

*Estimación de la velocidad de sedimentación en condiciones de flujo
estratificado no estacionario en Zona de Máxima Turbidez -Desembocadura del
Río Magdalena, Colombia.*

Katherin Paola Ortiz Hernandez

Pregrado en Geología

Departamento de Física y Geociencias – Universidad del Norte

Universidad del Norte, Barranquilla

Mayo de 2020



*Estimación de la velocidad de sedimentación en condiciones de flujo
estratificado no estacionario en Zona de Máxima Turbidez -Desembocadura del
Río Magdalena, Colombia*

Katherin Paola Ortiz Hernandez

Pregrado de Geología

Departamento de Física y Geociencias – Universidad del Norte

Tesis presentada como requisito para optar al título de:

Geólogo

Director

Dr. Juan Camilo Restrepo L

Departamento de Física y Geociencias

Universidad del Norte

Universidad del Norte, Barranquilla

Mayo de 2020

*A mis amados padres,
quienes con su amor y esfuerzo
me apoyaron para culminar mis estudios.*

AGRADECIMIENTOS

*A Dios,
por darme la sabiduría y fuerza para culminar esta etapa académica.*

*A mi director Dr. Juan Camilo Restrepo López,
por ser apoyo incondicional a lo largo de mi instancia en la Universidad, y
por su dirección y enseñanza en mi desarrollo como profesional.*

*A Oscar G. Ospino,
por su apoyo en el desarrollo de este proyecto*

*A Carolina Martínez Mendoza,
por su dedicación y apoyo.*

*A la Universidad del Norte,
por brindarme los recursos materiales y académicos
para la realización de este proyecto.*

*A mi familia,
por su amor y apoyo permanente.*

*A todos mis amigos que estuvieron presentes en este proceso,
por su apoyo y motivación.*

RESUMEN

Con el fin de evaluar la influencia de la variabilidad del tamaño de las partículas en la estimación de la velocidad de sedimentación, se realizaron mediciones verticales de tamaño de grano y concentración de sedimentos en suspensión en época de bajo caudal (marzo/2018) a 3 km de la desembocadura del río Magdalena. Posteriormente, con los datos de campo se estimaron las propiedades texturales de los sedimentos y la velocidad de sedimentación, mediante modelos estadísticos utilizando las ecuaciones de Agrawal y Pottsmith (2000), Mikkelsen y Pejrup (2001), Gibbs (1985), y Sternberg et al. (1999); métodos físicos, utilizando la ley de Stokes, y métodos físicos modificados utilizando la ley de Stokes ajustada a la variabilidad del tamaño de las partículas. De acuerdo con las propiedades texturales, el tamaño de las partículas suspendidas corresponde a 15% arena y 85% limo. El 39.2% de las partículas estaban pobremente clasificadas, y el 60.8% muy pobremente clasificadas. El 48,1% presentaron asimetría positiva, 49.5% simetría y el 2.4% asimetría negativa. El 1.4% de los datos presentaron distribución muy platicúrtica, el 66% platicúrtica, el 32.2% mesocúrtica, y el 0.4%, leptocúrtica. La distribución del tamaño de partículas mostró tendencia a la fracción fina en la capa superficial, y tendencia a la fracción gruesa en la capa fondo. Los valores medios de velocidad de sedimentación obtenidos por los modelos estadísticos, ley de Stokes, y la ley de Stokes modificada fueron $0.16 \text{ mm s}^{-1} \pm 0.10$, $0.15 \text{ mm s}^{-1} \pm 0.16$, y $14.9 \text{ mm s}^{-1} \pm 9.5$, respectivamente. Los coeficientes de determinación obtenidos a partir de los 7272 datos de tamaño medio de partícula son mayores a 0.97 para el método experimental; 0.92 para la ley de Stokes, y 0.58 para la ley de Stokes modificada. Finalmente, la variabilidad del tamaño del grano aumentó la velocidad de sedimentación promedio en dos órdenes de magnitud.

Palabras clave: Velocidad de sedimentación, propiedades del sedimento, distribución de tamaño, material particulado en suspensión (MPS), floculación, Río Magdalena.

ABSTRACT

In the low flow season (March/2018) suspended sediments grain size, and measurements of vertical concentration at 3 km from the Magdalena river mouth were made to evaluate the influence of the particle size variability in the settling velocity estimation. Subsequently, textural sediment properties and settling velocity were estimated with the measurement data, through statistical models using Agrawal and Pottsmith (2000), Mikkelsen and Pejrup (2001), Gibbs (1985), and Sternberg et al (1999) equations; physics methods using Stokes' law and modified physics methods using Stokes' law adjusted to the particle size variability. According to the textural properties, suspended particles size corresponds to 15% sand and 85% silt. 39.2% of the particles were poorly classified, and 60.8% very poorly classified. 48.1% had positive asymmetry, 49.5% symmetry, and 2.4% negative asymmetry. The 1.4% of the data presented a very platykurtic distribution, 66% platykurtic, 32.2% mesokurtic, and 0.4%, leptokurtic. The particle size distribution showed a tendency to the fine fraction in the surface layer, and a tendency to the coarse fraction in the bottom layer. Furthermore, the mean settling velocity values obtained by the statistical models, Stokes' law, and the modified Stokes' law were $0.16 \text{ mm s}^{-1} \pm 0.10$, $0.15 \text{ mm s}^{-1} \pm 0.16$, and $14.9 \text{ mm s}^{-1} \pm 9.5$, respectively. Also, the determination coefficients obtained from the 7272 mean particle size data are greater than 0.8 for the experimental methods; 0.73 for Stokes' law, and 0.67 for modified Stokes' law. Finally, the grain size variability increased the mean of settling velocity in two orders of magnitude.

Keywords: Settling velocity, sediment properties, size distribution, suspended particulate matter (MPS), flocculation, Magdalena river.

TABLA DE CONTENIDO

1.INTRODUCCION	1
1.1.Contexto general	1
1.2.Problema de investigación y pregunta problema	2
1.3.Marco Teórico.....	3
2.OBJETIVOS	7
2.1.Objetivo General	7
2.2.Objetivos Específicos.....	7
3.AREA DE ESTUDIO	7
4.METODOLOGIA	10
4.1.Mediciones en campo.....	10
4.2.Procesamiento de datos	11
4.2.1.Propiedades texturales del sedimento.....	11
4.2.2.Distribución del tamaño de partículas.	12
4.2.3.Cálculo de velocidad de sedimentación.....	12
5.RESULTADOS.....	14
5.1.Propiedades texturales de los sedimentos	14
5.2.Distribución del tamaño de la partícula.....	16
5.3.Velocidad de sedimentación.....	17
5.3.1.Velocidad de sedimentación - métodos experimentales.....	17

5.3.2.Velocidad de sedimentación calculada a partir de métodos físicos.....	20
5.3.3.Velocidad de sedimentación calculada a partir de métodos físicos ajustados a la variabilidad del tamaño de partícula.....	21
6.DISCUSIONES.....	24
6.1.Propiedades texturales del sedimento	24
6.2.Distribución del tamaño de partículas	26
6.3.Velocidad de sedimentación.....	27
7.CONCLUSIONES	29
8.REFERENCIAS.....	31
9.ANEXOS	38

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valor obtenido de los parámetros granulométricos de los sedimentos.	16
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. A) Área de estudio; B) Serie de niveles medios mensuales del río Magdalena en la Estación Calamar – Bolívar.	8
--	---

Figura 2. Propiedades texturales del sedimento en suspensión mediante el método de Folk y Ward (1957) y ciclo de marea. A) Tamaño medio (LF - Lodo fino, LM - Lodo medio, LG - Lodo Grueso, AMF - Arena muy fina, AF - Arena fina); B) Selección (MPC- Muy pobremente seleccionado, PC – Pobremente seleccionado); C) Asimetría (MAF – Muy asimétrico hacia finos, AF - Asimétrico	
---	--

hacia finos, A - Asimétrico, AG - Asimétrico hacia gruesos) y; D) Curtosis (L – Leptocúrtico, M – Mesocúrtico, P – Platicúrtico, MP – Muy platicúrtico)..... 14

Figura 3. Distribución del tamaño de partículas en la capa superficial, media y fondo con ajuste Gaussiano. A) Perfil 8; B) Perfil 25; C) Perfil 43 y; D) Perfil 60..... 17

Figura 4. Velocidad de sedimentación en el tiempo y ciclo de marea. A) Agrawal y Pottsmith (2000); B) Mikkelsen y Pejrup (2001); C) Gibbs (1985); D) Sternberg et al. (1999). 18

Figura 5. Velocidad de sedimentación en el tiempo, calculada a partir de la ley de Stokes, y el ciclo de marea. 20

Figura 6. Velocidad de sedimentación en el tiempo, calculada a partir de la ley de Stokes modificada, y el ciclo de marea. 21

Figura 7. Relación entre el tamaño de partículas (μm) y la velocidad de sedimentación (mm s^{-1}) obtenida a partir de las formulaciones de A) Agrawal y Pottsmith (2000); B) Mikkelsen y Pejrup (2001); C) Gibbs (1985); D) Sternberg et al. (1999); E) Ley de Stokes; y F) ley de Stokes modificada..... 22

Figura 8. Relación entre el tamaño de partículas (μm) y la velocidad de sedimentación (mm s^{-1}) obtenida a partir de las formulaciones de los modelos estadísticos, ley de Stokes y la ley de Stokes ajustada a la variabilidad del tamaño de partícula. 23

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Valores promedios de velocidad de sedimentación de cada ecuación de los 72 perfiles 38

Anexo 2. Distribución del tamaño de partículas en la capa superficial, media y fondo con ajuste Gaussiano de los 72 perfiles. 40

1. INTRODUCCION

1.1. Contexto general

En ambientes estuarinos el Material Particulado en Suspensión (MPS) está conformado principalmente por componentes de partículas como arena no cohesiva, lodo cohesivo y materia orgánica (Manning, y Schoellhamer, 2013). El incremento de la concentración de (MPS) aumenta la probabilidad de colisión de partículas, favoreciendo el proceso de floculación (Pejrup y Mikkelsen, 2010). En estas condiciones, la presencia de material cohesivo dentro del MPS influye de manera significativa en el transporte y la depositación de sedimentos, y por lo tanto, en la morfología estuarina (Tassew, Bergland, Dinamarca y Bakke, 2019). Por consiguiente, un aspecto clave para entender mejor los procesos de cambio morfológico y de sedimentación en estuarios consiste en determinar la velocidad de caída de grano, que a su vez es afectada por los procesos de floculación (Dyer y Manning, 1999; Soulsby, Manning, Spearman y Whitehouse, 2013).

La floculación genera cambios en la densidad efectiva de las partículas y en el espacio recorrido por una partícula suspendida antes de sedimentarse (Mhashhash, Bockelmann, Pan, 2017). Por lo que en última instancia afecta la velocidad de sedimentación de las partículas, debido a que esta depende fundamentalmente de su tamaño y densidad efectiva. Por consiguiente, la velocidad de sedimentación es una variable esencial dentro de las aplicaciones de ingeniería, tales como el transporte de sedimentos, los procesos de depositación, los dragados, el diseño de puertos, y el monitoreo de la estabilidad de las estructuras costeras y marinas (Nasiha y Shanmugam, 2018).

Se ha puesto mucho énfasis en la creación de técnicas para calcular la velocidad de sedimentación, dando como resultado el desarrollo de métodos experimentales, métodos teóricos basados en las leyes de Newton, y métodos teóricos que incorporan las variaciones de tamaño de partículas. Esta última aproximación conduce a la idea de que la variabilidad del tamaño de las

partículas y la distribución del tamaño de grano son factores esenciales en la determinación de la velocidad de sedimentación. En este sentido, el interés de este trabajo se ha centrado en conocer cómo influye la variabilidad del tamaño de las partículas en la estimación de la velocidad de sedimentación.

1.2. Problema de investigación y pregunta problema

La velocidad de sedimentación tiene un papel central dentro de los procesos de sedimentación de canales y estuarios. Por lo tanto, es un aspecto que debe ser considerado en los análisis de las condiciones de navegabilidad de un canal. Por ejemplo, la desembocadura del río Magdalena presenta una acumulación significativa de sedimentos en diferentes sitios del canal, generando un alto costo de mantenimiento para garantizar el tráfico marítimo seguro hacia el puerto de Barranquilla ([Higgins, Restrepo, Otero, Ortiz, y Conde., 2017](#)). Se ha considerado que la alta concentración de sedimentos dentro de la Zona de Máxima Turbidez (ZMT) y la estratificación presente en el río Magdalena durante la época bajos caudales favorecen la formación de agregados de mayor tamaño, los cuales se sedimentan con una mayor velocidad ([Restrepo, 2018](#); [Ospino, 2019](#)).

Actualmente, una de las principales limitantes en el entendimiento de la dinámica sedimentaria está en seleccionar un método apropiado para la estimación de la velocidad de sedimentación, que permita incorporar las propiedades texturales de los sedimentos. Incluyendo su distribución de tamaño de grano. En este contexto, la desembocadura del río Magdalena parece ser un escenario propicio para estudiar la variabilidad de los parámetros granulométricos de los sedimentos en suspensión y su importancia en la estimación de la velocidad de sedimentación. Teniendo en cuenta los puntos considerados por [Restrepo et al. \(2018\)](#): (1) Presencia de la ZMT en la interfase de agua dulce y salada con una variación estacional marcada; (2) Facilidad para estimar la posición

de la ZMT a partir de caudales y salinidad; (3) Es un sistema estratificado influenciado por flujos no-estacionarios; y (4) Evidencia que indica que las condiciones de turbidez y tamaño del MPS inciden en la eficiencia de la floculación. Estas condiciones son claves para evaluar cómo cambian las propiedades de los sedimentos debido a las variaciones hidrodinámicas y los aportes fluviales, y cómo estos a su vez puede influir en la estimación de la velocidad de caída de grano.

Con el fin de comprender la importancia de los procesos de depositación en la zona de desembocadura, se pueden plantear las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuál es la variabilidad del tamaño de las partículas en condiciones de flujo estratificado no estacionario?, ¿Cómo difiere la velocidad de sedimentación con métodos tradicionales, experimentales y teóricos, y la ley de Stokes ajustada a la variabilidad del tamaño de grano? Y de esta manera poder dar respuesta a ¿Cómo influye la variabilidad del tamaño de las partículas en los modelos implementados para estimar la velocidad de sedimentación?.

1.3. Marco Teórico

La velocidad de sedimentación, también conocida como velocidad de caída de grano, se refiere a la tasa de depositación de los sólidos suspendidos en un medio fluido ([Dietrich, 1982](#)). Es un parámetro frecuente en los análisis cuantitativos del transporte de sedimento, el cual ayuda en el entendimiento de la dinámica de los sedimentos en las aguas costeras, estuarinas y portuarias ([Salinas-Tapias y García 2011](#); [Nasiha Shanmugam, Sundaravadivelu, 2019](#)). En la estimación de la velocidad de sedimentación influyen factores como el tamaño, forma y densidad de la partícula ([Nasiha y Shanmugam, 2018](#)). Por ende, la caracterización efectiva de los sedimentos permite entender mejor la dinámica de los procesos de sedimentación ([Sahin, Guner, Ozturk y Sheremet, 2017](#)).

