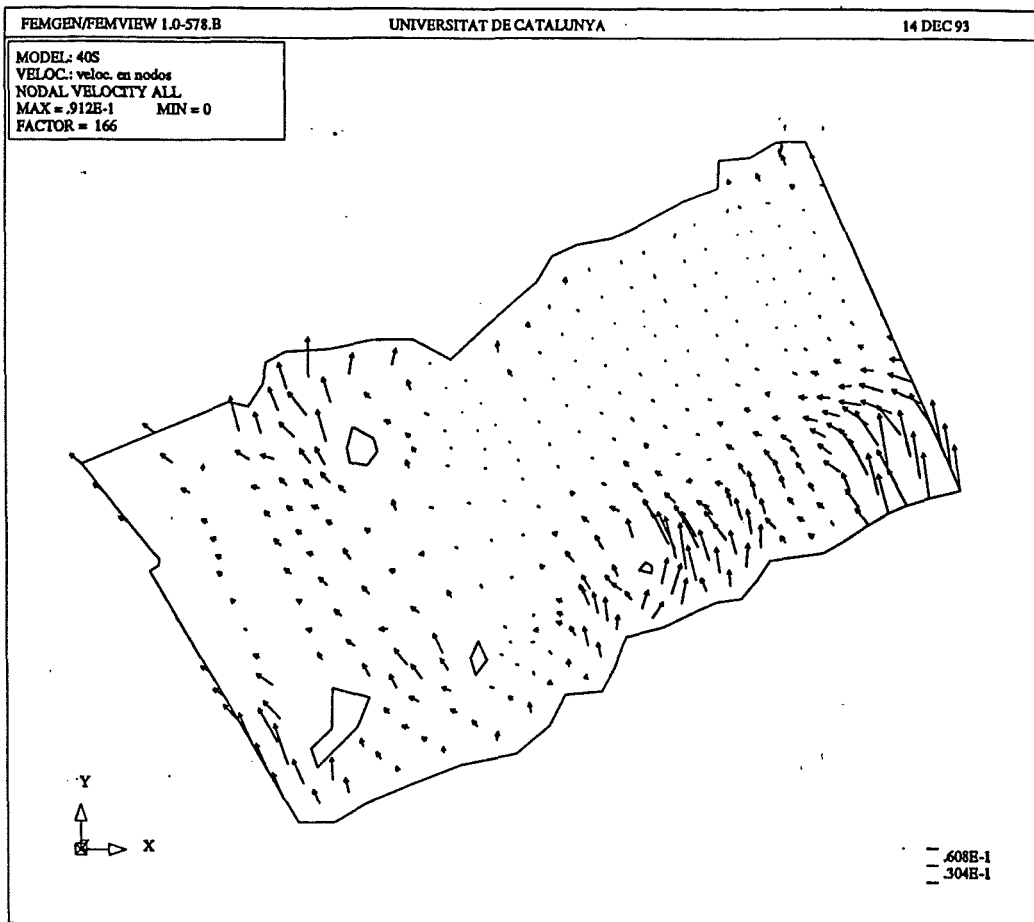


FIGURA 7.45. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento del SW. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Campo de velocidades en el fondo (extremo superior de la capa límite). Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

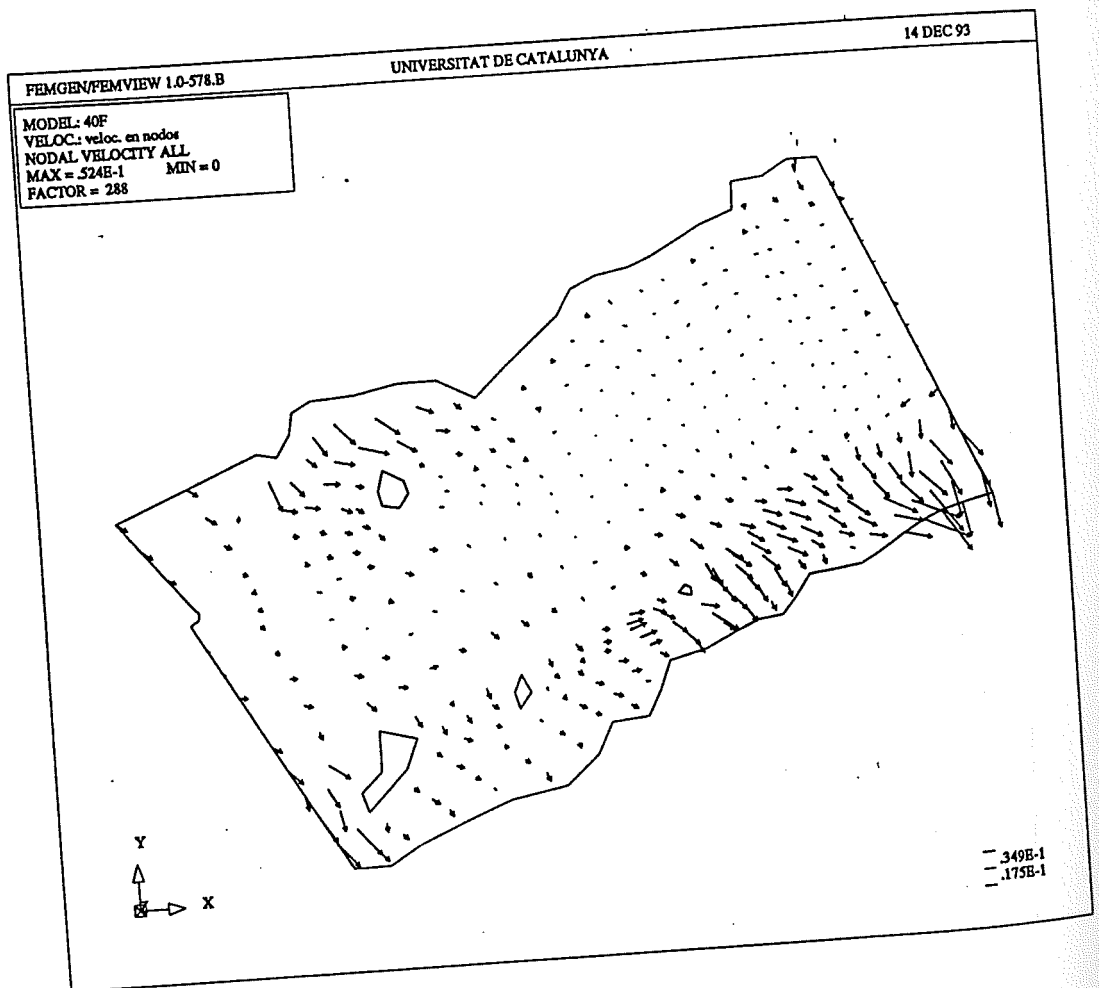


FIGURA 7.46. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento climatológico. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Campo de velocidades medias (IDOFV=1). Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

