

Caracterización de los sedimentos de fondo del Río de la Plata

Diego Moreira y Claudia Simionato

Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera. CONICET-UBA y UMI/IFAECI.

Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN-UBA.

E-mail: moreira@cima.fceb.uba.com

RESUMEN: Durante 2009 y 2010, se recogieron datos *in situ* (perfiles CTD y de turbidez, muestras de agua y de sedimento de fondo) en 26 sitios del Río de la Plata, durante seis campañas oceanográficas en el marco del experimento FREPLATA/FFEM. Las muestras de sedimentos de fondo fueron procesadas utilizando un analizador de tamaño de partículas por láser (CILAS) para obtener la distribución granulométrica de cada muestra. Se aplicaron nuevas metodologías estadísticas para estudiar la distribución de los sedimentos en el fondo a partir de los nuevos datos colectados en comparación con los datos históricos reportados por otros autores. Los sedimentos de fondo son transportados hacia el mar y tienen una distribución gradacional de texturas progresiva, desde arena en la parte superior, limo en el estuario intermedio y limo arcilloso y arcilla en la desembocadura. A lo largo de esta costa se encuentra limo más grueso en el sedimento de fondo. Este hecho está relacionado en parte con el diferente tipo de descarga del río Paraná y Uruguay y con las corrientes de marea que actúan resuspendiendo los sedimentos. Por otro lado, el viento y las olas favorecen la mezcla vertical durante las tormentas, aumentando la concentración en la superficie. Sobre la costa norte del río intermedio predomina el limo fino en los sedimentos de fondo. La mayor concentración arcilla se encuentra sobre la Barra del Indio, donde probablemente la floculación juega un rol importante en la decantación de los sedimentos más finos en suspensión. En la zona exterior, arena de origen marino prevalece en los sedimentos de fondo.

INTRODUCCIÓN

Área de estudio

El estuario del Río de la Plata (RdP, Figura 1) se encuentra, aproximadamente, entre las latitudes 34°S y 36°S y a una longitud de entre 56°W y 59°W. Está orientado de noroeste a sudeste y presenta una forma de embudo cuya boca lo une con el océano Atlántico. La longitud del RdP es de unos 320 km, mientras que su ancho es variable, con 220 km en la boca y 40 km en la parte superior (Balay, 1961). Posee un área de 35.000 km² y está formado por la confluencia de dos de los ríos más importantes de Sudamérica, el Paraná y el Uruguay, que aportan en conjunto a una descarga líquida media del orden de los 22.500 m³.s⁻¹, aunque con picos extremos que alcanzan valores tan altos como 80.000 m³.s⁻¹ y tan bajos como 8.000 m³.s⁻¹, en relación con los ciclos del ENOS (Jaime *et al.*, 2002). De esta manera, más del 97% del ingreso de agua dulce al RdP proviene de estos dos ríos principales, mientras que sólo el 3% restante es aportado por los ríos menores y arroyos que se encuentran a lo largo de ambas márgenes del estuario. El RdP posee un área de drenaje fluvial de 3,1×10⁶ km², lo que lo ubica en cuarto y quinto lugar en el mundo en descarga fluvial y área de drenaje, respectivamente. El sistema contribuye significativamente a los balances de nutrientes, sedimentos, carbono y agua dulce del Océano Atlántico Sur (Guerrero *et al.*, 2004), afecta la hidrografía de la Plataforma Continental adyacente y la dinámica costera hasta los 23°S (Piola *et al.*, 2000).

Además de la cuestión del intercambio de propiedades tierra-océano, muchas cuestiones ambientales en el RdP y la plataforma adyacente están vinculadas con la distribución de los sedimentos de fondo y su dinámica. Los temas más importantes incluyen la optimización de las operaciones de dragado (por ejemplo, Cardini *et al.*, 2002), la comprensión del cambio geomorfológico (por ejemplo, Codignotto *et al.*, 2012), la contaminación (por ejemplo, Schenone *et al.*, 2007), la ecología bentónica (por ejemplo, Gómez-Erache, 1999), la productividad primaria. (por ejemplo Huret *et al.*, 2005) y la pesca (por ejemplo, Jaureguizar *et al.*, 2008). Sin embargo, el tema ha recibido relativamente poca atención dentro de la comunidad científica, especialmente durante las últimas décadas. La distribución de los sedimentos del fondo superficiales en el RdP fue discutida por López Laborde (1987a, b), Parker *et al.* (1986a, b; 1987), Parker y López Laborde (1989) y Urien (1966; 1967; 1972). Estos trabajos estuvieron basados en un gran número de datos colectados por diversas fuentes y recogidos sobre todo durante los años sesenta y setenta, y sólo analizaron los porcentajes de limo, arcilla y arena presente en las muestras. Más recientemente, López Laborde y Nagy (1999) compilaron los resultados de los trabajos arriba mencionados y presentaron un mapa reelaborado de la distribución de sedimentos de acuerdo con el diagrama de distribución de Shepard (1954). Probablemente debido a la naturaleza de los datos disponibles, su figura es ruidosa y presenta varias características que son difíciles de interpretar a la luz de los más recientes avances sobre la comprensión de la hidrodinámica del estuario (por ejemplo Meccia *et al.*, 2009, 2013; Simionato *et al.*, 2004, 2006a, 2007). Por otra parte, no se cuenta con información sobre la distribución del contenido de agua y material orgánico, histogramas de la distribución granulométrica y muestras simultáneas de sedimentos en suspensión y fondo, lo que limita la interpretación de los procesos físicos subyacentes.