En ambientes estuarinos los sedimentos son principalmente una mezcla de diferentes componentes de partículas, como arena no cohesiva, lodo cohesivo y materia orgánica (Manning y Schoellhaer, 2013). Las partículas de sedimento cohesivo difieren en su comportamiento de las partículas no cohesivas debido a su capacidad de floculación (Eisma, 1986; Fettweis y Baeye, 2015). La carga electrostática es la responsable del comportamiento cohesivo del sedimento, y permite la unión de partículas primarias (Dyer y Manning, 1999). Por ende, estas partículas finas y cohesivas ejercen un impacto significativo en los procesos biogeoquímicos, ecológicos y geomorfológicos (Schwarz et al., 2017).

Diversas investigaciones han podido establecer que la mayoría del MPS presente en los ecosistemas estuarinos se encuentra en forma de flocs (Eisma, 1986; Manning, 2004; Fettweis, Francken, Pison, Van den Eynde, 2006). Por consiguiente, el fenómeno de la floculación posee un papel importante en los procesos de transporte de sedimentos (Mhashhash et al., 2017). Influyendo en la magnitud de la velocidad de sedimentación de las partículas (Guo He, Guo, Winterwerp, 2017). Algunos estudios han documentado que la velocidad de sedimentación de los flocs es ordenes de magnitud mayores que las de las partículas primarias (Whitehouse, Soulsby, Robert y Mitchener, 2000; Manning, 2004; Guo et al., 2017). Esto conlleva a que la estimación de la velocidad de sedimentación del sedimento cohesivo dentro de un entorno estuarino sea más compleja debido a que las partículas cohesivas pueden flocular y formar formas de flóculos irregulares (Dyer y Manning, 1999).

Para la estimación de la velocidad de sedimentación se han utilizado fórmulas empíricas obtenidas a partir de mediciones en tanques de sedimentación, o mediciones in situ con cámara de video e instrumentos de difracción láser (Gibbs, 1985; Shi et al., 2003; Mikkelsen y Pejrup 2001; Manning, 2004). Basándose en parámetros como el diámetro medio de las partículas, la tensión de

corte y la concentración de sedimentos en suspensión. La aplicabilidad de estas ecuaciones puede variar de un ambiente a otro, debido a la disponibilidad de sedimentos suspendidos, y las propiedades de las partículas (Mhashhash et al., 2017). Otros autores utilizan fórmulas basadas en las leyes de la física, como muy conocida Ley de Stokes (Kineke y Sternberg, 1989; Guo et al., 2017; Huang, 1993; Higgins et al., 2017). Sin embargo, esta formulación de Stokes solo es aplicable a partículas rígidas y esféricas, dentro de fluidos no turbulentos (Mhashhash et al., 2017). Por ello, no es apropiada para la estimación de la velocidad de sedimentación de las partículas cohesivas (Mhashhash et al., 2017; Nasiha et al., 2019). Recientemente, se ha modificado la ley de Stokes para incluir la dimensión fractal o la distribución del tamaño de las partículas; y así, lograr una mejor estimación de la velocidad de sedimentación (Chen y Eisma, 1995; Winterwerp, 1998; Dyer y Manning, 1999; Maggi, Mietta y Winterwerp, 2007). La dimensión fractal hace relación a las propiedades geométricas de los flocs (Maggi et al., 2007). Esta está basada en propiedades texturales como el área y el perímetro de cada floc (Maggi and Winterwerp, 2004). Formas complejas y ramificadas presentan una baja dimensión fractal; mientras que las formas compactas, alta dimensión fractal (Bushell et al., 2002). Por otro lado, se ha comenzado a cuantificar la distribución de tamaño de las partículas suspendidas, utilizando métodos de difracción laser y de captura de imágenes (Mikkelsen, Hill, Milligan y Chant, 2005; Uncles Bale, Stephens, Frickers y Harris, 2010) con el fin de incorporar todos los rangos de tamaño de partícula/floc y la variación de la densidad efectiva en la cuantificación de velocidades de sedimentación.

Si bien, la velocidad de sedimentación depende del tamaño y densidad de los flocs, estas propiedades experimentan variaciones a escala espacial y temporal (Uncless et al., 2010; Papenmeier, Schrottke, Bartholomä, 2014). Por ejemplo, en la ZMT del Estuario del Río Yangtzé

las propiedades de los sedimentos presentan fuertes variaciones temporales y verticales dentro de un ciclo de marea, lo que conlleva a una variación en la velocidad de sedimentación (Guo et al., 2017). Igualmente, en el Sur del mar del Norte las propiedades del sedimento en suspensión presentan una variación marcada por la estacionalidad presente en el área geográfica, la cual influye en la magnitud de la velocidad de sedimentación (Fettweis y Baeye, 2015).

Estas variaciones están relacionadas con las condiciones no estacionarias de flujo y con la turbulencia (Uncless et al., 2010; Papenmeier, et al., 2014). Las condiciones no estacionarias de flujo han demostrado ser un factor influyente en la penetración del frente salino (Ospino, Restrepo, Otero, Pierini, Alvarez, 2018). Favoreciendo o atenuando la estratificación de la columna de agua durante época de bajo y alto caudal, respectivamente (Ospino et al., 2018). Los sedimentos cohesivos quedan atrapados y concentrados en el frente salino (Restrepo, 2014). Además la presencia del frente salino aumenta la salinidad de la columna de agua y favorece el proceso de floculación (Ospino et al., 2015; Wan, Wu, Roelvink y Gu, 2015). Por lo tanto, durante la mayor penetración de la cuña salina, se dan las condiciones más favorables para la turbulencia, estratificación y alta concentración de sedimentos (Restrepo et al., 2018). Por otro lado, la turbulencia es la principal causante de las colisiones entre partículas, fortaleciendo la floculación a través del incremento de las tasas de colisión, hasta que el esfuerzo turbulento excede el esfuerzo de corte de los enlaces de los flocs y genere su ruptura (Eisma, 1986; Whitehouse et al., 2000; Uncles et al., 2010). Por lo tanto las propiedades de los sedimentos experimentan variaciones a escala espacial y temporal dependiendo del fortalecimiento o debilitamiento del proceso de floculación que causan las condiciones no estacionarias de flujo y turbulencia (Uncless et al., 2010; Papenmeier, et al., 2014).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Evaluar la influencia de la variabilidad del tamaño de las partículas primarias en los modelos implementados para estimar la velocidad de sedimentación en la ZMT del río Magdalena.

2.2. Objetivos Específicos

- Identificar las propiedades texturales de los flocs en condiciones de flujo estratificado no estacionario.
- Estimar la velocidad de sedimentación mediante modelos estadísticos, la ley de Stokes y la ley de Stokes modificada.
- Identificar la diferencia entre la velocidad de sedimentación con métodos tradicionales y el método ajustado a la variabilidad del tamaño de grano.

3. AREA DE ESTUDIO

El río Magdalena es el río más largo e importante de Colombia ([Bernal, 1996](#)). Nace en la cordillera Central y desemboca en el Mar Caribe. Cuenta con una extensión de 1.540 km y 250.000 km² de área de drenaje ([Restrepo, 2014](#)). El delta posee una boca principal ubicada al oriente de la ciudad de Barranquilla, Bocas de Ceniza; y una secundaria al sur de Cartagena, el Canal del Dique ([Bernal, 1996](#)). Actualmente, el delta presenta forma de arco, con un área de 1.690 km² ([Restrepo, 2014](#)). Según la calificación de [Galloway \(1975\)](#) es un delta de dominio mixto, influenciado por aportes fluviales y por el oleaje (i.e. fluvio-wave dominated type). La marea en el delta es diurna mixta ([Higgins, 2017](#)), con un rango micromareal entre 0.48m y 0.64m ([Kjerfve, 1981](#)). A nivel mundial, el delta del río Magdalena es considerado como uno de los ecosistemas marinos-costeros más importantes en el mundo, principalmente por su aporte fluvial y transporte de sedimentos hacia el Mar Caribe ([Restrepo et al., 2018](#)). Aporta el 26% de la descarga fluvial total de la cuenca

del Mar Caribe, siendo el río que mayor cantidad de agua dulce le aporta (Restrepo, 2014). Posee un caudal medio anual de $6501 \pm 1370 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y transporta hasta $142 \pm 48.6 \times 10^6 \text{ ton a}^{-1}$ de sedimentos en suspensión al Mar Caribe, uno de los más altos a nivel mundial (Restrepo, 2014).

En el delta del río Magdalena existe una estacionalidad marcada por su ubicación geográfica (Ortiz, Otero, Restrepo, Ruiz y Cadena, 2013). Durante el año, se presentan dos periodos climáticos: una época seca y una época húmeda, influenciada por la ZCIT (Restrepo et al., 2014). La época seca comprende los meses entre diciembre y abril, cuando la ZCIT se desplaza hacia el Norte; y la época húmeda desde agosto a noviembre, cuando la ZCIT se desplaza al Sur, y una transición entre mayo y julio (Ortiz et al., 2013). Afectando el caudal y transporte de sedimentos hacia el Mar Caribe (Higgins et al., 2017; Restrepo et al., 2016; Restrepo et al., 2014).

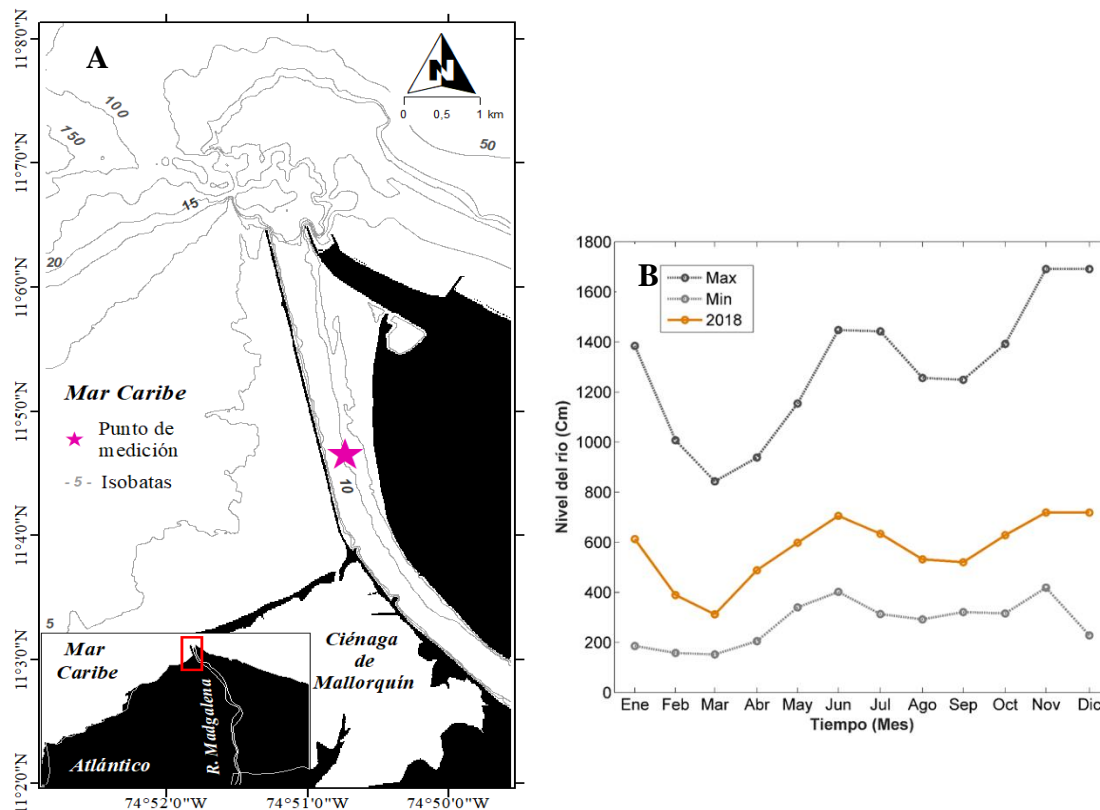


Figura 1. A) Área de estudio; B) Serie de niveles medios mensuales del río Magdalena en la Estación Calamar – Bolívar (Ospino, 2019).

Durante la época seca, el caudal medio es $4360.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y la tasa media de transporte de sedimentos en suspensión es $218 \times 10^3 \text{ ton d}^{-1}$, mientras que durante la época húmeda, el caudal medio aumenta hasta $8063.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y la tasa media de transporte de sedimento en suspensión $531 \times 10^3 \text{ ton d}^{-1}$ (Restrepo et al., 2014). El transporte de fondo corresponde a entre el 5% y el 1% del sedimento en suspensión en las épocas húmedas y seca, respectivamente (Higgins et al., 2017). Los promedios del transporte de sedimento de fondo por unidad de masa, estimados por Higgins et al. (2017) a 7km de la desembocadura del río Magdalena, se hicieron a través de las formulaciones de Meyer-Peter & Müller (1948), Nielsen (1992) y Ribberink (1998), y presentaron valores de 5,1; 7,7 y $8,4 \times 10^6 \text{ ton a}^{-1}$, respectivamente, durante la época húmeda; y 0,75; 1,2 y $1 \times 10^6 \text{ ton a}^{-1}$, durante la época seca. La velocidad de caída del grano para la época seca y húmeda, en este mismo lugar, fueron comparados por Higgins et al., (2017), mediante la distribución de Rouse y la ecuación modificada de Rouse; presentando promedios de velocidad de sedimentación para la época seca de $0,53 \pm 0,19 \text{ mm s}^{-1}$ y $1,53 \pm 0,55 \text{ mm s}^{-1}$, respectivamente, y para la época húmeda $0,50 \pm 0,29 \text{ mm s}^{-1}$ y $1,42 \pm 0,93 \text{ mm s}^{-1}$ respectivamente, registrando una disminución en la velocidad de caída del grano durante la época seca.

Las propiedades del material particulado en suspensión también se ven influenciadas por la estacionalidad presente en el delta del río Magdalena (Restrepo et al., 2016). Restrepo et al. (2016) estimó los tamaños dominantes del material particulado en suspensión observado durante cada época: En época húmeda predominan limos gruesos (76.4%), seguido de partículas tamaño arena (7.1%) y arcilla (16.5%), mientras que en época seca, predominan limos medios (65.4%), disminuye el contenido de arena (1.9%) y aumenta el contenido de arcillas (32.7%).