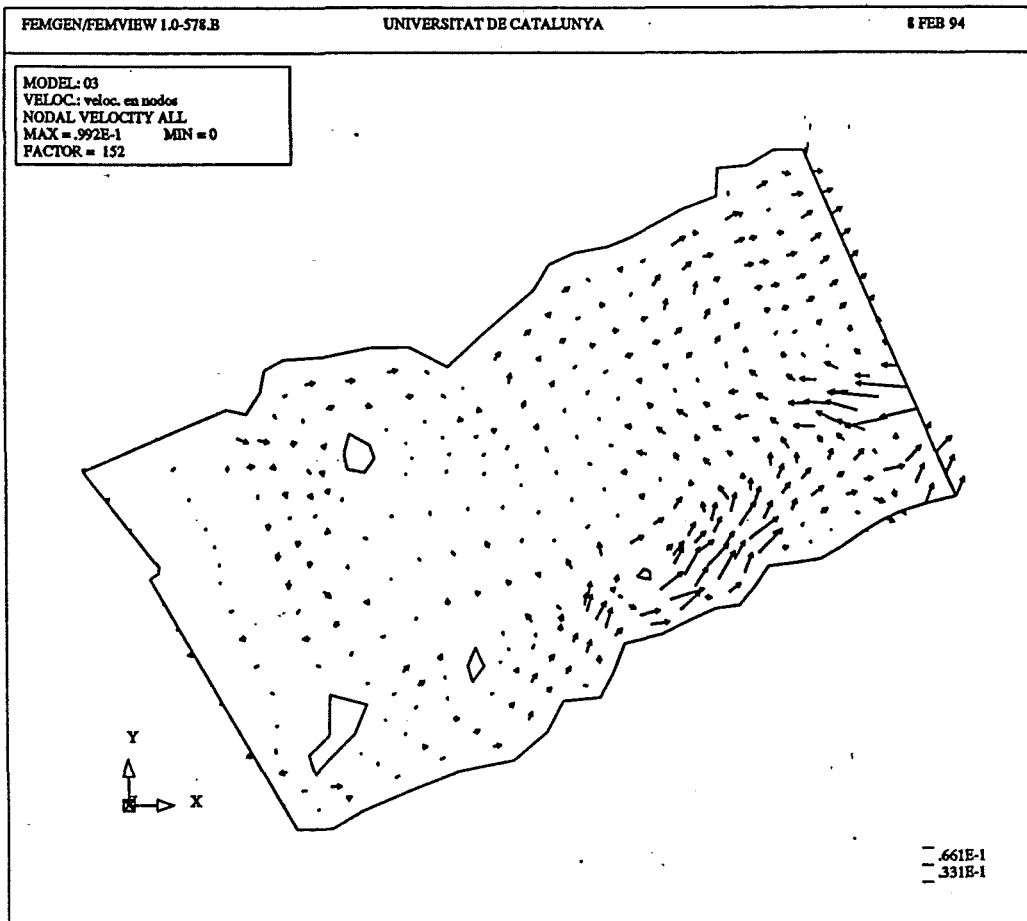


FIGURA 7.47. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento climatológico. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Campo de alturas de superficie libre. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m.

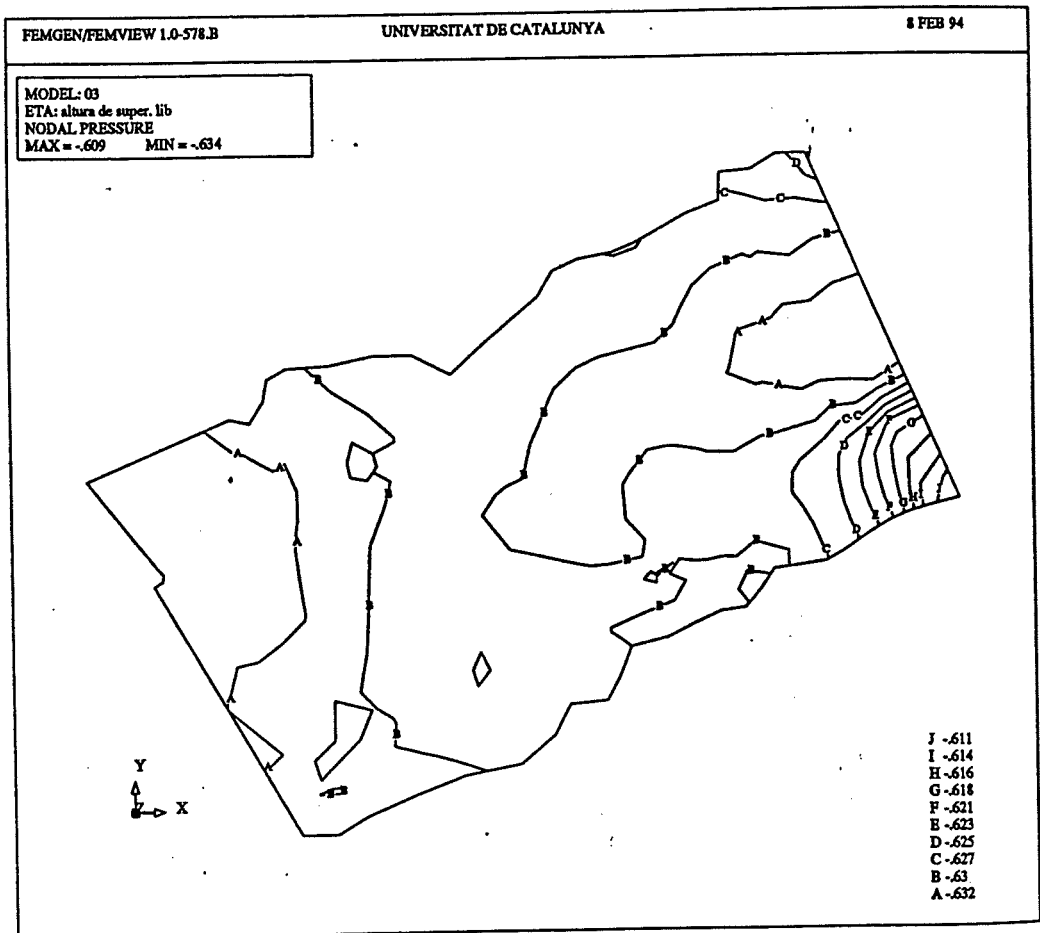


FIGURA 7.48. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento climatológico. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Solución para el segundo grado de libertad vertical (IDOFV=2), de la velocidad. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