En este Trabajo se describen los resultados del análisis de las muestras de sedimentos de fondo (porcentaje de grava, arena, limo y arcilla, análisis de la distribución granulométrica, contenido de agua y material orgánico) adquiridas durante las campañas oceanográficas realizadas en el marco del experimento FREPLATA-FFEM “Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo: Prevención y Control de la Contaminación y Restauración de Hábitats” (PNUD/GEF/RLA/99/G31), con financiamiento del Fondo Francés para el Medioambiente Global (FFEM). Las mismas involucraron la realización de observaciones repetidas en 6 campañas a lo largo de algo más de un año en 26 puntos del RdP, entre los meses de noviembre de 2009 y diciembre de 2010. Los 26 puntos donde se realizaron estas mediciones se presentan en la Figura 1.

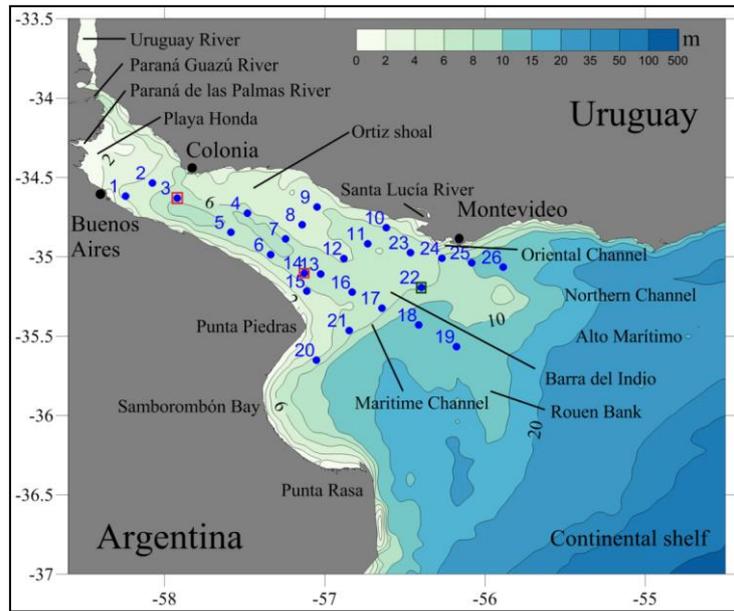


Figura 1. Batimetría del Río de la Plata en metros, puntos de muestreo de las campañas oceanográficas (puntos azules).

Metodología

Propiedades estadísticas

Se aplicaron diferentes métodos estadísticos a los datos adquiridos en los 26 sitios de muestreo durante las 6 campañas oceanográficas. Para estimar las distribuciones medias de arena, limo y arcilla, contenido de agua y contenido de materia orgánica, se calcularon media y el desvío estándar entre muestras, se definidos como:

$$\bar{G} = \frac{1}{6} \sum_1^6 G_j \quad (1)$$

$$\sigma_G = \frac{1}{6} \left[\sum_1^6 (G_j - \bar{G})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

donde G es la variable bajo análisis. Para cada muestra se calculó el tamaño medio del grano, μ , el desvío estándar, σ , y la curtosis Sk , utilizando la metodología sugerida por McManus (1988):

$$\mu = \sum_1^n P_i S_i \quad (3)$$

$$\sigma = [\sum_1^n P_i (S_i - \mu)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$Sk = [\sum_1^n P_i (S_i - \mu)^3]^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

donde i es el tamaño de clase, P_i es el porcentaje del tamaño S_i , y n es la cantidad total de clases de tamaño. Utilizando los estadísticos mencionados, también se calculó el grado de ordenamiento, definido como el cociente entre el desvío estándar (ecuación 4) y el tamaño medio de grano (ecuación 3) (Skene *et al.*, 2005). Además, los sedimentos fueron clasificados acorde con la metodología sugerida por Shepard (1954). Para ello se utilizó el programa SEDPLOT desarrollado por el Woods Hole Institute (<http://woodshole.er.usgs.gov/software/sediment-software.html>) para construir el esquema de clasificación de Shepard según la escala Wentworth (1922).