En cuanto a la distribución y concentración de los sedimentos en suspensión fueron evaluados por Ospino (2019), en condiciones de bajo caudal y varios ciclos de marea, a 3 km de

la desembocadura garantizando la formación de una zona de máxima turbidez (ZMT). La distribución de las partículas muestra un sistema dominado por los sedimentos finos en la superficie y capa media, y con una distribución bi-modal en el fondo durante las bajamares. Mientras que en pleamares la distribución de tamaño del fondo tiende hacia los sedimentos gruesos. Los valores de concentración de sedimentos, expresados en volumen de concentración (VC) en la desembocadura comprenden variaciones entre $120 \mu\text{L L}^{-1}$ y $1350 \mu\text{L L}^{-1}$ (Ospino, 2019). Durante los periodos en los que se presentan las mayores concentraciones del sedimento en suspensión ($>500 \mu\text{L L}^{-1}$) se desarrolla la ZMT en la capa media y fondo de la columna de agua; mientras que cuando se presentan las menores concentraciones ($<500 \mu\text{L L}^{-1}$) el MPS es más homogéneo a lo largo de la columna (Ospino, 2019). Los descensos del caudal favorecen la estratificación de la columna de agua alcanzando la mayor penetración de la cuña salina aproximadamente a 7 km aguas arriba de la desembocadura; mientras que en altos caudales dicha estratificación solo alcanza a penetrar hasta 0.4 km (Restrepo et al., 2016; Restrepo et al., 2018). La posición del frente salino no solo está dominada por el caudal, el forzamiento micro-mareal también ha demostrado ser un factor importante en la penetración de la cuña, favoreciendo el aumento en el grosor y progresión del frente de agua salina durante marea alta. (Ospino et al., 2018).

4. METODOLOGIA

4.1. Mediciones en campo

Con el fin de identificar las propiedades texturales de los flocs y evaluar la influencia de la variabilidad del tamaño de las partículas en la estimación de la velocidad de caída de grano, se realizó una medición de tamaño de partículas y concentración de sedimentos en épocas de bajos caudales (marzo 14 – 17/ 2018) a 3 km de la desembocadura del río Magdalena. Garantizando la

presencia del frente salino en el punto de medición y la formación de una ZMT. La toma de datos se realizó durante 4 días, con el fin de abarcar diferentes condiciones de marea y caudal (Restrepo *et al.*, 2018). Durante esta campaña se realizaron mediciones horarias de concentración y distribución de tamaño del sedimento a lo largo de la columna de agua. Dichas mediciones se obtuvieron con sensores ópticos de difracción laser *in-situ* LISST-200X (*Laser In-Situ Scattering Techniques – LISST*) a una tasa de muestreo de 1 Hz. Este instrumento proporciona la concentración de sedimento en 36 diferentes clases de tamaño de partículas, desde 1 μm hasta 500 μm . En total se obtuvieron 72 perfiles de concentración y distribución de tamaño de sedimentos en suspensión entre el 14 y 17 de marzo.

4.2. Procesamiento de datos

4.2.1. Propiedades texturales del sedimento

Para la determinación de las propiedades texturales de los sedimentos se procesó la información obtenida con el LISST-200X, en el software GRADISTAT (Blott y Pye, 2001). Este software proporciona parámetros estadísticos como el D_{10} , D_{50} , D_{90} , tamaño medio de grano, selección, curtosis y asimetría, calculados mediante el método gráfico de Folk y Ward (1957). El programa también proporciona una descripción física del grupo textural al que pertenece la muestra (i.e. arena fina, limo grueso) a partir de la escala de tamaño modificada por Udden (1914) y Wentworth (1922). Los parámetros granulométricos (Tamaño medio, selección, asimetría y curtosis) fueron procesados en el software MATLAB (R2015a) empleando la técnica de interpolación lineal para homogeneizar el conjunto de datos y posteriormente representarlos en gráficos de contornos (Restrepo *et al.*, 2018).

4.2.2. Distribución del tamaño de partículas.

Para representar la distribución del tamaño de las partículas, se realizaron diagramas de barra con los datos de VC para cada rango tamaño de las 32 clases del LISST-200X, en la capa superficial ($z/h=0.1$), capa media ($z/h=0.5$) y capa de fondo ($z/h=0.9$) de los 72 perfiles medidos. A cada distribución se le realizó un ajuste Gaussiano con el objetivo de observar la tendencia de los datos hacia una fracción de tamaño particular.

4.2.3. Cálculo de velocidad de sedimentación

La velocidad de sedimentación (W_s) se calculó mediante ecuaciones del método experimental, método teórico simple y método teórico ajustado a las variaciones de tamaño de partículas, para observar y analizar las diferencias en los resultados. Después de analizar las ecuaciones derivadas de modelos experimentales, se emplearon las siguientes ecuaciones para estimar la velocidad de sedimentación de las partículas (W_s):

$$\text{Agrawal y Pottsmith (2000):} \quad W_s = 0.45 \times 10^{-3} r^{1.17}, \quad W_s: (cm \ s^{-1}) \quad \text{Ec. 1}$$

$$\text{Mikkelsen y Pejrup (2001):} \quad W_s = 0.00026 d^{1.53}, \quad W_s: (mm \ s^{-1}) \quad \text{Ec. 2}$$

$$\text{Gibbs (1985):} \quad W_s = 1.73 d^{0.78}, \quad W_s: (cm \ s^{-1})d(cm) \quad \text{Ec. 3}$$

$$\text{Sternberg et al. (1999):} \quad W_s = 0.0002 d^{1.54}, \quad W_s: (mm \ s^{-1}) \quad \text{Ec. 4}$$

en donde, r (μm) es el diámetro medio de la partícula definido por el software GRADISTAT, d (μm) es el tamaño de la partícula definido por el LISST-200X. La velocidad de sedimentación a través de este método ha sido medida en laboratorio a través de tanques de sedimentación con MPS de la Bahía de Chesapeake (Estados Unidos) (Gibbs, 1985). Además, más recientemente se han realizado mediciones *in situ* con sistemas de cámara o video en el Norte de California, y con instrumentos de difracción láser (LISST- ST) en las costas de New Jersey, y en las costas danesas (Sternberg et al., 1999; Agrawal y Pottsmith, 2000; Mikkelsen y Pejrup, 2001).

En el modelo teórico simple utilizamos la ecuación de [Stokes \(1901\)](#), basada en las leyes de Newton, y en el modelo teórico ajustado a la variación del tamaño de las partículas utilizamos la ley de Stokes modificada;

$$\text{Ley de Stokes:} \quad W_S = \frac{(g)(\Delta\rho)(d^2)}{18\mu} \quad \text{Ec. 5}$$

$$\text{Ley de Stokes modificada:} \quad W_{S_i} = \frac{(g)(\Delta\rho_i)(d_i^2)}{18\mu} \quad \text{Ec. 6}$$

en donde, el subíndice i representa cada grupo de tamaño de partícula definido por el LISST-200X, μ es la viscosidad dinámica ($0.000815 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$ a $29 \text{ }^\circ\text{C}$), $\Delta\rho$ es la densidad efectiva (kg m^{-3}) y d el diámetro de la partícula (m). La ley de Stokes ha sido ampliamente utilizada para estimar la velocidad de sedimentación en sistemas sedimentarios como la Bahía de San Pablo (Estados Unidos) y el estuario del Río Yangtze (China), o para calcular indirectamente la densidad de las partículas luego de medir experimentalmente la velocidad de sedimentación de las partículas ([Kineke y Sternberg, 1989](#); [Guo et al., 2017](#); [Huang, 1993](#); [Higgins et al., 2017](#)). Por otra parte, han utilizado la ley de Stokes modificada para calcular la velocidad de sedimentación en la desembocadura del Río Magdalena, en el mar de Wadden y en la Bahía de Nha Phu en Vietnam ([Ospino, 2019](#); [Markussen y Andersen, 2013](#)).

Los valores de velocidad de sedimentación obtenidos por cada método fueron graficados en el software MATLAB (R2015a) como gráficos de contorno y gráficos de velocidad vs tamaño de partícula. Además, se realizó un análisis estadístico con los valores obtenidos de cada ecuación y los tamaños de partículas para determinar la calidad del modelo, con el coeficiente de determinación y el valor de probabilidad, en el software STATGRAPHICS 18. Por último, los valores de velocidad de caída de grano obtenidos por cada método utilizado fueron sintetizados en una tabla con los perfiles correspondientes.

5. RESULTADOS

5.1. Propiedades texturales de los sedimentos

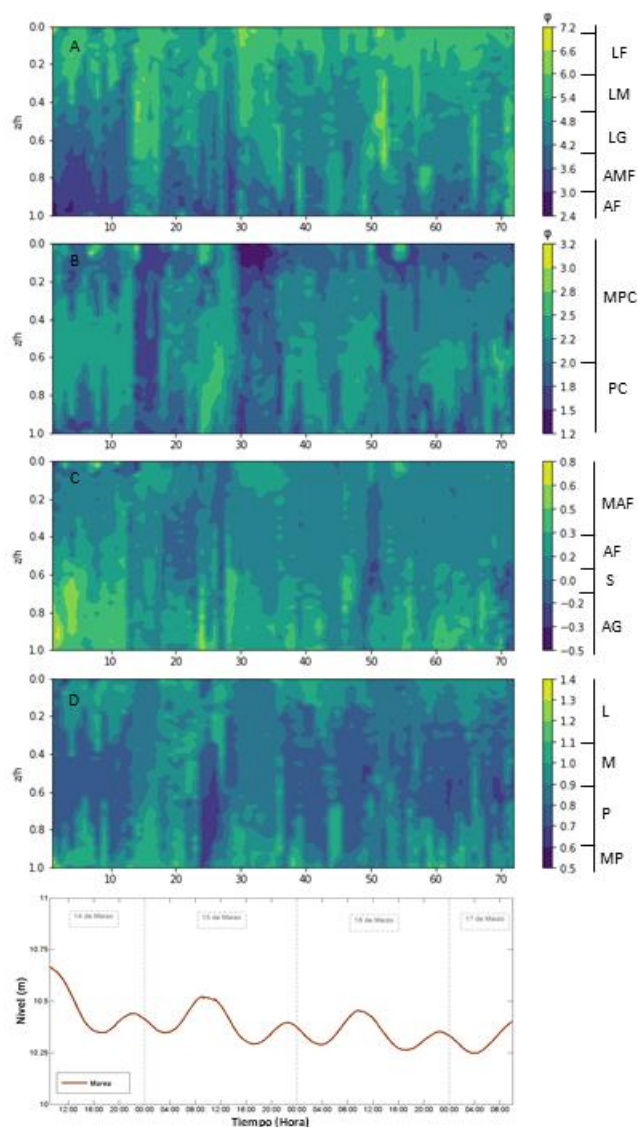


Figura 2. Propiedades texturales del sedimento en suspensión mediante el método de Folk y Ward (1957) y ciclo de marea. A) Tamaño medio (LF - Lodo fino, LM - Lodo medio, LG - Lodo Grueso, AMF - Arena muy fina, AF - Arena fina); B) Selección (MPC- Muy pobremente seleccionado, PC – Pobremente seleccionado); C) Asimetría (MAF – Muy asimétrico hacia finos, AF - Asimétrico hacia finos, A - Simétrico, AG - Asimétrico hacia gruesos) y; D) Curtosis (L – Leptocúrtico, M – Mesocúrtico, P – Platicúrtico, MP – Muy platicúrtico).

De acuerdo con los indicadores del tamaño medio de las partículas, los sedimentos suspendidos en la desembocadura del río Magdalena durante el tiempo de medición corresponden a 0.3% de arena

fina (2.0ϕ a 3.0ϕ), 14.7 % de arena muy fina (3.0ϕ a 4.0ϕ), 47.9 % limo grueso (4.0ϕ a 5.0ϕ), 35.5 % limo medio (5.0ϕ a 6.0ϕ) y 1.6 % limo fino (6.0ϕ a 7.0ϕ) (Tabla 1). En general, durante la medición prevalecieron los limos en la capa superficial de la columna de agua, mientras que en la capa profunda prevalecieron las partículas de tamaño arena (Figura 2A). Sin embargo, la distribución del tamaño de la partícula en la columna de agua presenta una amplia variabilidad en el tiempo. Durante la pleamar nocturna del primer día, la pleamar diurna del tercer día y las bajamares del tercer y cuarto de día, predominaron las partículas de tamaño limo en el 100% de la columna de agua, mientras que en el resto de las mediciones, alcanzó hasta el 60% de la profundidad.

Se encontró que el 39.2% de los valores obtenidos estuvieron pobremente clasificados (1.0ϕ a 2.0ϕ), y el 60.8% muy pobremente clasificado (2.0ϕ a 4.0ϕ) (Tabla 1). En la capa superficial y en la capa fondo prevalecieron los sedimentos pobremente clasificados, alcanzando casi la totalidad de la columna de agua en marea saliente y bajar; mientras que los sedimentos muy pobremente clasificados prevalecieron en la capa media, excepto en bajamares y alcanzaron toda la columna en las pleamares diurnas (Figura 2B).

Por otro lado, los valores de asimetría muestran que el 10.7% de los sedimentos medidos son muy asimétricos hacia la fracción fina (1.0 a 0.3), el 37.4% asimétricos hacia los finos (0.3 a 0.1), el 49.5% no presentan asimetría (0.1 a -0.1) y finalmente, solo el 2.4% son asimétricos hacia la fracción gruesa (-0.1 a -0.3) (Tabla 1). Gran parte de las mediciones presentaron valores positivos, especialmente en la capa fondo donde se distribuyen las partículas asimétricas y muy asimétricas a finos, alcanzando la capa media durante pleamares. En la capa media prevalecen la mayor cantidad de los sedimentos los cuales no presenten asimetría a alguna fracción. Y las

partículas asimétricas hacia la fracción gruesa aparecen en el 100% de la columna durante marea saliente y en la capa media durante la hora 20, que corresponde a una bajamar (Figura 2C).

Los indicadores de la Curtosis que muestran la distribución de tamaños alrededor de los valores centrales presentaron valores de 1.4 % muy platicúrticos (<0.67), 66 % en platicúrtico (0.67 a 0.90), 32.2 % como mesocúrtico (0.90 a 1.10) y el 0.4 % restante como leptocúrtico (1.10 a 1.50) (Tabla 1). En la capa superficial de la columna de agua predominan los sedimentos son distribución mesocúrtica, alcanzando la capa media durante bajamar; mientras que en la capa de fondo predomina la distribución leptocúrtica (Figura 2D). Durante las pleamares, la distribución platicúrtica y muy platicúrtica prevalece en la capa media.

Tabla 1. Valor obtenido de los parámetros granulométricos de los sedimentos.

Tamaño medio	(%)	Selección	(%)	Asimetría	(%)	Curtosis	(%)
Arena fina	0.3	Muy pobremente selec.	39.2	Muy asimétrico a finos	10.7	Muy platicúrtico	1.4
Arena muy fina	14.7	Pobremente selec.	60.8	Asimétrico a fino	37.4	Platicúrtico	66
Limo grueso	47.9			Simétrico	49.5	Mesocúrtico	32.2
Limo medio	35.5			Asimétrico a gruesos	2.4	Leptocúrtico	0.4
Limo fino	1.6						

5.2. Distribución del tamaño de la partícula

Se analizaron 4 momentos de interés teniendo en cuenta el estado marea; dos bajamares, que corresponden a los perfiles 8 y 43 (Figura 3A y 3C), y dos pleamares, que corresponden a los perfiles 25 y 60 (Figura 3B y 3D). La distribución de tamaño de partículas presentó una marcada variabilidad vertical en los cuatro perfiles escogidos (Figura 3). En bajamar predominaron los sedimentos finos en la capa superficial, mientras que los sedimentos gruesos en el fondo; en la capa media los sedimentos no mostraron una tendencia hacia una fracción de tamaño particular sino que tuvieron una distribución homogénea (Figura 3A y 3C). Durante pleamar se observa que el volumen de concentración de sedimentos disminuye en todas las profundidades, presentando una distribución similar en la capa superficial y media; sedimentos finos en la superficie, y homogéneos en la capa media (Figura 3B y 3D). En la capa de fondo de la pleamar diurna se

presenta un comportamiento bimodal mientras que en la pleamar nocturna los sedimentos tienen a la fracción gruesa (Figura 3B).