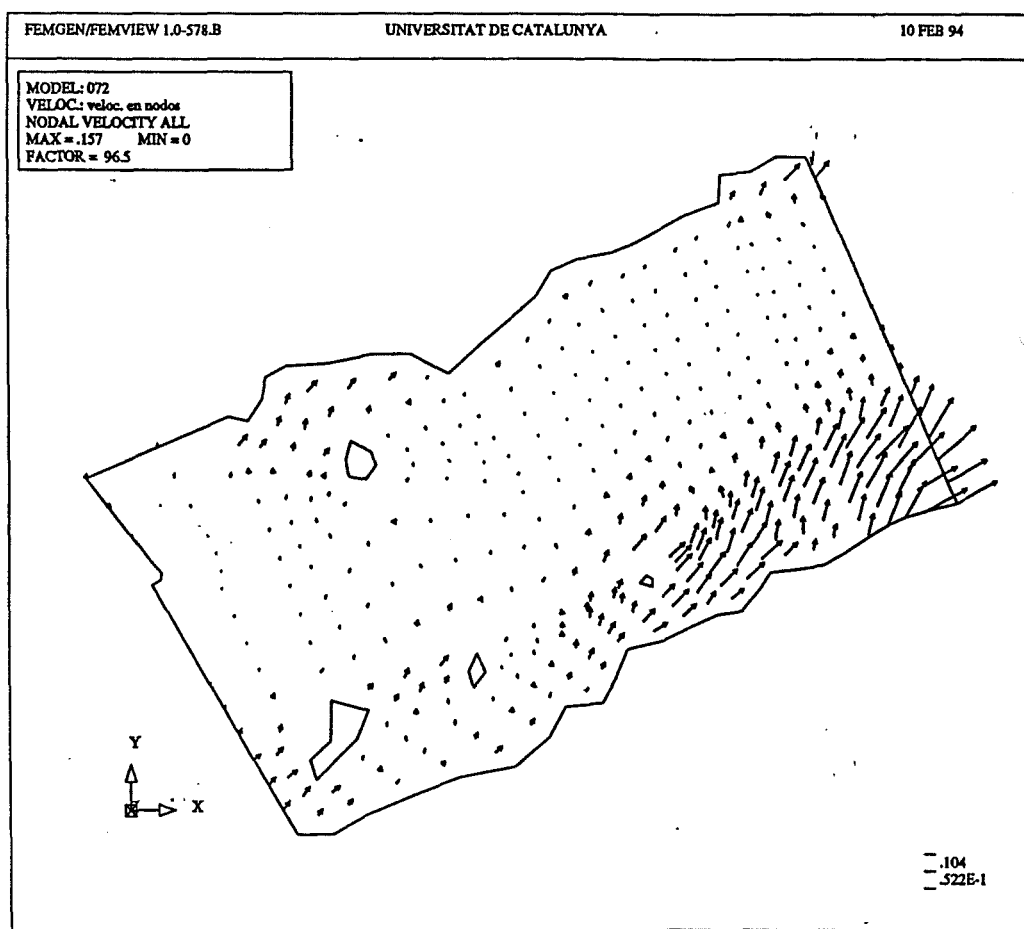


FIGURA 7.49. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento climatológico. $K_H=1000$ m²/s. $K_z=0.01$ m²/s. $\gamma=1$ kg/m³s. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Campo de velocidades superficiales. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

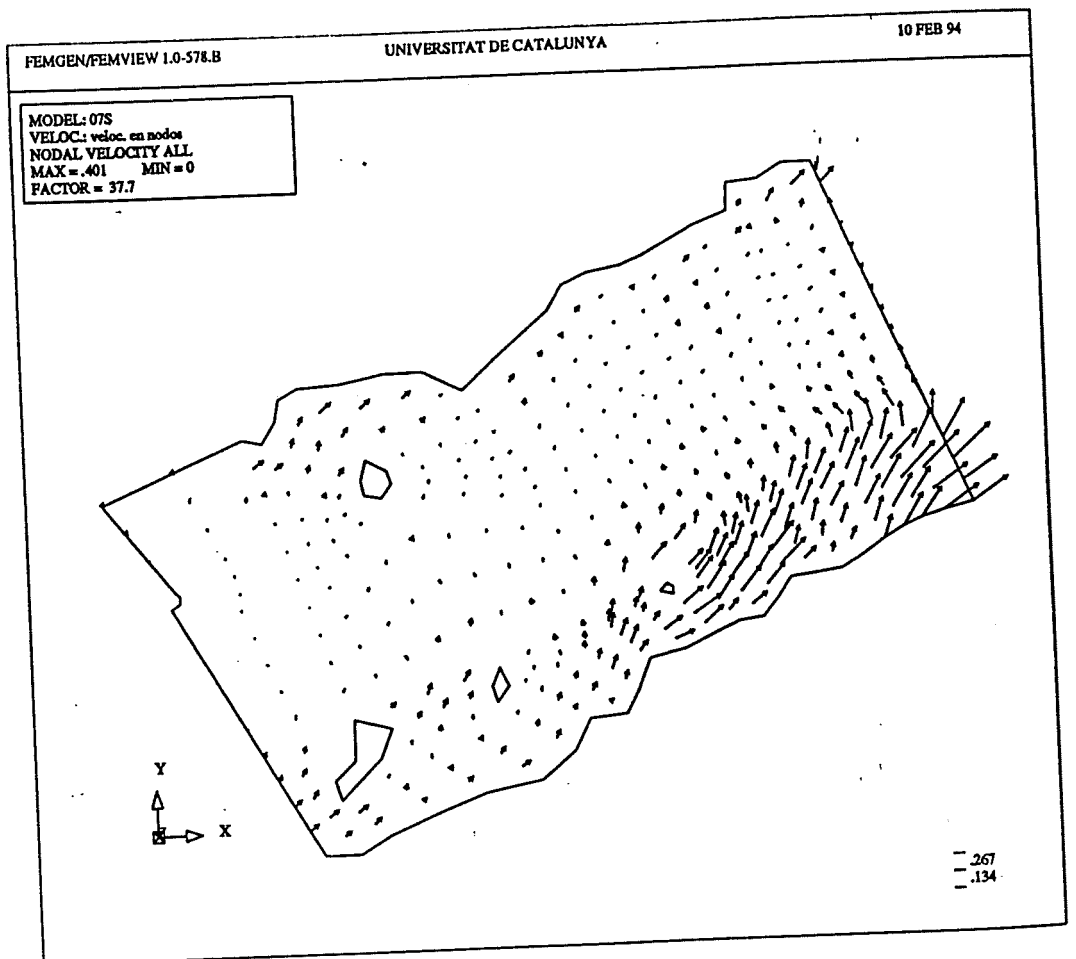
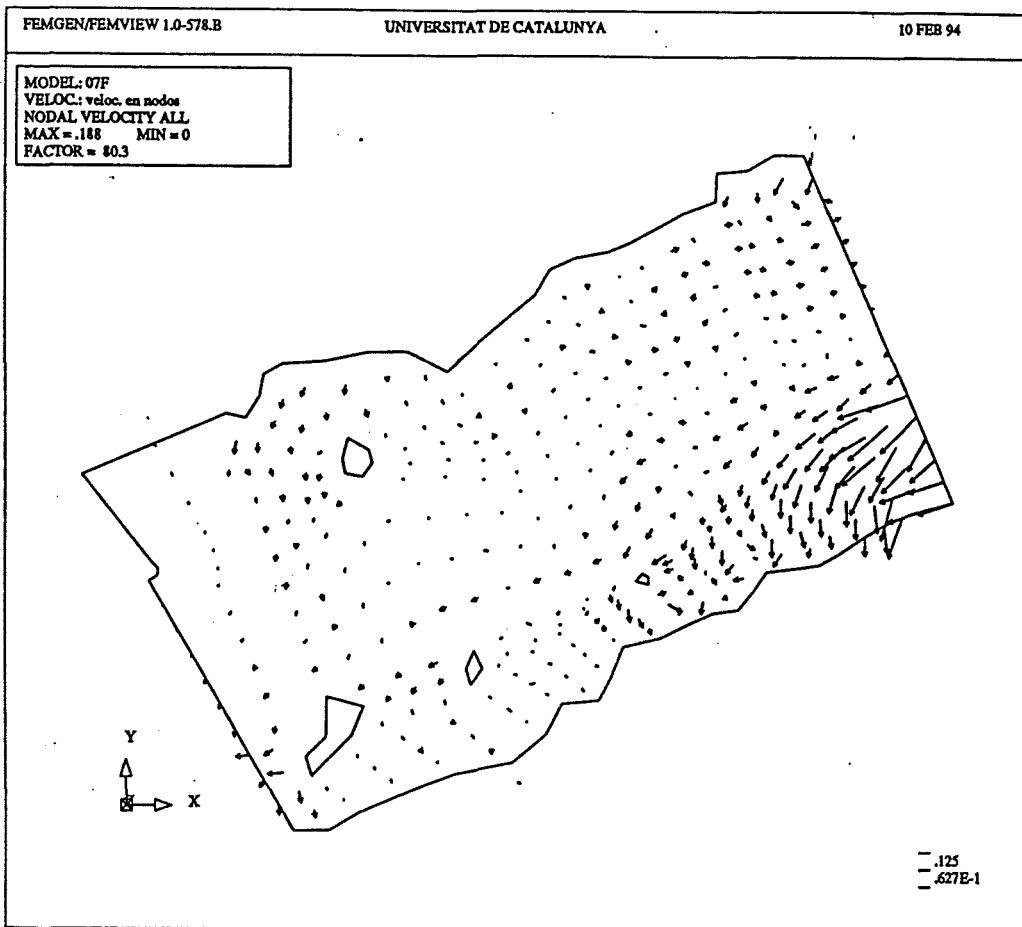