Análisis de componentes principales

Se aplicó Análisis de Componentes Principales (ACP, Preisendorfer, 1988) para analizar los todos histogramas (5×26) de tamaño de grano obtenidos con los resultados del CILAS de las 26 muestras de las campañas 2 a 6. Las clases elegidas para los resultados de la campaña 1 fueron diferentes para las otras 4 por lo que no son comparables para este análisis. La distribución del sedimento (particularmente si la muestra es bimodal) contiene mucha información en pocos intervalos de clase y poca información en otros, lo que podría resultar en una baja relación entre la señal y el ruido. Para evitar un posible impacto de este hecho en los resultados, el análisis fue aplicado a las anomalías, definida como la diferencia entre el histograma medio (definido como la “media” de todos los histogramas disponibles) y cada muestra. Después del análisis, la señal se recompone con sólo añadir la “media”. El objetivo del ACP es extraer objetivamente “histogramas característicos” de diferentes partes del RdP y, por lo tanto, reducir la dimensionalidad del problema. Este tipo de tratamiento permite tomar en cuenta las relaciones (representada por la matriz de correlación) entre todos los histogramas estudiados. El ACP crea nuevos “histogramas característicos”, las componentes principales (o CP), que no están correlacionados entre sí y que son los autovectores de la matriz de correlación. Se derivan en orden de importancia decreciente de manera que, por ejemplo, la primer CP contiene la mayor varianza posible de los datos originales (histogramas originales). El porcentaje de la varianza total contenido en cada CP se interpreta como la parte “explicada por” el “histograma característico”, representada por el CP. En nuestro caso, este porcentaje será directamente proporcional al número de muestras que están representados por el modo y, por lo tanto, no tiene ningún significado físico directo, excepto que probablemente una varianza mayor esté asociada a un área más grande. El punto más importante de la ACP es que las CPs revelan agrupaciones de histogramas y/o histogramas atípicos que pueden ser difíciles de encontrar por otros medios y que pueden estar asociados a los procesos sedimentológicos. El usuario tiene que mirar a los grupos de “histogramas característicos” sugeridos por las

CPs y considerar si las componentes tienen alguna interpretación razonable o son simplemente artefactos matemáticos. El análisis ACP difiere de la clasificación de Shepard en el hecho de que toma en cuenta la forma de la distribución del tamaño de grano (o histograma) y no sólo las fracciones de limo, arcilla y arena. Por lo tanto, los resultados pueden proporcionar más información acerca de los procesos sedimentológicos. Este análisis ha sido utilizado por otros autores con el mismo objetivo (por ejemplo, Cheng, *et al.*, 2004; Skene *et al.*, 2005).

Vectores de transporte neto

Se aplicó un análisis estadístico de tendencia de tamaños de grano para estudiar los posibles caminos en que son transportados los sedimentos en el RdP. McLaren (1981) y McLaren y Bowles (1985) relacionaron estadísticamente el transporte neto de sedimentos con los cambios en la distribución espacial del tamaño medio de grano (μ , ecuación 3), la varianza (σ^2 ecuación 4) y la curtosis (Sk , ecuación 5). Para dos muestras en sitios vecinos d_1 y d_2 , si la dirección del transporte neto es de d_1 a d_2 , hay dos casos de cambio del tamaño del grano de d_1 a d_2 :

$$\text{Caso 1: } \sigma_2^2 \leq \sigma_1^2, \mu_2 > \mu_1 \text{ y } Sk_2 \leq Sk_1$$

$$\text{Caso 2: } \sigma_2^2 \leq \sigma_1^2, \mu_2 < \mu_1 \text{ y } Sk_2 \geq Sk_1$$