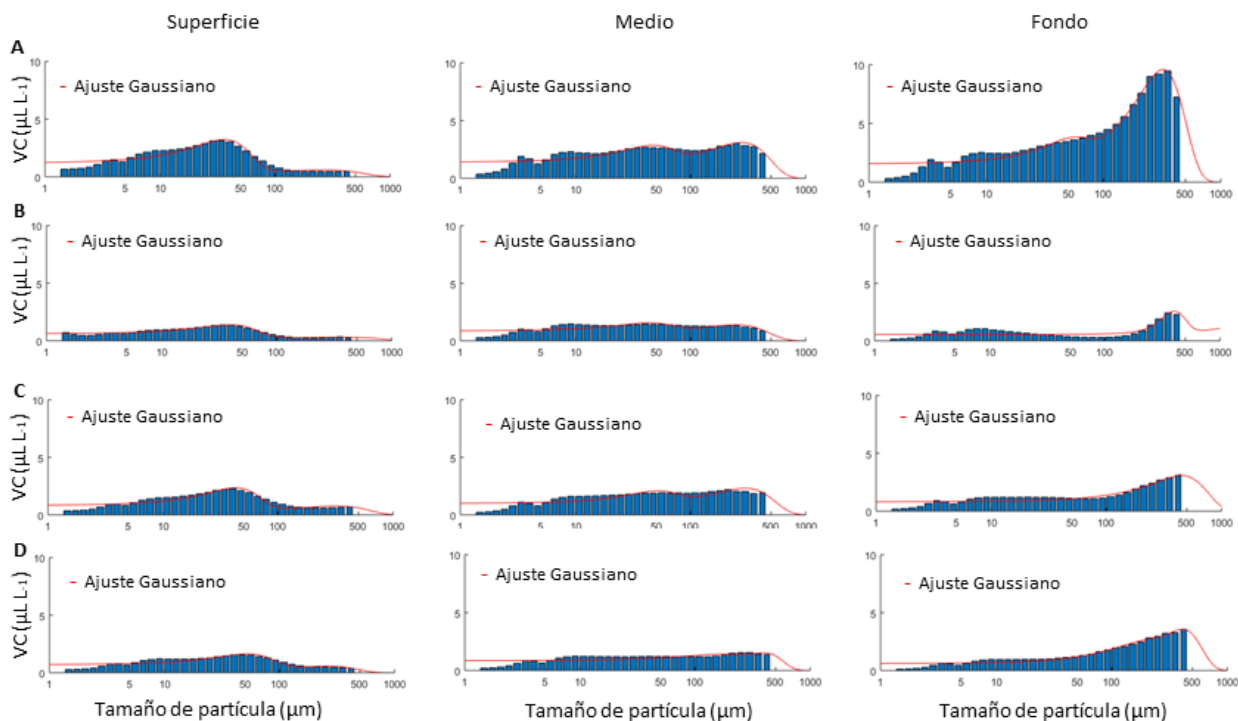


Figura 3. Distribución del tamaño de partículas en la capa superficial, media y fondo con ajuste Gaussiano. A) Perfil 8; B) Perfil 25; C) Perfil 43 y; D) Perfil 60.

5.3. Velocidad de sedimentación

5.3.1. Velocidad de sedimentación - métodos experimentales.

La velocidad de sedimentación calculada a partir de [Agrawal y Pottsmith \(2000\)](#) presentó variaciones entre 0.021 mm s^{-1} y 0.77 mm s^{-1} con una media de $0.16 \text{ mm s}^{-1} \pm 0.09$. Las partículas con velocidad de sedimentación menor a 0.2 mm s^{-1} prevalecen en la capa superficial de la columna de agua, alcanzando hasta el 80% de la columna de agua durante marea entrante y marea saliente. Los valores de velocidad de sedimentación más altos se encuentran en la capa de fondo, teniendo mayor influencia en la columna de agua durante los 12 primeros días de medición (Figura 4A).

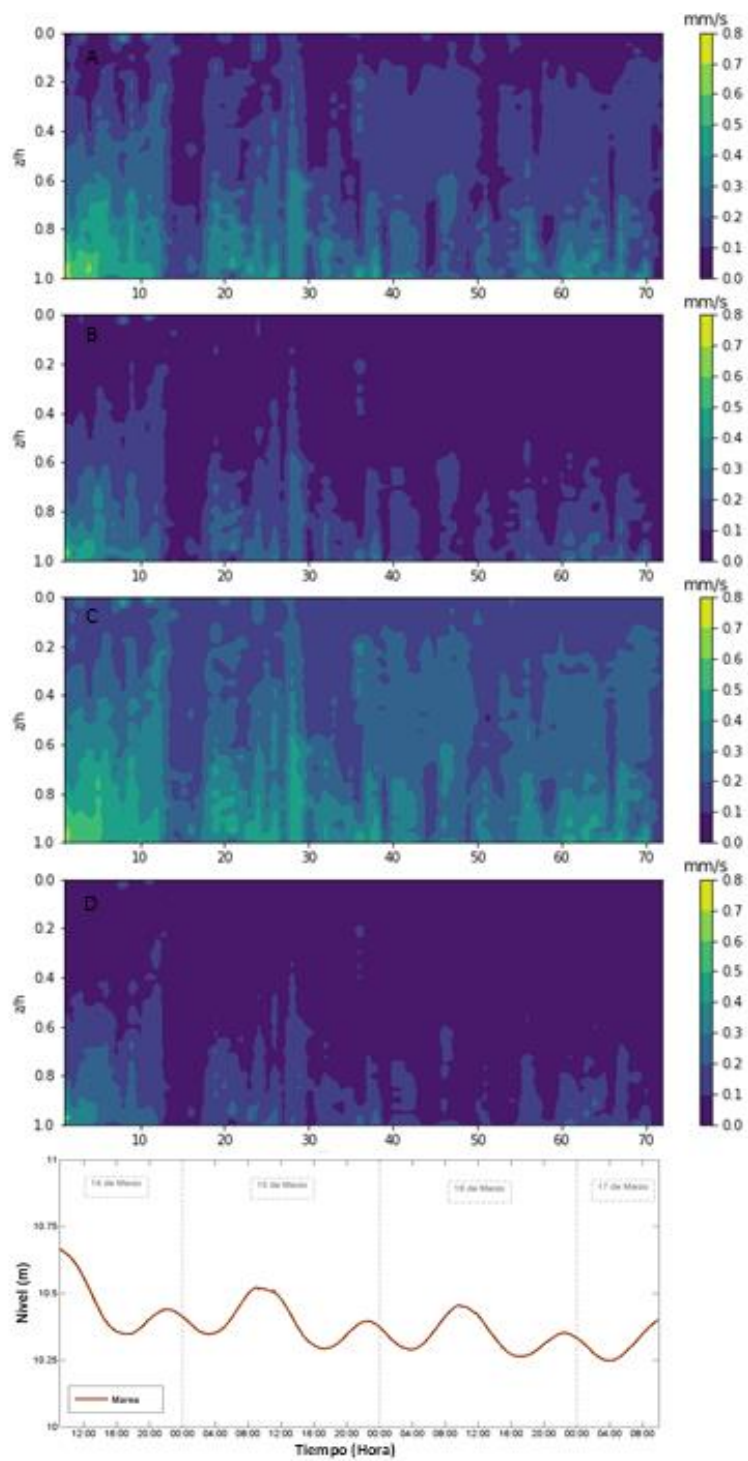


Figura 4. Velocidad de sedimentación en el tiempo y ciclo de marea. A) Agrawal y Pottsmith (2000); B) Mikkelsen y Pejrup (2001); C) Gibbs (1985); D) Sternberg et al. (1999).

La velocidad de sedimentación calculada a partir de [Mikkelsen y Pejrup \(2001\)](#), presentó variaciones entre 0.005 mm s^{-1} y 0.63 mm s^{-1} con media de $0.08 \text{ mm s}^{-1} \pm 0.07$. Partículas con velocidad de sedimentación menor a 0.1 mm s^{-1} predominan en toda la capa superficial, alcanzan la capa media a partir de la hora 12; y la capa de fondo durante marea saliente. Las mayores velocidades se encuentran en el fondo y a partir de la capa media en las primeras 12 horas de medición ([Figura 4B](#)). La velocidad de sedimentación calculada a partir de [Gibbs \(1985\)](#) presentó variaciones entre 0.06 mm s^{-1} y 0.69 mm s^{-1} con media de $0.23 \text{ mm s}^{-1} \pm 0.09$. Las partículas con velocidad de sedimentación inferior a 0.2 mm s^{-1} predominan en la capa superficial y, alcanzan hasta el 80% de la columna de agua durante marea entrante y saliente. Durante las 12 primeras horas de medición se presentan los valores más altos de velocidad de sedimentación ([Figura 4C](#)). La velocidad de sedimentación calculada a partir de [Sternberg et al. \(1999\)](#) presentó variaciones entre 0.004 mm s^{-1} y 0.51 mm s^{-1} con media de $0.07 \text{ mm s}^{-1} \pm 0.05$. La mayor parte de la columna de agua presenta valores inferiores a 0.1 mm s^{-1} . Las partículas con velocidad de sedimentación inferior a 0.1 mm s^{-1} prevalecen en toda la columna de agua durante marea saliente y bajamar. Con esta formulación la variación es menor, comparada con las formulaciones anteriores. La capa superficial y media es más homogénea. En el fondo predominan las velocidades entre 0.1 mm s^{-1} y 0.3 mm s^{-1} , alcanzando hasta la capa media durante la pleamar diurna del 15 de marzo; y hasta el valor máximo de velocidad de sedimentación en las primeras 12 horas de medición ([Figura 4D](#)).

En general dentro de los modelos estadísticos, la velocidad de sedimentación presentó variaciones entre 0.004 mm s^{-1} y 0.77 mm s^{-1} , y una media de $0.163 \text{ mm s}^{-1} \pm 0.107$, siendo el promedio de las velocidades medias de las ecuaciones utilizadas para este método. Las velocidades aumentaron en función de la profundidad de la columna de agua. Además, los valores más altos de cada formulación estuvieron distribuidos en las 12 primeras horas de medición ([Figura 4](#)).

5.3.2. Velocidad de sedimentación - método físico.

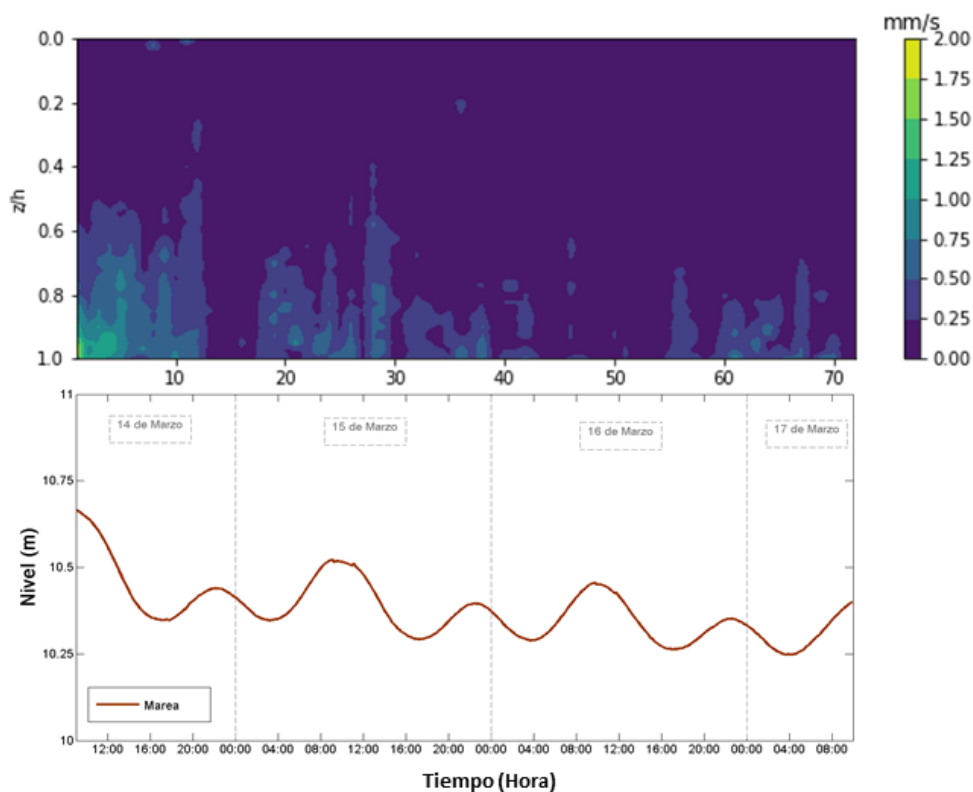


Figura 5. Velocidad de sedimentación en el tiempo, calculada a partir de la ley de Stokes, y el ciclo de marea.

La velocidad de sedimentación calculada a partir de la ley de Stokes presentó variaciones comprendidas entre 0.003 mm s^{-1} y 1.808 mm s^{-1} , con media de $0.151 \text{ mm s}^{-1} \pm 0.167$. Los valores de velocidad de sedimentación menores a 0.25 mm s^{-1} tuvieron mayor predominancia a lo largo de la columna de agua durante el tiempo de medición. Las partículas con velocidades de sedimentación entre 0.25 mm s^{-1} y 1.00 mm s^{-1} predominaron en la capa media y fondo durante las pleamares y partículas con velocidad de sedimentación de hasta 2 mm s^{-1} predominaron en la capa media y fondo de las 12 primeras horas de medición (Figura 5).