FIGURA 7.50. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento climatológico. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Neumann homogéneas en los contornos de mar abierto. Campo de velocidades en el fondo (extremo superior de la capa límite). Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.



estrecho acordes al esquema de caudales de la figura 7.26, el único rasgo de la solución para el campo medio de velocidades (figura 7.51) que cambia con respecto al caso en el que no considerabamos las tensión superficial debida al viento es la presencia de una corriente dirección E sobre la plataforma de la Península Antártica. La solución para el campo de alturas de superficie libre se muestra en la figura 7.52.

Los rasgos básicos de la circulación media se mantienen cuando se considera la variación vertical de la corriente. En la figura 7.53 está representada la solución para el segundo grado de libertad vertical de la velocidad. En las figuras 7.54 y 7.55 se exhiben los campos de velocidad en la superficie libre y en el fondo, respectivamente. En ellos se observa la preponderancia de la Corriente del Bransfield excepto sobre la plataforma continental de la Península Antártica, donde en el fondo encontramos una entrada de agua del Weddell - corriente con dirección W- contraria a la que habría en superficie.

Resultados muy parecidos a los anteriores son los que encontramos si sólo imponemos las condiciones tipo Dirichlet aguas arriba y dejamos condiciones Neumann homogéneas aguas abajo (figuras 7.56, 7.57, 7.58, 7.59 y 7.60). La única diferencia digna de ser remarcada es que las velocidades sobre el fondo de la plataforma continental de la Península Antártica son muy débiles.

Las soluciones obtenidas demuestran que la circulación residual en el Estrecho de Bransfield esta dominada principalmente por la contribución geostrófica -cuya manifestación principal es la Corriente del Bransfield-, y que

FIGURA 7.51. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento climatológico. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Dirichlet en los contornos W y E. Campo de velocidades medias (IDOFV=1). Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

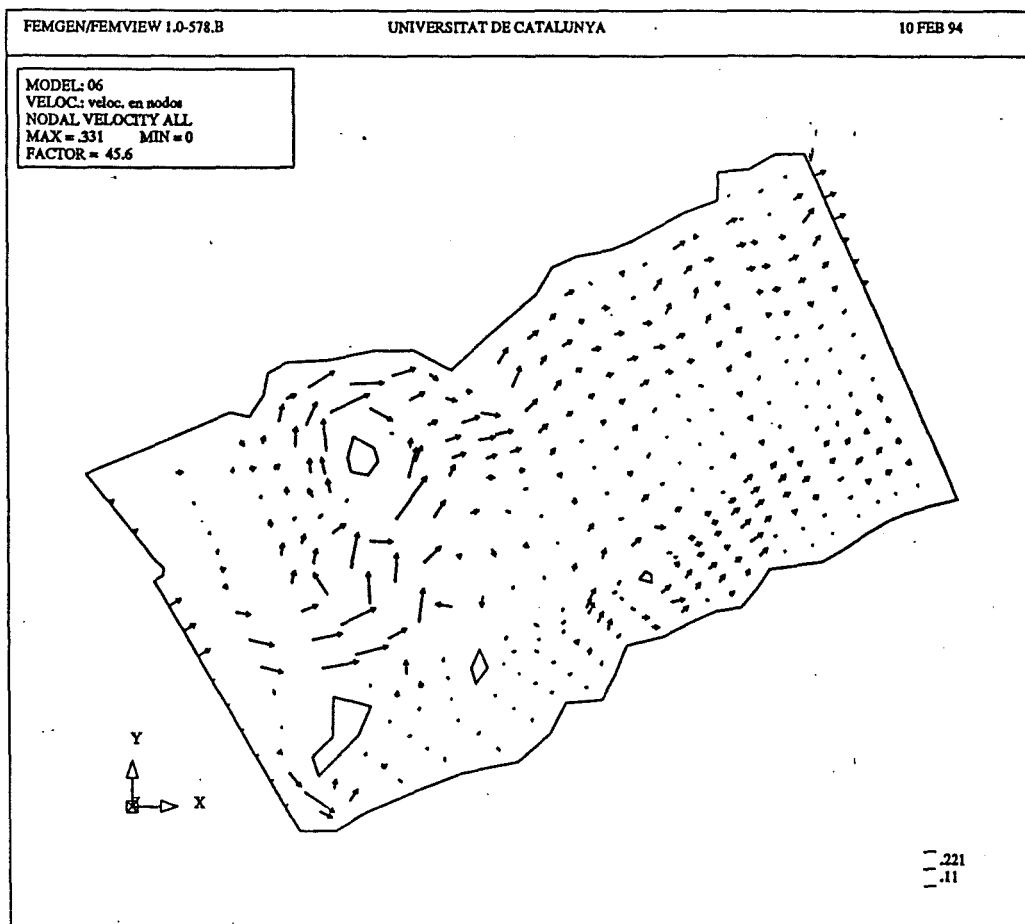


FIGURA 7.52. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento climatológico. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Dirichlet en los contornos W y E. Campo de alturas de superficie libre. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m.

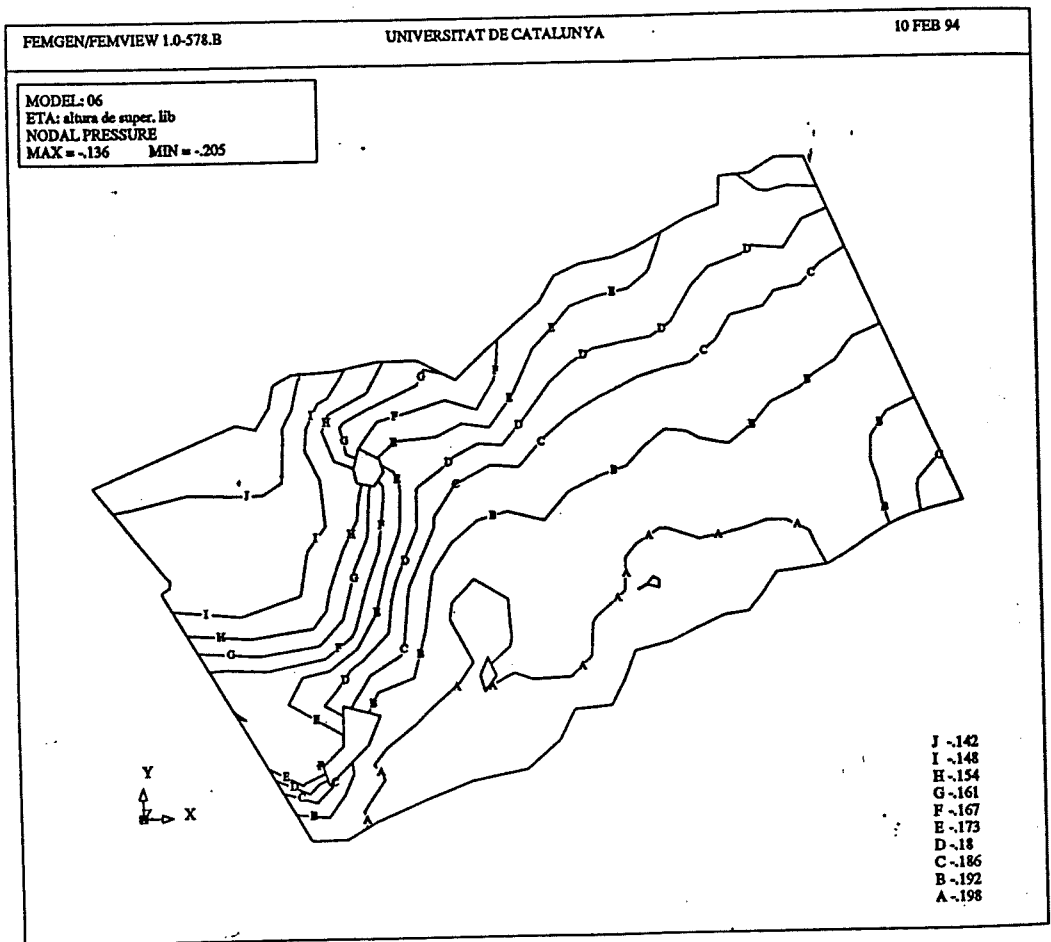


FIGURA 7.53. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento climatológico. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3$. Condiciones Dirichlet en los contornos W y E. Solución para el segundo grado de libertad vertical (IDOFV=2), de la velocidad. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

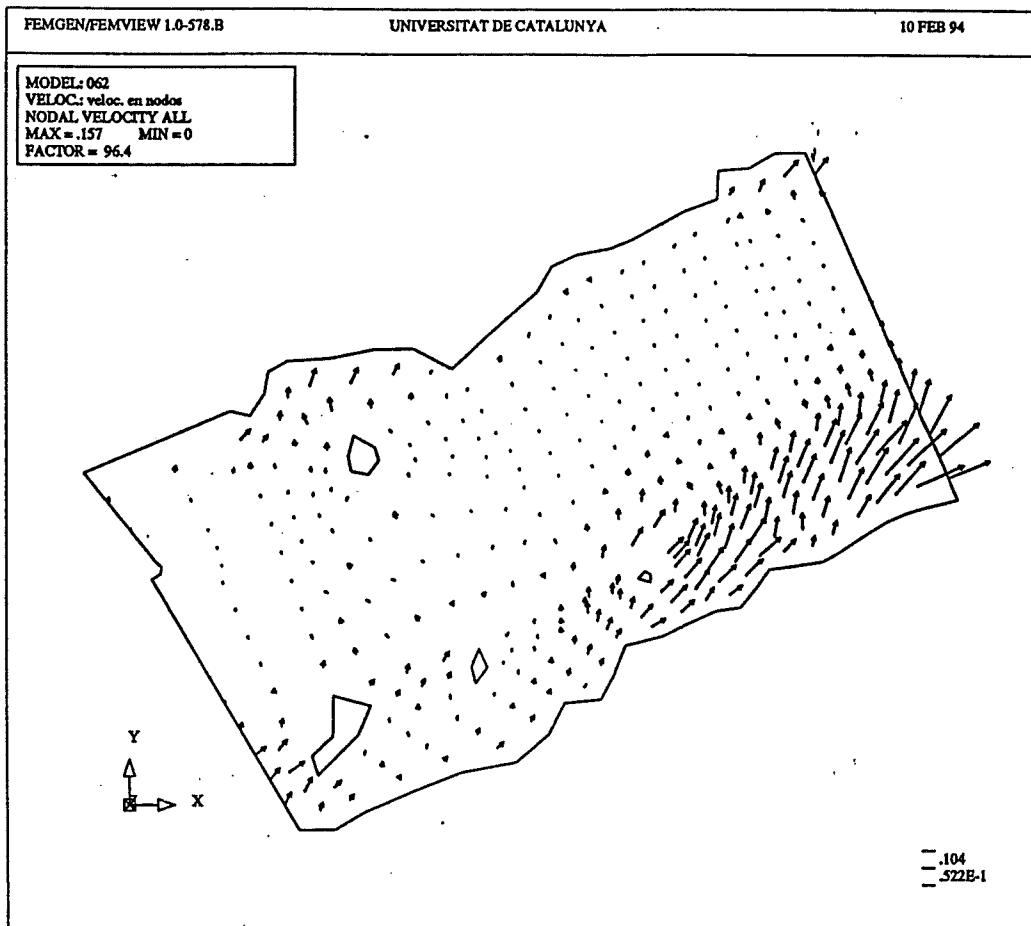


FIGURA 7.54. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento climatológico. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Dirichlet en los contornos W y E. Campo de velocidades superficiales. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