5.3.3. Velocidad de sedimentación - método físico modificado.

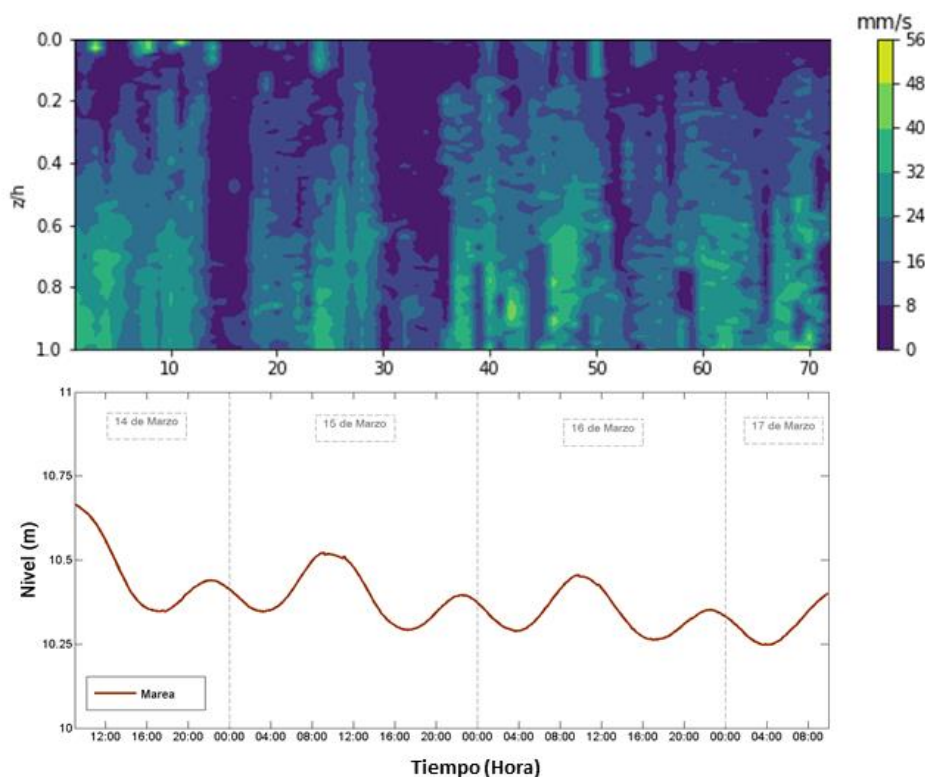


Figura 6. Velocidad de sedimentación en el tiempo, calculada a partir de la ley de Stokes modificada, y el ciclo de marea.

La velocidad de sedimentación calculada a partir de la ley de Stokes ajustada a la variabilidad de tamaño de partícula presentó variaciones comprendidas entre 0.34 mm s^{-1} y 54 mm s^{-1} , con media de $14.9 \text{ mm s}^{-1} \pm 9.5$. Durante el tiempo de medición las partículas con velocidad de sedimentación menor a 16 mm s^{-1} predominaron en la capa superior de la columna de agua, mientras que en la capa media predominaron velocidades entre 16 mm s^{-1} y 24 mm s^{-1} y en la capa de fondo se encuentran las partículas con velocidad de sedimentación mayores a 24 mm s^{-1} . Durante marea saliente y bajamares las velocidades menores a 16 mm s^{-1} alcanzan el 100% de la

columna de agua y durante pleamares los sedimentos presentaron mayor velocidad de sedimentación desde la capa media hasta la capa fondo (Figura 6).

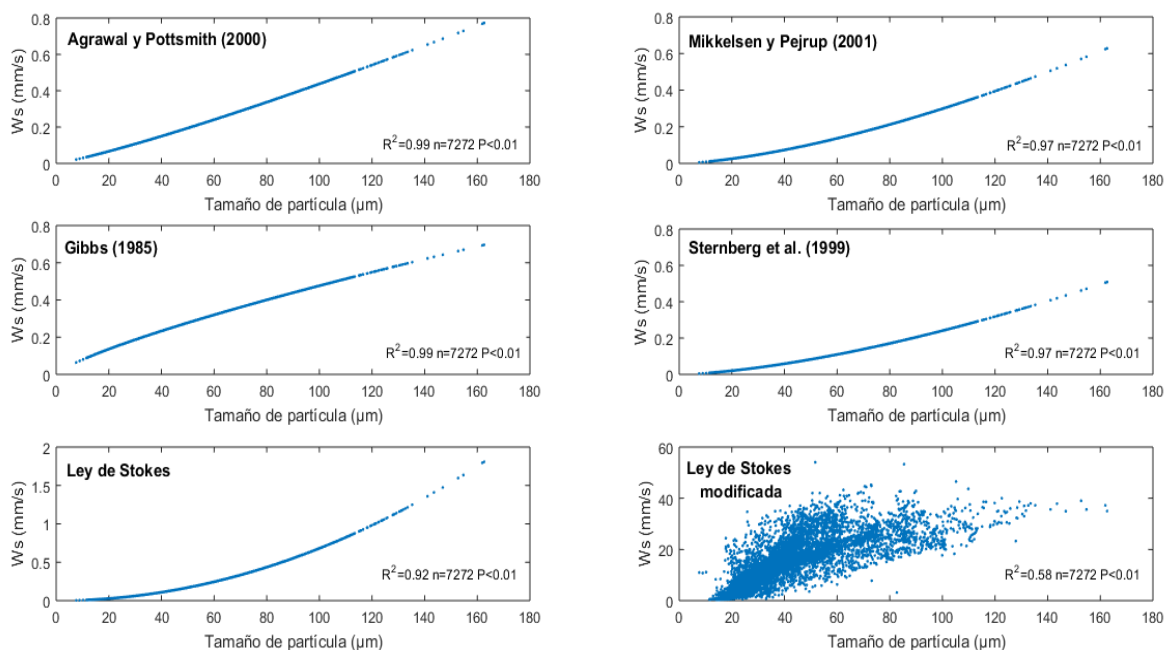


Figura 7. Relación entre el tamaño de partículas (μm) y la velocidad de sedimentación (mm s^{-1}) obtenida a partir de las formulaciones de A) Agrawal y Pottsmith (2000); B) Mikkelsen y Pejrup (2001); C) Gibbs (1985); D) Sternberg et al. (1999); E) Ley de Stokes; y F) ley de Stokes modificada.

En la Figura 7 se observa la velocidad de sedimentación (W_s), obtenida mediante los modelos estadísticos (Figura 7A-D), la ley de Stokes (Figura 7E) y la ley de Stokes ajustada a la variabilidad del tamaño de partículas (Figura 7F). Además se indican los coeficientes de determinación (R^2), el número de observaciones (n) y el valor de probabilidad (P) para cada una de las ecuaciones, obtenidas a partir de un análisis de regresión lineal.

Los coeficientes de determinación obtenidos a partir de los 7272 datos de tamaño medio de partícula son mayores a 0.97 para el método experimental; 0.99 para Agrawal y Pottsmith (2000), 0.97 para Mikkelsen y Pejrup (2001), 0.99 para Gibbs (1985) y 0.97 para Sternberg et al. (1999); 0.92 para el ajuste a partir de la Ley de Stokes, y 0.58 para la ley de Stokes modificada.

Todas las formulaciones presentan un valor de probabilidad p de 0.0000, siendo estadísticamente significativo a un nivel de significancia de 0.01.

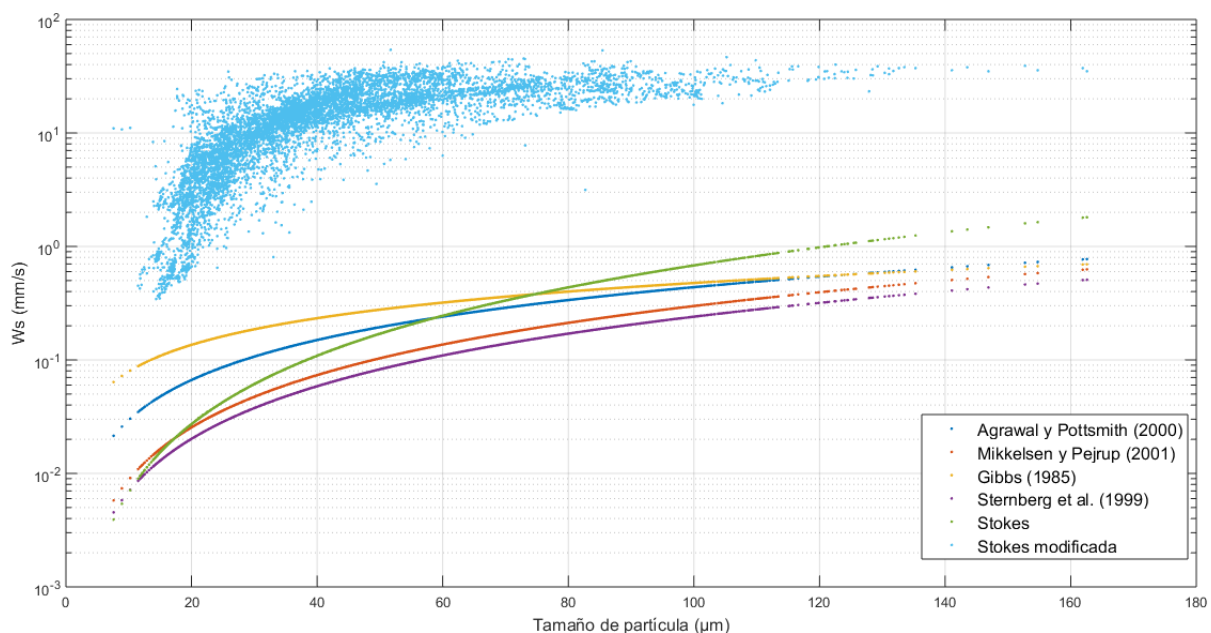


Figura 8. Relación entre el tamaño de partículas (μm) y la velocidad de sedimentación (mm s^{-1}) obtenida a partir de las formulaciones de los modelos estadísticos, ley de Stokes y la ley de Stokes ajustada a la variabilidad del tamaño de partícula.

En general, las ecuaciones registraron la misma tendencia en el comportamiento de la velocidad de caída de grano en relación con el diámetro de las partículas. La velocidad de sedimentación (mm s^{-1}) aumenta a medida que aumenta el tamaño medio de partículas (μm). Además, se distinguen dos tipos de aumentos en esta relación. Los tamaños de partículas inferiores a $30 \mu\text{m}$ poseen un aumento acelerado en la velocidad de sedimentación; mientras que los tamaños superiores a $30 \mu\text{m}$ poseen un aumento moderado en la velocidad de sedimentación (Figura 8).

Por otro lado, existe una diferencia significativa en la dispersión de los datos y el orden de magnitud de las velocidades calculadas. Las formulaciones del modelo estadístico y el método físico mostraron resultados similares para la velocidad de sedimentación, mientras que el método

de Stokes ajustado presentó valores entre 1 y 3 órdenes de magnitud superiores a los obtenidos con las formulaciones anteriores, con datos más dispersos (Figura 8).

Por último, los valores de velocidad de caída de grano obtenidos por cada método utilizado con los perfiles correspondientes se encuentran sintetizados en el Anexo 1.

6. DISCUSIONES

6.1. Propiedades texturales del sedimento

Las propiedades texturales del sedimento estuvieron influenciadas por el ciclo de marea, mostrando gran variabilidad vertical y temporal durante el tiempo de medición. El tamaño medio de las partículas en suspensión en la desembocadura del río Magdalena corresponden a 15% de arena (-1.00ϕ a 4.00ϕ) y 85% limo (4.00ϕ a 8.00ϕ). Las partículas de tamaño arena estuvieron en la capa fondo de la columna de agua, excepto en las bajamares donde las partículas de tamaño limo alcanzaron el 100% de la columna de agua, y en las pleamares las partículas tamaño arena alcanzaron la capa media (Figura 2A). En época de bajos caudales se produce una mayor intrusión salina, reduciendo la mezcla vertical y originando una estratificación más definida que presumiblemente favorece el proceso de floculación en el estuario (Restrepo *et al.*, 2018). Esto permite que las partículas cohesivas se agrupen en microfloculos. Y por lo tanto, el instrumento de difracción laser utilizado en campo los tomaría como una partícula de mayor tamaño. A este aspecto se le atribuye la ausencia de partículas de tamaño arcilla durante todo el tiempo de medición. Además, durante las pleamares, la cuña salina presenta una mayor penetración, lo que permite que se formen flóculos de mayor tamaño. Por esta razón las partículas de tamaño correspondientes a arenas predominan en la capa fondo y media de la columna de agua.

La selección mostró que el 39.2% de los valores obtenidos estuvieron pobremente clasificados (1.0ϕ a 2.0ϕ), y el 60.8% muy pobremente clasificado (2.0ϕ a 4.0ϕ) (Tabla 1). En

la capa superficial y fondo prevalecieron las partículas pobremente clasificadas, alcanzando casi la totalidad de la columna de agua en marea saliente y bajamar; mientras que las partículas muy pobremente clasificadas prevalecieron en la capa media, excepto en bajamares y alcanzaron toda la columna en las pleamares (Figura 2B). El grado de selección según Alcántara-Carrió *et al.* (2001) indica si el rango de tamaños existente es amplio o no. Durante las pleamares que es el estado de marea donde las partículas de tamaño arena alcanzan la capa media, se presenta más bajo grado de selección debido al mayor rango de tamaño de partículas. Eso se debe a que cuando el tamaño medio aumenta, hay una mayor proporción de partículas gruesas, pero sin que hayan desaparecido las partículas menores (Alonso, Montesdeoca, Vivares, Alcántara-Carrió, 2001).

De acuerdo con el índice de asimetría, el 48,1% de las partículas en suspensión medidas presentan asimetría positiva (Fracción fina), el 49.5% son simétricos y el 2.4% asimetría negativa (Fracción gruesa). Los valores positivos se presentaron en la capa fondo, donde predomina las partículas asimétricas y muy asimétricas hacia la fracción fina, alcanzando la capa media en pleamares. Indicando una oscilación de la energía cinética media hacia valores más bajos de lo normal (Alcántara-Carrió *et al.*, 2001). Favoreciendo la formación y conservación de los flocs en este estado de marea. Mientras que en la capa media prevalecen la mayor cantidad de los sedimentos con distribución simétrica, y las partículas asimétricas hacia la fracción gruesa aparecen en el 100% de la columna durante marea saliente y bajamar (Figura 2C). Sugiriendo que la energía cinética media ha oscilado hacia valores más altos de lo normal, desintegrando los flocs de mayor tamaño.

Por otro lado, los valores de curtosis mostraron un amplio rango entre distribución muy platicúrtica a leptocúrtica. Las distribuciones platicúrtica y muy platicúrtica prevalecen en la capa media durante pleamares. Indicando un amplio rango de tamaños, favorecido por la floculación de

partículas como consecuencia de la mayor estratificación y una energía cinética media moderada. Mientras que en la capa superficial predominan las partículas con distribución mesocúrtica, alcanzando la capa media durante bajamar, y en la capa de fondo las partículas con distribución leptocúrtica (Figura 2D). Estas distribuciones indican un menor rango de tamaño de partículas, causado por la desintegración de macroflocs producto del incremento de la energía cinética media.

En general, durante las pleamares se presentan las partículas en suspensión con mayor tamaño gracias a la floculación de partículas de menor tamaño, favorecida por la estratificación presente en este estado de marea. La generación de partículas gruesas amplía el rango de tamaño de partículas, generando un más bajo grado de selección y colas más largas en la distribución de partículas presentando distribuciones asimétricas a la fracción fina y distribuciones platicúrticas. Mientras que durante las bajamares hay un aumento en la energía, ocasionando una desintegración de los flocs de mayor tamaño. Con lo cual, se reduce el rango de tamaño y se aumenta el grado de selección de las partículas. Además, se presenta una distribución leptocúrtica con asimétrica hacia la fracción gruesa.