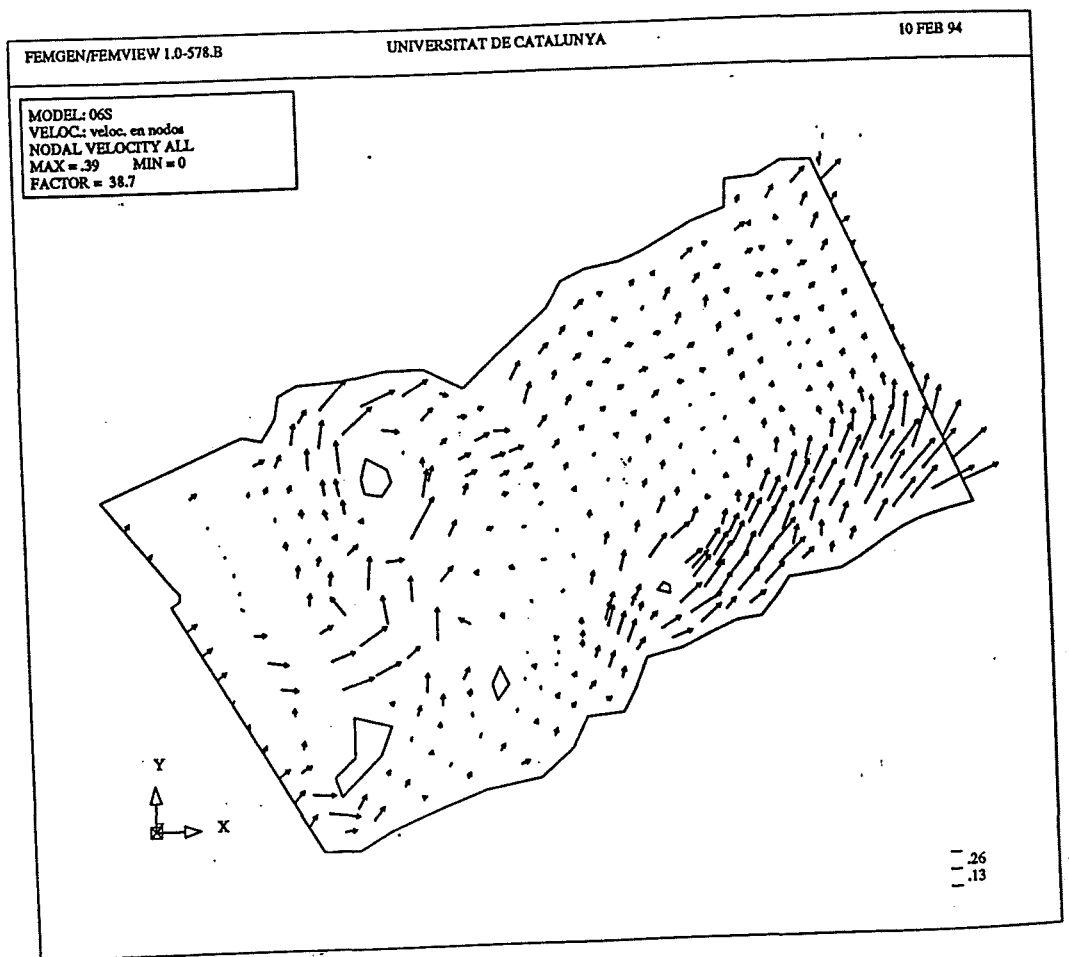


FIGURA 7.55. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento climatológico. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Dirichlet en los contornos W y E. Campo de velocidades en el fondo (extremo superior de la capa límite). Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

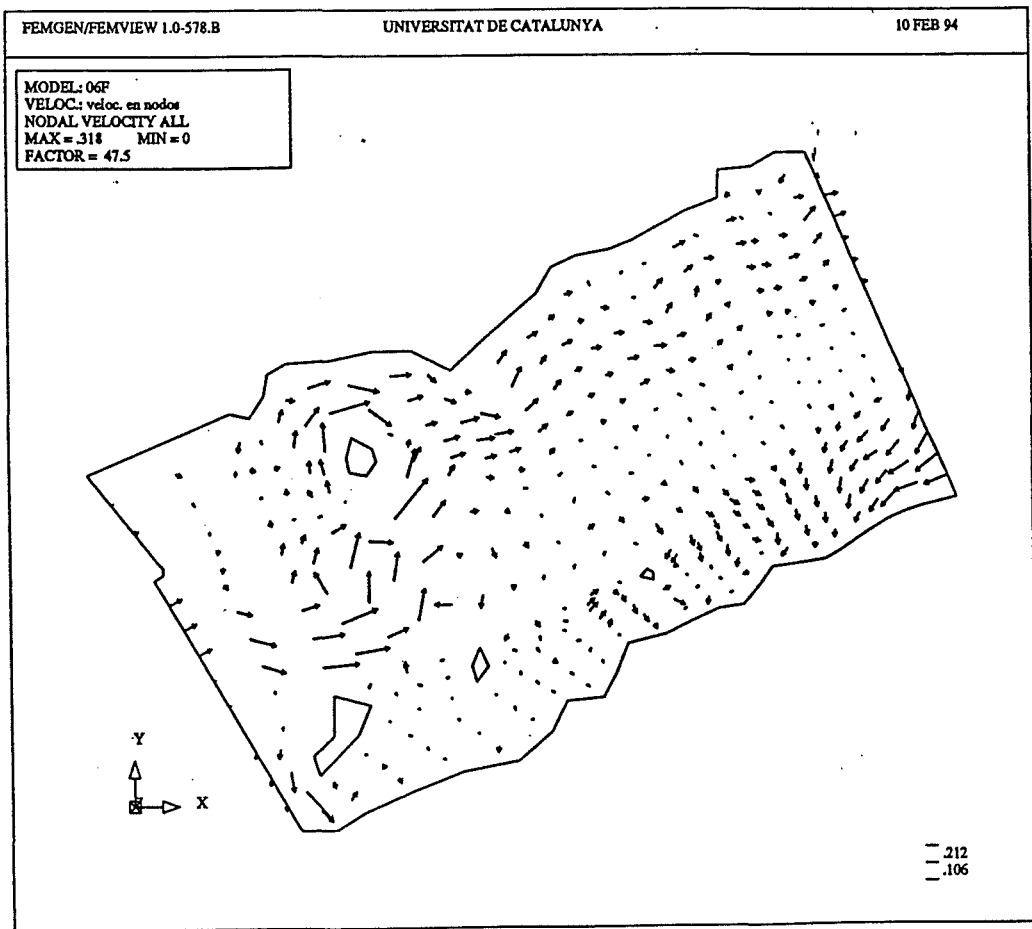


FIGURA 7.56. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento climatológico. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Dirichlet en el contorno W y Neumann homogéneas en el contorno E. Campo de velocidades medias (IDOFV=1). Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

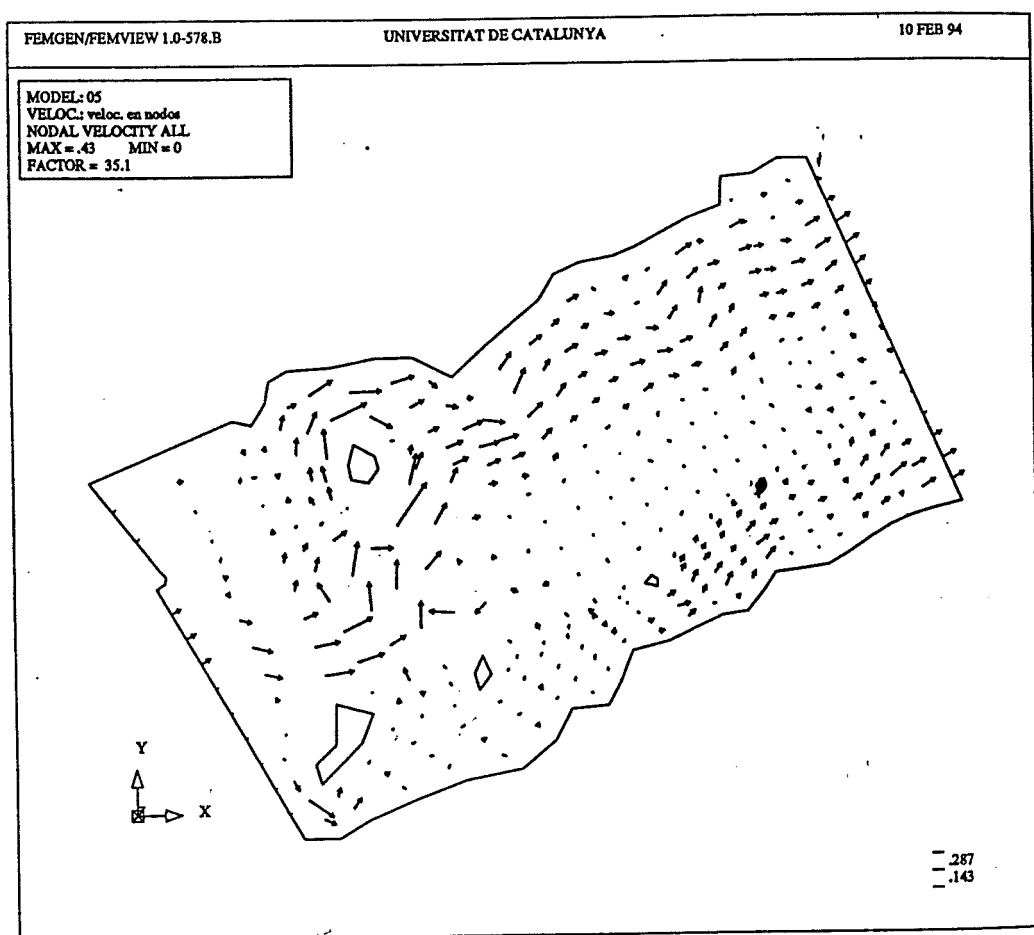


FIGURA 7.57. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento climatológico. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Dirichlet en el contorno W y Neumann homogéneas en el contorno E. Campo de alturas de superficie libre. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m.