6.2. Distribución del tamaño de partículas

La distribución del tamaño de las partículas se vio influenciada por la profundidad de la columna de agua y por el estado de la marea. En general, los perfiles de distribución mostraron que en la capa superficial los sedimentos tienden a la fracción fina, y en la capa media, la distribución es homogénea. mientras que en el fondo tienden a la fracción gruesa durante pleamar y presentan un comportamiento bimodal durante bajamar (Anexo 2). Lo cual demuestra que el tamaño de las partículas aumenta a lo largo de la columna de agua desde la capa superficial hasta el fondo y durante bajamar las partículas de tamaño limo aparecen en toda la columna de agua (Figura 2A).

6.3. Velocidad de sedimentación

En general, se presentaron velocidades de sedimentación bajas en la superficie y más altas a medida que aumenta la profundidad de la columna de agua. Lo cual coincide con el aumento del tamaño de partículas a escala vertical. Las velocidades de sedimentación presentaron variaciones no solo verticales sino también temporales, asociadas al ciclo de marea (Schwarz et al., 2017). Durante marea saliente y bajamares, alcanzan hasta el 100% de la columna de agua las velocidades menores a 0.2 mm s^{-1} en los modelos estadísticos y la ley de Stokes, y 16 mm s^{-1} en la ley de Stokes modificada, y durante pleamares las partículas presentaron velocidad de sedimentación mayores a los valores anteriores, desde la capa media hasta la capa fondo (Figuras 4-6). El aumento de este parámetro es favorecido con el aumento del tamaño de sedimentos, tal como se ha documentado en diferentes estudios (Markussen y Andersen, 2013; Soulsby et al., 2013; Guo et al., 2017). De acuerdo con lo anterior, autores como Guo et al. (2017) y Huang (1993) argumentan que la porosidad del floc aumenta y la densidad efectiva disminuye a medida que aumenta el tamaño del floc. Provocando un mayor flujo progresivo y una disminución de la fuerza de dragado durante la sedimentación (Huang, 1993). Además, se evidencia un mayor aumento en la velocidad de sedimentación para tamaños de partículas inferiores a $30 \mu\text{m}$; mientras que los tamaños superiores a $30 \mu\text{m}$ poseen un aumento moderado (Figura 8). Esto concuerda con lo que sugiere Chase (1979) de que las partículas más pequeñas poseen una relación superficie/volumen mayor, con lo cual se produce una reducción en la fuerza de dragado viscosa, afectando la velocidad de sedimentación, siendo más pronunciado el incremento para partículas más pequeñas.

En cuanto a los valores de velocidad de sedimentación, los valores medios obtenidos por los modelos estadísticos, ley de Stokes, y la ley de Stokes modificada fueron $0.163 \text{ mm s}^{-1} \pm 0.107$, $0.151 \text{ mm s}^{-1} \pm 0.167$, y $14.9 \text{ mm s}^{-1} \pm 9.5$, respectivamente. El método experimental y el método

físico se encuentran en un rango de valores de velocidad de sedimentación similares, en el mismo orden de magnitud. Mientras que el método físico modificado o la ley de Stokes modificada aumentó los valores de velocidad de sedimentación para el mismo tamaño de partículas, hasta en dos órdenes de magnitud. Autores como [Hawley \(1982\)](#), han demostrado a través de análisis experimentales que las partículas se sedimentan significativamente más rápido de lo que predice la ley de Stokes. Este aumento se le atribuye a la reducción de la fuerza de dragado, producto de las interacciones entre la superficie de las partículas, los electrolitos disueltos y el material orgánico en el agua ([Hawley, 1982](#); [Chase, 1979](#)). Por otro lado, los flocs poseen una estructura altamente porosa, por la cual penetra el fluido ambiental, ocasionando una mayor velocidad de sedimentación que una partícula primaria impermeable del mismo tamaño y densidad ([Masliyah y Polikar, 1980](#)). La ley de Stokes modificada incorpora de forma indirecta la porosidad de los flocs por medio de la densidad efectiva de las partículas. Este aspecto, sumado a la floculación de sedimentos y a la alta CSS tienen un efecto directo en los procesos de navegabilidad y mantenimiento de canales ([Guo et al., 2017](#)). Por ejemplo, la severa sedimentación en el Estuario del río Yangtsé, o en la desembocadura del río Magdalena ([Guo et al., 2017](#); [Higgins et al., 2017](#)). Esta es una de las razones por las cuales los diseños de puertos y las obras de dragado se saturan más rápido de lo predicho ([Guo et al., 2017](#)). Igualmente, hace falta incluir variables como la forma, y empaquetamiento de las partículas en la estimación de la velocidad de sedimentación ([Nasiha y Shanmugam, 2018](#)). Lo que conllevaría a una velocidad de caída de grano incluso mayor que la estimada a través de la ley de Stokes modificada.

Por otro lado, los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos a partir de los 7272 datos de tamaño medio de partícula son mayores a 0.97 para el método experimental; 0.92 para la ley de Stokes, y 0.58 para la ley de Stokes modificada ([Figura 7](#)). El coeficiente de determinación se ve

afectado por la dispersión de los valores de la velocidad de sedimentación. Las ecuaciones del método experimental y la de ley de Stokes, muestran un modelo en el cual los datos se alinean a una curva. Gracias a que en las formulaciones del método experimental consideran el valor tamaño medio, y en la ley de Stokes utiliza el promedio de tamaño y densidad efectiva de las partículas. Mientras que la ley de Stokes modificada presenta mayor dispersión en sus datos, debido a que considera todo el conjunto de partículas, para ajustarse a la variabilidad del tamaño y densidad efectiva de las partículas. A pesar de que las ecuaciones de método experimental y la de ley de Stokes presentan un coeficiente de correlación mayor que la ley de Stokes modificada, este también presenta un nivel de significancia de 99.99%, al igual que el resto, que lo hace un modelo robusto. En pocas palabras, las ecuaciones del método experimental y la de ley de Stokes presentan un mejor modelo estadístico, sin embargo, no representan físicamente las propiedades texturales de las partículas suspendidas en el estuario del Magdalena. Pese a que las partículas en suspensión de la desembocadura del río Magdalena presentan pobre y muy pobre selección, con lo cual el tamaño medio deja de ser representativo. Mientras que la ley de Stokes modificada considera la distribución del tamaño de partículas, respetando la selección de las partículas en el área de estudio.

7. CONCLUSIONES

Las propiedades texturales de los sedimentos presentaron variaciones verticales y temporales asociadas al ciclo de marea. El tamaño medio aumentó de superficie a fondo y durante pleamares, generando un bajo grado de selección con distribución platicúrtica y asimétrica a la fracción fina. Mientras que en las bajamares, se desintegran los flocs de mayor tamaño, generando un aumento en el grado de selección con distribución leptocúrtica y asimetría hacia la fracción gruesa.

La velocidad de sedimentación presentó variaciones entre 0.004 mm s^{-1} y 0.77 mm s^{-1} en los modelos estadísticos; 0.003 mm s^{-1} y 1.808 mm s^{-1} en la ley de Stokes, y entre 0.34 mm s^{-1} y 54 mm s^{-1} para la ley de Stokes modificada. En general, las mayores velocidades de sedimentación se presentaron en pleamar, producidas por la sedimentación de las partículas de mayor tamaño. El aumento de la velocidad de caída de grano podría conducir a una rápida acumulación de sedimento en el área de estudio durante este ciclo de marea.

Las ecuaciones del método experimental y la de ley de Stokes presentaron altos coeficientes de determinación, y los valores de velocidad de sedimentación se encuentran en el mismo orden de magnitud. Mientras que la velocidad de sedimentación estimada a partir de la ley de Stokes modificada presentó un menor coeficiente de determinación, mayor dispersión y valores 2 órdenes de magnitud mayor. Sin embargo, las ecuaciones del método experimental y la ley de Stokes no representan físicamente las propiedades texturales de las partículas suspendidas en la ZMT del río Magdalena. Puesto que los sedimentos en suspensión de la desembocadura del río Magdalena presentan pobre y muy pobre selección, y el valor promedio de tamaño y densidad de partículas deja de ser representativo.

8. REFERENCIAS

- Agrawal, Y. C., & Pottsmith, H. C. (2000). Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport. *Marine Geology*, 168(1-4), 89-114.
- Alcántara-Carrió, J., Cabrera, L., Alonso, I., Flores, I., Rey, S., y Gago, L. (2001). Parámetros granulométricos: Comparación entre el método gráfico y el método de los momentos. *Geotemas* 3(1). 33-37.
- Alonso, I., Montesdeoca, I., Vivares, A., Alcántara-Carrió, J. (2001) Variabilidad granulométrica y de la línea de costa de las playas de El Inglés y Maspalomas (Gran Canaria). *Geotemas*. 3(1). 39-42.
- Bernal, G. (1996). Caracterización geomorfológica de la llanura deltaica del río Magdalena con énfasis en el sistema lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR*, 25(1), 19-48.
- Blott, SJ y Pye, K. (2001) GRADISTAT: un paquete de distribución de tamaño de grano y estadísticas para el análisis de sedimentos no consolidados. *Procesos de superficie terrestre y accidentes geográficos* 26, 1237-1248.
- Bushell, G. C., Yan, Y. D., Woodfield, D., Raper, J. U. D. Y., & Amal, R. O. S. E. (2002). On techniques for the measurement of the mass fractal dimension of aggregates. *Adv. Colloid Interface Sci.* 95 (1), 1–50.
- Chase, R. R. (1979). Settling behavior of natural aquatic particulates 1. *Limnology and Oceanography*, 24(3), 417-426.

- Chen, S., & Eisma, D. (1995). Fractal geometry of in situ flocs in the estuarine and coastal environments. *Netherlands Journal of Sea Research*, 33(2), 173-182.
- Dietrich, W. E. (1982). Settling velocity of natural particles. *Water Resources Research*, 18(6), 1615–1626. doi:10.1029/wr018i006p01615
- Dyer, K. R., & Manning, A. J. (1999). Observation of the size, settling velocity and effective density of flocs, and their fractal dimensions. *Journal of Sea Research*, 41(1-2), 87–95. doi:10.1016/s1385-1101(98)00036-7
- Eisma, D. (1986). Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries. *Netherlands Journal of Sea Research*, 20(2-3), 183-199.
- Fettweis, M., & Baeye, M. (2015). Seasonal variation in concentration, size, and settling velocity of muddy marine flocs in the benthic boundary layer. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(8), 5648-5667.
- Fettweis, M., Francken, F., Pison, V., & Van den Eynde, D. (2006). Suspended particulate matter dynamics and aggregate sizes in a high turbidity area. *Marine Geology*, 235(1-4), 63-
- Folk, R.L. and Ward, W.C. (1957). Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.
- Galloway, W.E. (1975). Processes framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. En: Broussard, M.L. (ed.). *Deltas: Models for Exploration*. Houston Geological Society, Houston, 87-98.
- Gibbs, R. J. (1985). Estuarine flocs: their size, settling velocity and density. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C2), 3249-3251.

- Guo, C., He, Q., Guo, L., & Winterwerp, J. C. (2017). A study of in-situ sediment flocculation in the turbidity maxima of the Yangtze Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 191, 1–9. doi:10.1016/j.ecss.2017.04.001
- Hawley, N. (1982). Settling velocity distribution of natural aggregates. *Journal of Geophysical Research*, 87(C12), 9489. doi:10.1029/jc087ic12p09489
- Higgins, A., Restrepo, J. C., Otero, L. J., Ortiz, J. C., & Conde, M. (2017). Distribución vertical de sedimentos en suspensión en la zona de desembocadura del Río Magdalena, Colombia. *Latin american journal of aquatic research*, 45(4), 724-736.
- Huang, H. (1993). POROSITY -SIZE RELATIONSHIP OF DRILLING MUD FLOCS: FRACTAL STRUCTURE. *Clays and Clay Minerals*. Vol. 41. No.3. 373-379.
- Kineke, G. ., & Sternberg, R. . (1989). The effect of particle settling velocity on computed suspended sediment concentration profiles. *Marine Geology*, 90(3), 159–174. doi:10.1016/0025-3227(89)90039-x
- Kjerfve, B. (1981). Tides of the Caribbean sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C5), 4243-4247.
- Maggi, F., & Winterwerp, J. C. (2004). Method for computing the three-dimensional capacity dimension from two-dimensional projections of fractal aggregates. *Physical Review E*, 69(1), 011405.
- Maggi, F., Mietta, F., & Winterwerp, J. C. (2007). Effect of variable fractal dimension on the floc size distribution of suspended cohesive sediment. *Journal of Hydrology*, 343(1-2), 43–55. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.05.035

- Manning, A. J. (2004). Observations of the properties of flocculated cohesive sediment in three western European estuaries. *Journal of Coastal Research*, 70-81.
- Manning, A. J., & Schoellhamer, D. H. (2013). Factors controlling floc settling velocity along a longitudinal estuarine transect. *Marine Geology*, 345, 266-280.
- Markussen, T. N., & Andersen, T. J. (2013). A simple method for calculating in situ floc settling velocities based on effective density functions. *Marine Geology*, 344, 10-18.
- Masliyah, J. H., & Polikar, M. (1980). Terminal velocity of porous spheres. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 58(3), 299–302. doi:10.1002/cjce.5450580303
- Mhashhash, A., Bockelmann-Evans, B., & Pan, S. (2017). Effect of hydrodynamics factors on sediment flocculation processes in estuaries. *Journal of Soils and Sediments*. doi:10.1007/s11368-017-1837-7
- Mikkelsen, O. A., Hill, P. S., Milligan, T. G., & Chant, R. J. (2005). In situ particle size distributions and volume concentrations from a LISST-100 laser particle sizer and a digital floc camera. *Continental Shelf Research*, 25(16), 1959-1978.
- Mikkelsen, O., & Pejrup, M. (2001). The use of a LISST-100 laser particle sizer for in-situ estimates of floc size, density and settling velocity. *Geo-Marine Letters*, 20(4), 187-195.
- Nasiha, H. J., & Shanmugam, P. (2018). Estimation of settling velocity of sediment particles in estuarine and coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 203, 59–71. doi:10.1016/j.ecss.2018.02.001

- Nasiha, H. J., Shanmugam, P., & Sundaravadivelu, R. (2019). Estimation of sediment settling velocity in estuarine and coastal waters using optical remote sensing data. *Advances in Space Research*, 63(11), 3473-3488.
- Ortiz, J., Otero, L., Restrepo, J.C., Ruiz, J., Cadena, M. (2013). Characterization of cold fronts in the Colombian Caribbean and their relationship to extreme wave events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 13, 2797-2804
- Ospino, O. (2019). *Propiedades del Sedimento Suspendido en Condiciones de Flujo Estratificado no Estacionario – Desembocadura del río Magdalena (Tesis de maestría)*. Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia.
- Ospino, S., Restrepo, J. C., Otero, L., Pierini, J., & Alvarez-Silva, O. (2018). Saltwater Intrusion into a River with High Fluvial Discharge: A Microtidal Estuary of the Magdalena River, Colombia. *Journal of Coastal Research*, 346, 1273–1288. doi:10.2112/jcoastres-d-17-00144.1
- Papenmeier, S., Schrottke, K., & Bartholomä, A. (2014). Over time and space changing characteristics of estuarine suspended particles in the German Weser and Elbe estuaries. *Journal of sea research*, 85, 104-115.
- Pejrup, M., & Mikkelsen, O. A. (2010). Factors controlling the field settling velocity of cohesive sediment in estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87(2), 177–185. doi:10.1016/j.ecss.2009.09.028
- Restrepo, J. C. (2014). *Dinámica Sedimentaria en Deltas Micromareales – Estratificados de Alta Descarga: Delta del Río Magdalena (Colombia – Mar Caribe) (Tesis de doctorado)*. Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia.