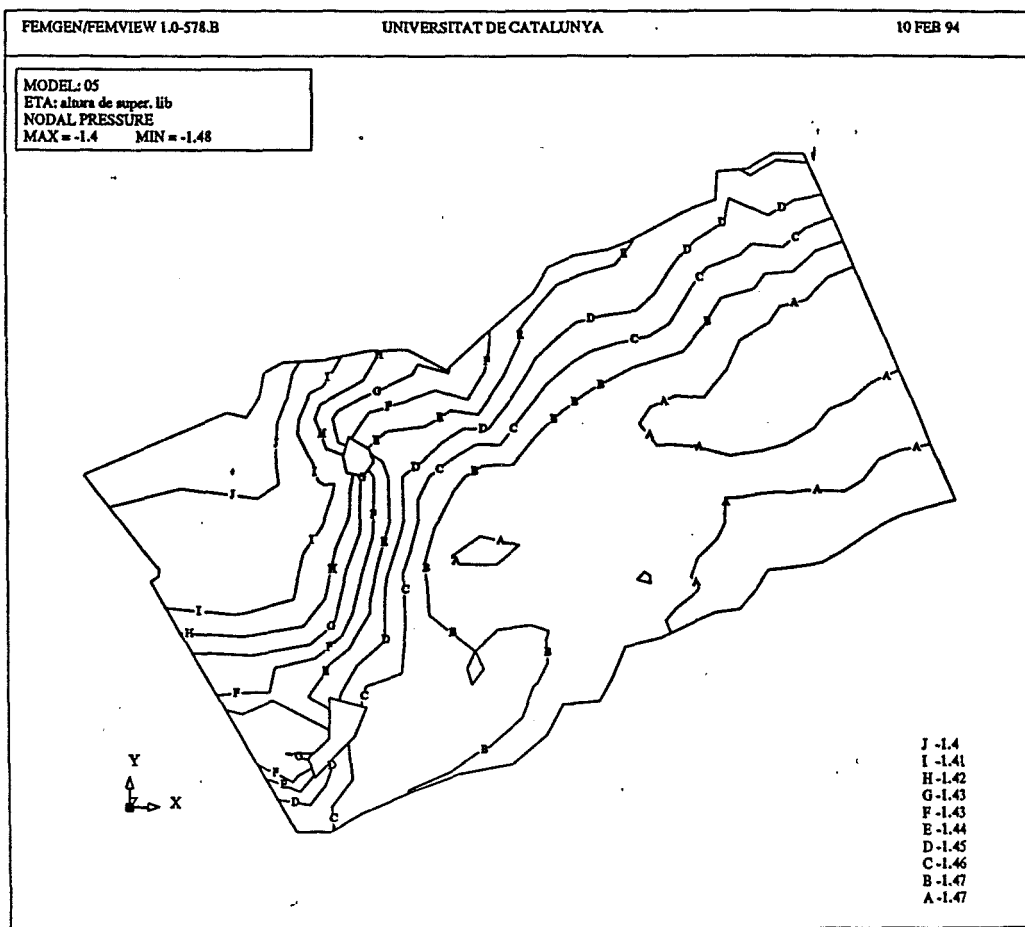


FIGURA 7.58. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento climatológico. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3$. Condiciones Dirichlet en el contorno W y Neumann homogéneas en el contorno E. Solución para el segundo grado de libertad vertical (IDOFV=2), de la velocidad. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

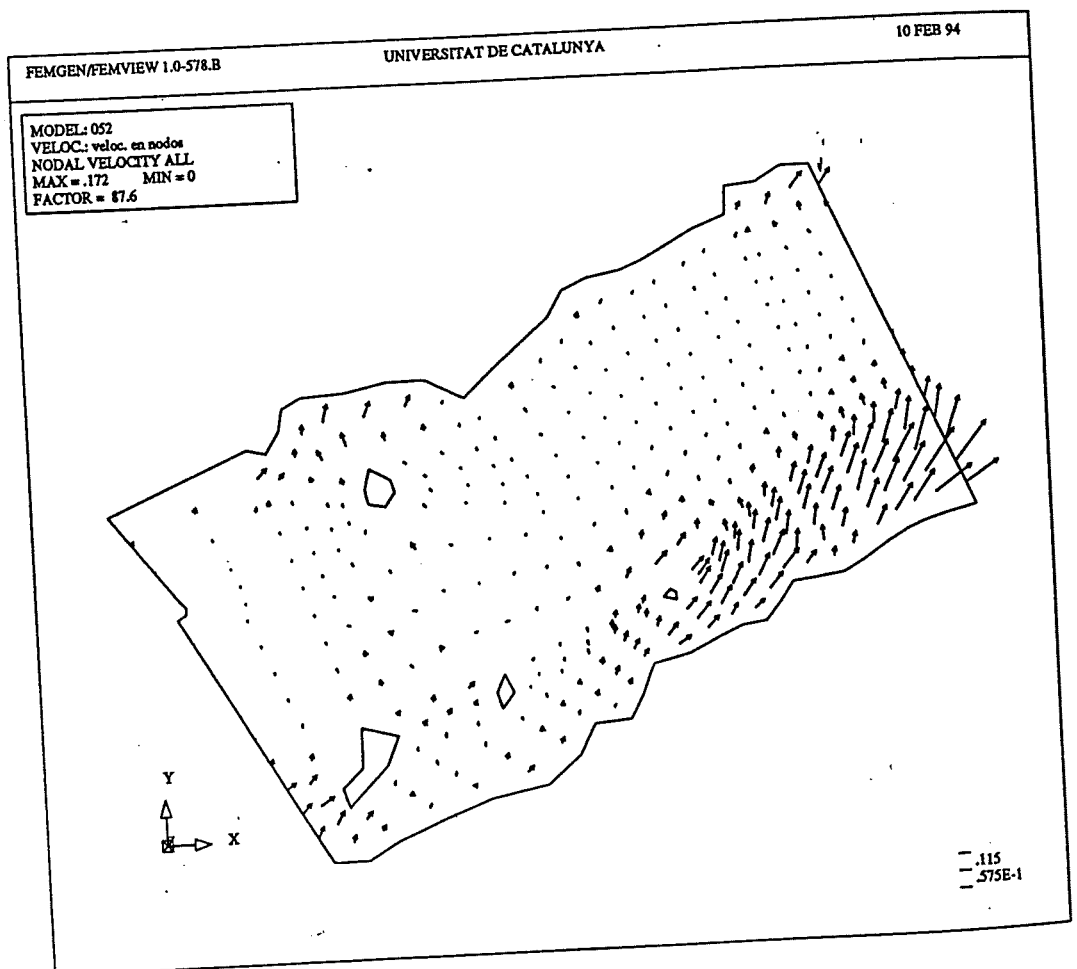


FIGURA 7.59. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento climatológico. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Dirichlet en el contorno W y Neumann homogéneas en el contorno E. Campo de velocidades superficiales. Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.

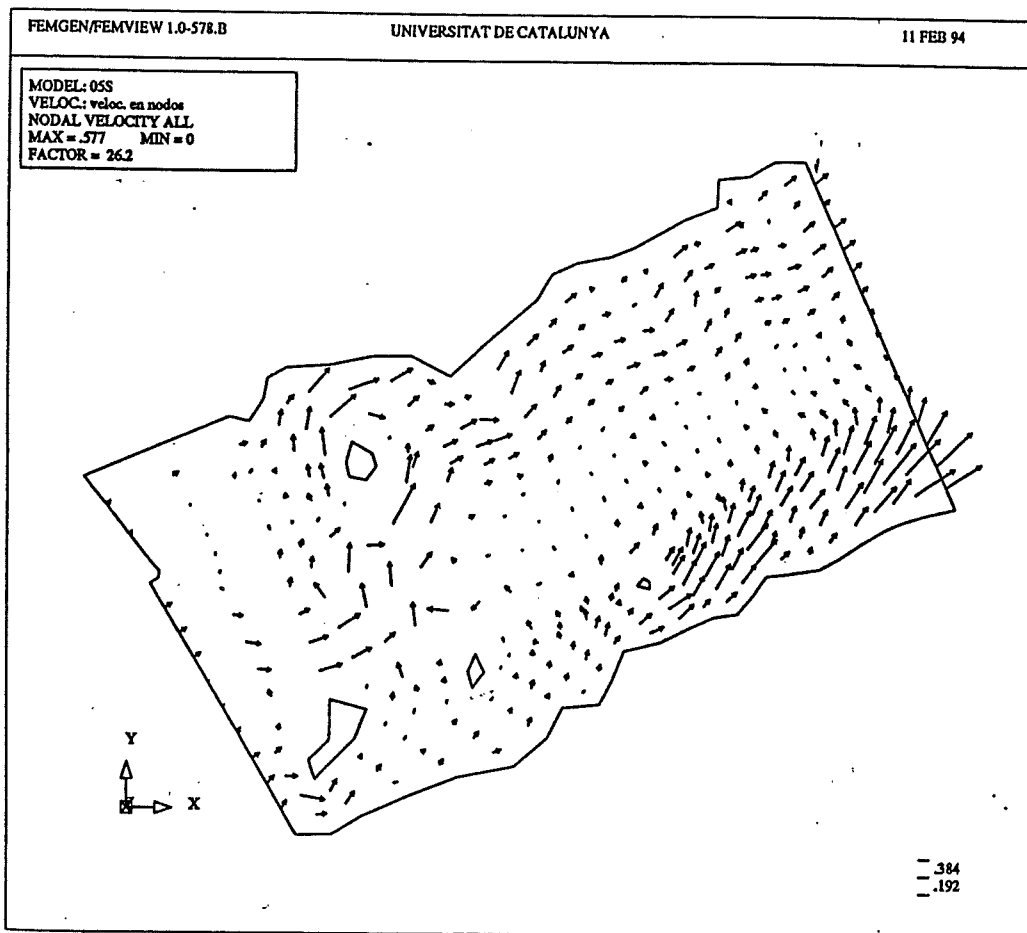
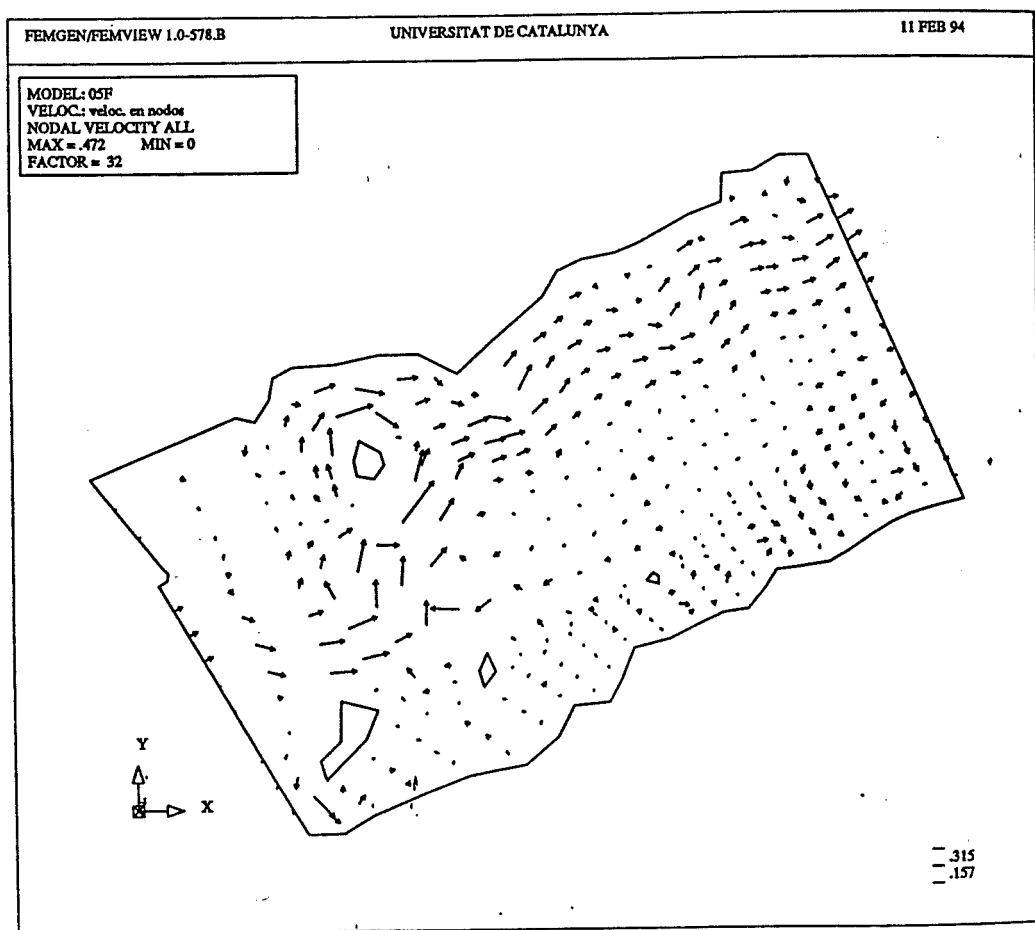


FIGURA 7.60. Caso: circulación en el Estrecho de Bransfield. Viento climatológico. $K_H=1000 \text{ m}^2/\text{s}$. $K_z=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. $\gamma=1 \text{ kg/m}^3\text{s}$. Condiciones Dirichlet en el contorno W y Neumann homogéneas en el contorno E. Campo de velocidades en el fondo (extremo superior de la capa límite). Resultados del modelo ECADIS. Unidades en m/s.



sólo sobre la plataforma continental de la Península Antártica es relevante la influencia del viento.

En conclusión, el modelo ECADIS ha permitido reproducir los rasgos de circulación residual que se conocían parcialmente. Observando que sólo sobre la plataforma continental de la Península Antártica es el viento quién determina el sentido de la corriente, mientras en el resto del área en estudio la componente geostrófica es la parte predominante en el flujo residual, siempre sin tener en cuenta la interacción no lineal con la corriente de marea.

Como último comentario, hay que decir que la fiabilidad de los resultados numéricos correspondientes a las velocidades de la corriente en superficie y en el fondo en zonas con profundidades importantes es discutible, habiéndose empleado solamente dos grados de libertad verticales en las simulaciones.