- Restrepo, J. C., Schrottke, K., Traini, C., Bartholomae, A., Ospino, S., Ortíz, J. C., ... & Orejarena, A. (2018). Estuarine and sediment dynamics in a microtidal tropical estuary of high fluvial discharge: Magdalena River (Colombia, South America). *Marine Geology*, 398, 86-98.
- Restrepo, J. C., Schrottke, K., Traini, C., Ortíz, J. C., Orejarena, A., Otero, L., ... & Marriaga, L. (2016). Sediment transport and geomorphological change in a high-discharge tropical delta (Magdalena River, Colombia): Insights from a period of intense change and human intervention (1990–2010). *Journal of Coastal Research*, 32(3), 575-589.
- Sahin, C., Guner, H. A. A., Ozturk, M., & Sheremet, A. (2017). Floc size variability under strong turbulence: observations and artificial neural network modeling. *Applied Ocean Research*, 68, 130-141.
- Salinas-Tapia, H., & García-Aragón, J. A. (2011). Fórmula experimental para la velocidad de caída de sedimentos en flujo transversal. *Tecnología y ciencias del agua*, 2(2), 175-182.
- Schwarz, C., Cox, T., Van Engeland, T., Van Oevelen, D., Van Belzen, J., Van de Koppel, J., ... & Temmerman, S. (2017). Field estimates of floc dynamics and settling velocities in a tidal creek with significant along-channel gradients in velocity and SPM. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 197, 221-235.
- Soulsby, R. L., Manning, A. J., Spearman, J., & Whitehouse, R. J. S. (2013). Settling velocity and mass settling flux of flocculated estuarine sediments. *Marine Geology*, 339, 1–12.
doi:10.1016/j.margeo.2013.04.006

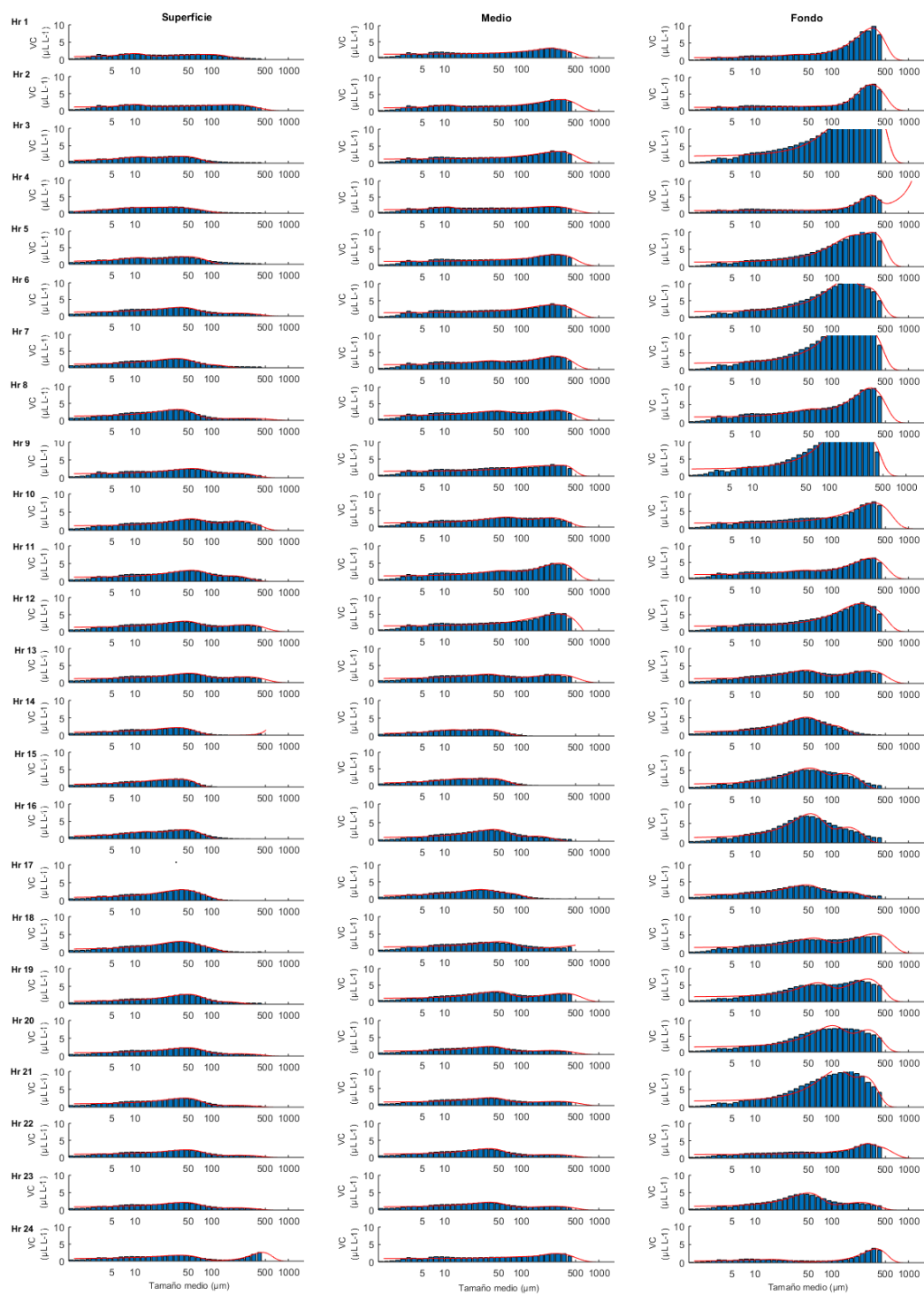
- Sternberg, R. W., Berhane, I., & Ogston, A. S. (1999). Measurement of size and settling velocity of suspended aggregates on the northern California continental shelf. *Marine geology*, 154(1-4), 43-53.
- Stokes, G. G., (1901). *Mathematical and Physical Papers*, Vol. 111, University Press, Cambridge, 1901, p. 59
- Tassew, F. A, Bergland, W. Hennie, Dinamarca, C., & Bakke, R. (2019). Settling velocity and size distribution measurement of anaerobic granular sludge using microscopic image analysis. *Journal of microbiological methods*, 159, 81-90. doi: 10.1016/j.mimet.2019.02.013
- Udden, J.A. (1914) Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the Geological Society of America*, 25, 655-744.
- Uncles, R. J., Bale, A. J., Stephens, J. A., Frickers, P. E., & Harris, C. (2010). Observations of floc sizes in a muddy estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87(2), 186-196.
- Wan, Y., Wu, H., Roelvink, D., & Gu, F. (2015). Experimental study on fall velocity of fine sediment in the Yangtze Estuary, China. *Ocean. Eng.* 103, 180-187.
- Wentworth, C.K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30, 377-392.
- Whitehouse, R.J.S., Soulsby, R.L., Robert, W., & Mitchener, H.J. (2000). *Dynamics of Estuarine Muds: A Manual for Practical Applications*. Thomas Telford, London.
- Winterwerp, J. C. (1998). A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment. *Journal of hydraulic research*, 36(3), 309-326.

9. ANEXOS

Anexo 1. Valores medios de velocidad de sedimentación (mm s^{-1}) para cada perfil, obtenidos a partir de los modelos estadísticos, ley de Stokes, y la ley de Stokes modificada

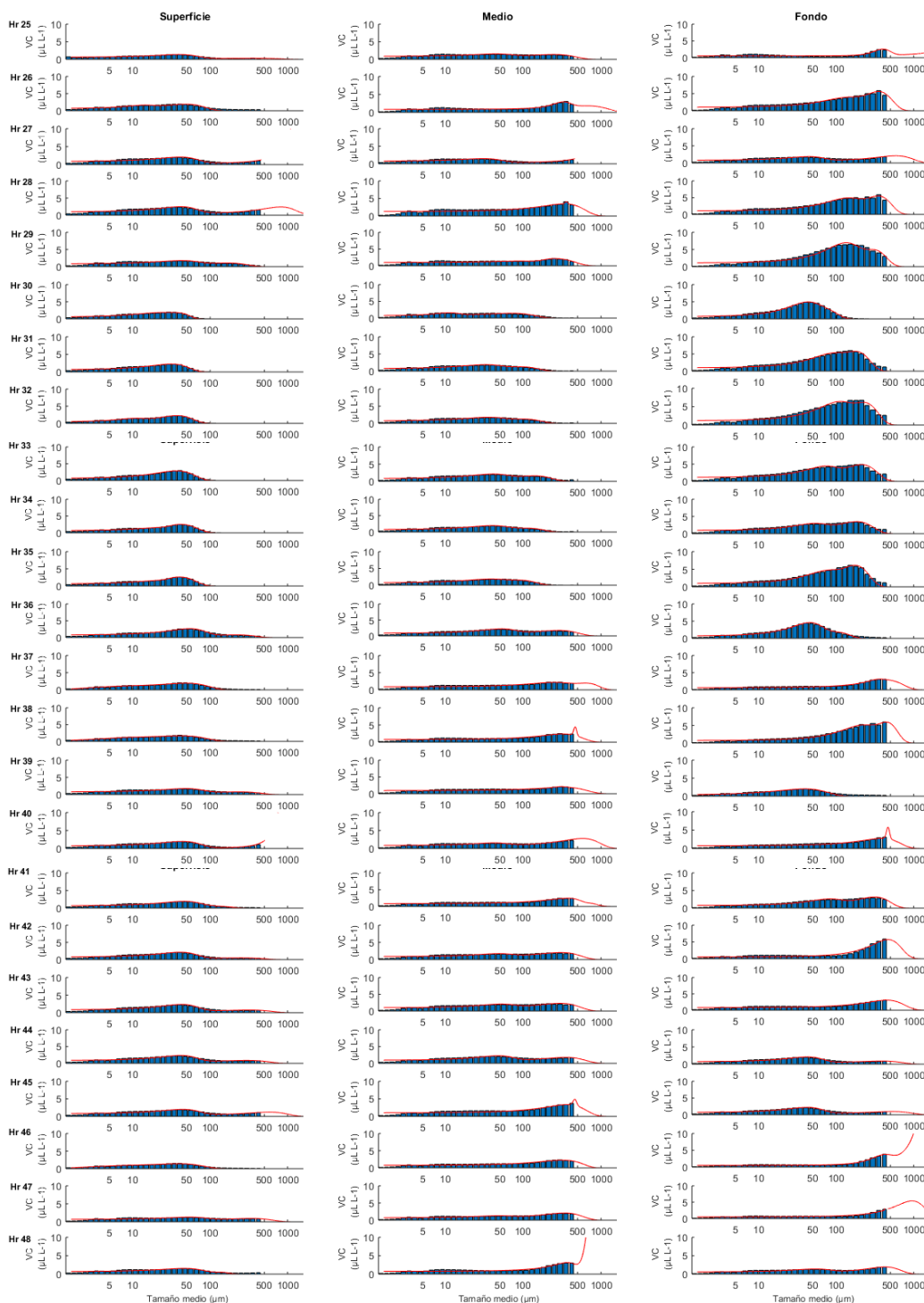
Perfil	EXPERIMENTAL				TEORICO	TEORICO AJUSTADO
	Agrawal y Pottsmith (2000)	Mikkelsen y Pejrup (2001)	Gibbs (1985)	Sternberg et al. (1999)	Ley de Stokes	Ley de Stokes modificada
1	0.2613 ± 0.1975	0.1683 ± 0.1621	0.3177 ± 0.1641	0.1354 ± 0.1312	0.3758 ± 0.4561	19.0629 ± 11.5186
2	0.2327 ± 0.128	0.1381 ± 0.1003	0.3034 ± 0.1095	0.1108 ± 0.0811	0.2721 ± 0.2606	19.5999 ± 9.1112
3	0.268 ± 0.1565	0.1681 ± 0.1221	0.3296 ± 0.1364	0.1351 ± 0.0986	0.3548 ± 0.3181	21.0902 ± 10.9853
4	0.234 ± 0.1799	0.1473 ± 0.136	0.2918 ± 0.163	0.1184 ± 0.1098	0.3159 ± 0.3441	18.5087 ± 13.9608
5	0.271 ± 0.162	0.1714 ± 0.1246	0.3309 ± 0.1427	0.1378 ± 0.1006	0.3651 ± 0.3175	18.7705 ± 9.7818
6	0.2646 ± 0.1241	0.1617 ± 0.0935	0.3314 ± 0.1107	0.1299 ± 0.0755	0.3265 ± 0.2295	17.6131 ± 6.2061
7	0.2179 ± 0.1182	0.1267 ± 0.089	0.2901 ± 0.1056	0.1016 ± 0.0719	0.2423 ± 0.2186	16.664 ± 7.1225
8	0.2038 ± 0.1093	0.1162 ± 0.0786	0.2769 ± 0.1029	0.0932 ± 0.0633	0.2159 ± 0.1823	18.0487 ± 9.8114
9	0.268 ± 0.1222	0.1639 ± 0.0937	0.3352 ± 0.1067	0.1317 ± 0.0757	0.3312 ± 0.2343	18.1567 ± 5.8702
10	0.1944 ± 0.1119	0.1101 ± 0.0798	0.2668 ± 0.1074	0.0883 ± 0.0643	0.2035 ± 0.1855	22.3082 ± 7.6182
11	0.2332 ± 0.1022	0.1363 ± 0.0745	0.3059 ± 0.0945	0.1094 ± 0.0601	0.259 ± 0.1758	18.1093 ± 9.5862
12	0.2582 ± 0.0761	0.1525 ± 0.0562	0.3317 ± 0.0685	0.1224 ± 0.0454	0.2908 ± 0.1329	20.2997 ± 4.8666
13	0.1707 ± 0.0312	0.0878 ± 0.0212	0.2535 ± 0.0306	0.0702 ± 0.017	0.1388 ± 0.0444	15.6656 ± 3.0081
14	0.0869 ± 0.0435	0.0377 ± 0.0254	0.1583 ± 0.051	0.03 ± 0.0204	0.0491 ± 0.0448	4.8796 ± 7.9017
15	0.0799 ± 0.0387	0.0337 ± 0.022	0.15 ± 0.0464	0.0268 ± 0.0176	0.0422 ± 0.0369	2.1952 ± 2.478
16	0.1025 ± 0.0442	0.0462 ± 0.0279	0.1782 ± 0.0476	0.0368 ± 0.0224	0.063 ± 0.054	4.1034 ± 3.6278
17	0.0857 ± 0.0348	0.0364 ± 0.0206	0.1584 ± 0.0398	0.029 ± 0.0165	0.0459 ± 0.0366	3.1159 ± 2.8797
18	0.1683 ± 0.0752	0.0889 ± 0.0516	0.2467 ± 0.0737	0.0711 ± 0.0415	0.1485 ± 0.111	14.0317 ± 5.9927
19	0.2152 ± 0.1015	0.1232 ± 0.0741	0.2895 ± 0.0933	0.0988 ± 0.0598	0.2291 ± 0.1735	15.3858 ± 6.0581
20	0.1773 ± 0.088	0.0959 ± 0.062	0.2542 ± 0.0839	0.0768 ± 0.05	0.1663 ± 0.1388	12.3282 ± 5.5942
21	0.1853 ± 0.105	0.1028 ± 0.0772	0.2604 ± 0.0959	0.0823 ± 0.0622	0.1857 ± 0.1829	12.6868 ± 4.8573
22	0.1536 ± 0.0864	0.0804 ± 0.0593	0.2297 ± 0.0848	0.0643 ± 0.0477	0.1345 ± 0.1279	13.0253 ± 7.396
23	0.1467 ± 0.0865	0.0756 ± 0.063	0.2234 ± 0.0801	0.0605 ± 0.0508	0.1253 ± 0.1484	10.8224 ± 4.9784
24	0.2112 ± 0.1037	0.1209 ± 0.0735	0.2846 ± 0.099	0.0969 ± 0.0593	0.2246 ± 0.1675	20.8795 ± 11.5162
25	0.1627 ± 0.0666	0.0845 ± 0.0456	0.2419 ± 0.0664	0.0676 ± 0.0367	0.1379 ± 0.1002	17.6329 ± 9.3041
26	0.205 ± 0.1064	0.1168 ± 0.0763	0.2783 ± 0.1009	0.0936 ± 0.0615	0.2163 ± 0.1778	19.4455 ± 9.6901
27	0.1378 ± 0.0346	0.0667 ± 0.0223	0.2191 ± 0.036	0.0532 ± 0.0179	0.0979 ± 0.0437	16.3001 ± 3.3993
28	0.2741 ± 0.0886	0.1655 ± 0.0674	0.3445 ± 0.0772	0.1328 ± 0.0544	0.3255 ± 0.1649	22.4046 ± 4.8604
29	0.2236 ± 0.1096	0.13 ± 0.08	0.2961 ± 0.1004	0.1043 ± 0.0645	0.2471 ± 0.1865	14.4521 ± 6.4696
30	0.1098 ± 0.0627	0.0518 ± 0.0402	0.1839 ± 0.0669	0.0413 ± 0.0323	0.0759 ± 0.0804	4.5957 ± 4.9759
31	0.1181 ± 0.0685	0.0572 ± 0.0435	0.1924 ± 0.0735	0.0457 ± 0.0349	0.0867 ± 0.0853	4.1627 ± 3.6416
32	0.1532 ± 0.0997	0.0817 ± 0.0683	0.2266 ± 0.0987	0.0654 ± 0.055	0.1411 ± 0.148	7.8503 ± 5.9921
33	0.1388 ± 0.0678	0.0695 ± 0.0447	0.2163 ± 0.0695	0.0555 ± 0.036	0.1089 ± 0.0919	6.7403 ± 5.1461

34	0.113 ± 0.0602	0.0533 ± 0.0395	0.1885 ± 0.0623	0.0425 ± 0.0318	0.078 ± 0.081	5.2316 ± 4.0511
35	0.123 ± 0.0654	0.0596 ± 0.0435	0.1994 ± 0.0662	0.0476 ± 0.035	0.0902 ± 0.0903	5.4906 ± 4.0812
36	0.1486 ± 0.0881	0.0772 ± 0.0626	0.2247 ± 0.0841	0.0618 ± 0.0505	0.1288 ± 0.1439	9.2486 ± 7.5443
37	0.1708 ± 0.0605	0.0895 ± 0.0401	0.2507 ± 0.0616	0.0716 ± 0.0323	0.1467 ± 0.0829	21.0441 ± 9.9042
38	0.1799 ± 0.1005	0.0987 ± 0.0738	0.2555 ± 0.0928	0.0791 ± 0.0595	0.1758 ± 0.1763	20.0071 ± 10.1134
39	0.1116 ± 0.0308	0.0508 ± 0.0183	0.19 ± 0.0352	0.0404 ± 0.0146	0.0688 ± 0.0322	12.6833 ± 6.8183
40	0.1692 ± 0.0558	0.0881 ± 0.0371	0.2497 ± 0.0566	0.0704 ± 0.0299	0.1429 ± 0.0774	26.5588 ± 6.7374
41	0.1692 ± 0.0558	0.0881 ± 0.0371	0.2497 ± 0.0566	0.0704 ± 0.0299	0.1429 ± 0.0774	15.1656 ± 6.3821
42	0.158 ± 0.074	0.0821 ± 0.0503	0.236 ± 0.0737	0.0656 ± 0.0405	0.1347 ± 0.1081	18.6546 ± 10.8473
43	0.1406 ± 0.0407	0.0688 ± 0.0258	0.2215 ± 0.0431	0.0549 ± 0.0207	0.1026 ± 0.0499	17.4738 ± 7.7691
44	0.1146 ± 0.0236	0.0522 ± 0.014	0.1942 ± 0.0267	0.0416 ± 0.0112	0.0707 ± 0.0246	13.7483 ± 3.9679
45	0.1263 ± 0.0386	0.0599 ± 0.0239	0.206 ± 0.0419	0.0477 ± 0.0192	0.0858 ± 0.0445	16.9786 ± 6.1444
46	0.1729 ± 0.0616	0.091 ± 0.0401	0.2524 ± 0.0641	0.0728 ± 0.0323	0.15 ± 0.0811	22.0337 ± 11.3134
47	0.1682 ± 0.0407	0.0866 ± 0.0269	0.2503 ± 0.0412	0.0692 ± 0.0217	0.1376 ± 0.0551	24.5567 ± 8.2061
48	0.1466 ± 0.0376	0.0724 ± 0.0229	0.2279 ± 0.0417	0.0578 ± 0.0184	0.1092 ± 0.0422	22.4618 ± 9.0284
49	0.1073 ± 0.0257	0.0481 ± 0.0148	0.1855 ± 0.0302	0.0383 ± 0.0118	0.0637 ± 0.025	15.5763 ± 6.0433
50	0.1267 ± 0.0466	0.0605 ± 0.0298	0.2057 ± 0.0489	0.0483 ± 0.024	0.0883 ± 0.0586	19.9644 ± 6.2348
51	0.1206 ± 0.0676	0.0587 ± 0.0424	0.1952 ± 0.0734	0.0469 ± 0.034	0.0891 ± 0.0814	13.1784 ± 8.1881
52	0.0793 ± 0.0506	0.0343 ± 0.0293	0.147 ± 0.0597	0.0273 ± 0.0235	0.0452 ± 0.0509	6.3209 ± 8.0471
53	0.1227 ± 0.0417	0.0579 ± 0.0253	0.2015 ± 0.0466	0.0462 ± 0.0203	0.0828 ± 0.0465	10.2832 ± 5.766
54	0.1286 ± 0.0439	0.0615 ± 0.0275	0.208 ± 0.0473	0.0491 ± 0.0221	0.0896 ± 0.0525	12.6441 ± 6.1155
55	0.1342 ± 0.0551	0.0658 ± 0.0352	0.2128 ± 0.0586	0.0525 ± 0.0283	0.0993 ± 0.0695	13.3601 ± 6.6643
56	0.1799 ± 0.0939	0.0985 ± 0.0648	0.2553 ± 0.0921	0.0788 ± 0.0522	0.1732 ± 0.1416	15.0517 ± 7.4861
57	0.1198 ± 0.0759	0.0589 ± 0.0494	0.1933 ± 0.0796	0.047 ± 0.0397	0.0915 ± 0.1005	9.2082 ± 6.8337
58	0.1265 ± 0.0451	0.0604 ± 0.0276	0.2053 ± 0.0499	0.0482 ± 0.0222	0.0878 ± 0.0513	14.9403 ± 7.3883
59	0.1233 ± 0.039	0.0581 ± 0.024	0.2026 ± 0.043	0.0463 ± 0.0193	0.0827 ± 0.045	13.0845 ± 5.505
60	0.169 ± 0.0651	0.0885 ± 0.0446	0.2487 ± 0.0638	0.0708 ± 0.0359	0.1456 ± 0.0961	20.3288 ± 7.9578
61	0.1733 ± 0.099	0.0943 ± 0.0712	0.2485 ± 0.094	0.0755 ± 0.0574	0.1662 ± 0.1664	18.1716 ± 9.7528
62	0.1536 ± 0.062	0.0783 ± 0.0415	0.233 ± 0.0627	0.0626 ± 0.0334	0.1247 ± 0.0872	20.0819 ± 10.686
63	0.1726 ± 0.0842	0.0924 ± 0.0597	0.2501 ± 0.0803	0.074 ± 0.0481	0.1581 ± 0.1358	18.362 ± 8.561
64	0.1617 ± 0.0829	0.0852 ± 0.0579	0.2388 ± 0.0807	0.0682 ± 0.0466	0.1431 ± 0.1299	15.6668 ± 7.8501
65	0.1506 ± 0.0745	0.0774 ± 0.0503	0.2282 ± 0.0746	0.0619 ± 0.0405	0.1257 ± 0.1071	13.2787 ± 6.7699
66	0.0988 ± 0.0531	0.0447 ± 0.0351	0.1728 ± 0.0551	0.0356 ± 0.0283	0.0619 ± 0.074	7.4825 ± 6.5911
67	0.1911 ± 0.0976	0.1062 ± 0.0696	0.2666 ± 0.0921	0.0851 ± 0.0561	0.1907 ± 0.1582	18.765 ± 10.3875
68	0.1518 ± 0.041	0.0759 ± 0.0262	0.2333 ± 0.043	0.0606 ± 0.0211	0.1163 ± 0.0513	18.8087 ± 10.132
69	0.1533 ± 0.0564	0.0775 ± 0.0401	0.2339 ± 0.0538	0.0619 ± 0.0323	0.122 ± 0.0925	18.8107 ± 9.4089
70	0.1569 ± 0.0658	0.0805 ± 0.0469	0.2366 ± 0.0623	0.0644 ± 0.0378	0.1298 ± 0.1072	21.528 ± 9.3147
71	0.0943 ± 0.031	0.041 ± 0.0177	0.1693 ± 0.0371	0.0326 ± 0.0142	0.0526 ± 0.0297	11.0372 ± 7.361
72	0.0839 ± 0.0291	0.0353 ± 0.0158	0.1564 ± 0.0366	0.028 ± 0.0126	0.0434 ± 0.0247	8.1049 ± 6.5332

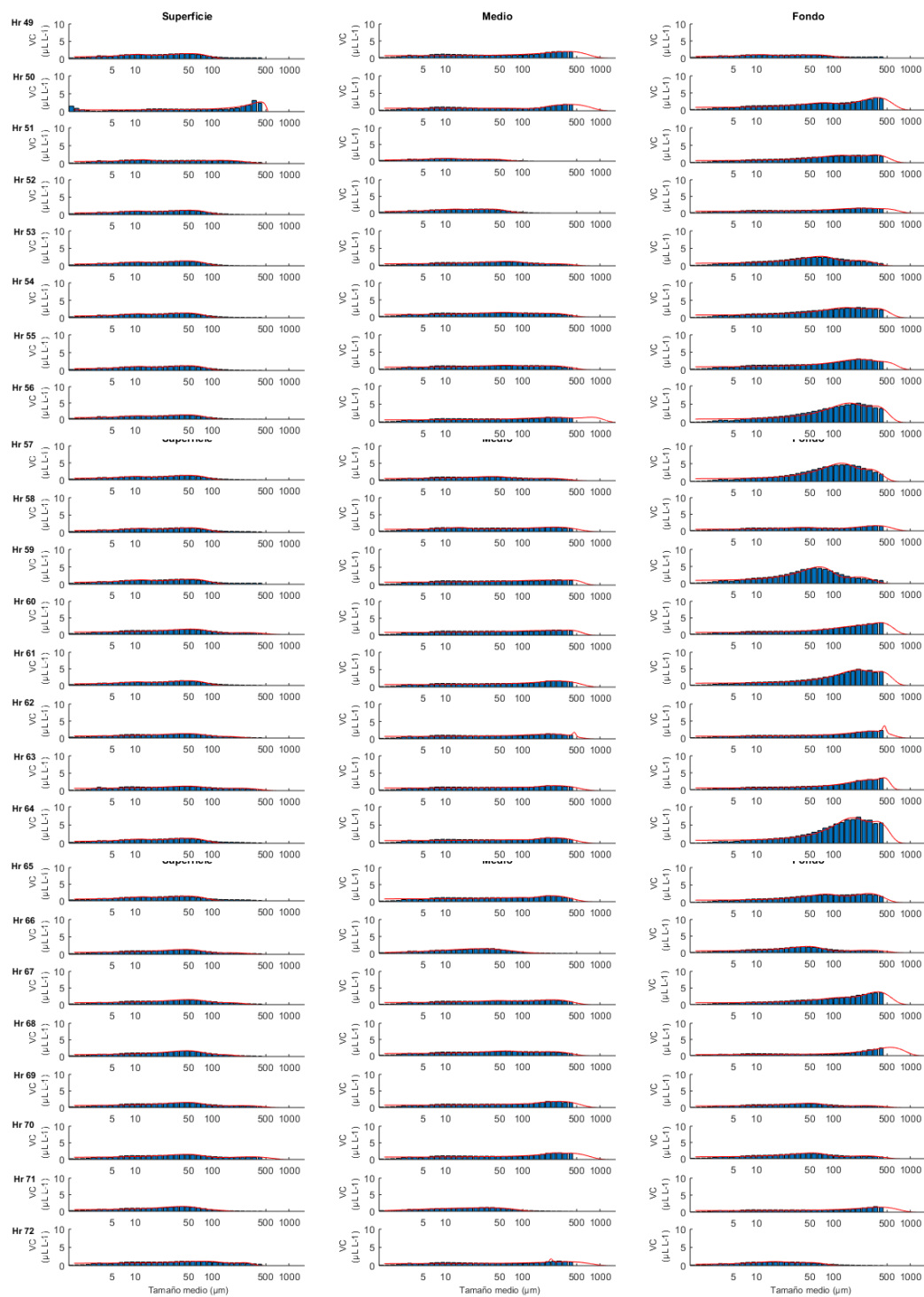


Anexo 2A. Distribución del tamaño de partículas en la capa superficial, media y fondo con ajuste Gaussiano –

Perfiles 1- 24.



Anexo 2B. Distribución del tamaño de partículas en la capa superficial, media y fondo con ajuste Gaussiano –
Perfiles 25- 48.



Anexo 2C. Distribución del tamaño de partículas en la capa superficial, media y fondo con ajuste Gaussiano –
Perfiles 49- 72.