Gao y Collins (1991, 1992) desarrollaron un modelo estadístico bidimensional que deriva una estimación del patrón de transporte de sedimentos neto para muestras de fondo. El método se compone de tres pasos consecutivos. El primer paso consiste en definir vectores de tendencias para una grilla de sitios de muestreo, comparando cada muestra con sus vecinos. Para identificar un sitio “vecino”, se determina una distancia característica (D_{CR}), que representa la escala espacial del muestreo. Si la distancia entre cualesquiera dos sitios cualesquiera es menor que esta distancia característica, se consideran como sitios vecinos y se comparan los parámetros de tamaño de grano. Si se identifica una tendencia entre esos dos sitios, ya sea para el *Caso 1* como para el *Caso 2* (descrito anteriormente), entonces se define un vector adimensional de “tendencia” para el sitio con mayor varianza. La dirección del vector es desde el sitio con mayor varianza hacia el de menor varianza. Se supone, por conveniencia, que la longitud del vector es una unidad. En segundo lugar, en cada sitio de muestreo puede haber más de un vector de longitud unitaria. Por lo tanto, para tales sitios se suman los vectores para producir un único vector:

$$\vec{R}(x, y) = \sum_1^n \vec{r}(x, y)_i \quad (6)$$

donde n es el número de vectores identificados para dichos sitios, $\vec{r}(x, y)$ es el vector tendencia, y $\vec{R}(x, y)$ es la suma de los vectores de tendencia. Tanto el transporte de tendencia real como algo de ruido quedan incluidos en $\vec{R}(x, y)$, aunque la cantidad de ruido se puede haber reducido algo al sumar los vectores.

El tercer paso consiste en eliminar el ruido incluido en los vectores de cada sitio. Se supone que los diversos componentes de ruido no tienen ningún patrón ordenado, de modo que el ruido puede ser eliminado promediando los vectores de un sitio de muestreo en particular con los vectores de los sitios adyacentes. Una

vez más, que un sitio sea contiguo o no se evalúa en base a la distancia característica (D_{CR}) definida anteriormente. El procedimiento de promediado es equivalente a la siguiente transformación matemática para el sitio en el que se define el $\vec{R}(x, y)$:

$$\vec{R}_{av}(x, y) = \frac{1}{k+1} [\vec{R}(x, y) + \sum_1^k \vec{R}_j] \quad (7)$$

donde \vec{R}_j , es el vector de tendencia obtenido a partir de la ecuación (6) en el sitio vecino, y k es el número total de sitios vecinos considerados. Los vectores \vec{R}_{av} pueden definirse como vectores de transporte; forman un patrón residual, con poca influencia del ruido. Si las tendencias residuales tienen un patrón ordenado en la disposición de los vectores de transporte, entonces representarían caminos de transporte neto estadísticamente y conceptualmente posibles.

Por último, la longitud del vector de característica se define como:

$$L = \sum_1^N |\vec{R}_{AV}(x, y)_i| \quad (8)$$

Para el presente trabajo, la longitud del vector característico L se tomó de 1,35.

RESULTADOS

Distribución media de los sedimentos de fondo

Porcentaje de grava

La grava es el material más grueso encontrado en las muestras de fondo con un diámetro mayor a los 2 mm, y se compone principalmente por fragmentos de gasterópodos y bivalvos carbonados.

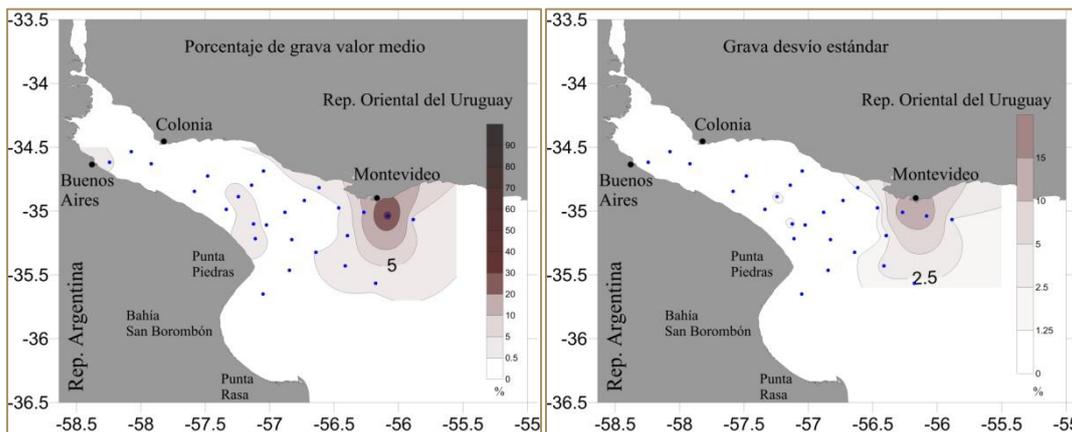


Figura 2. Valor medio del porcentaje de grava (%) en el sedimento de fondo, para las campañas 1 a 5 (panel izquierdo) y desvío estándar (panel derecho).

La Figura 2 muestra la distribución media de grava (panel izquierdo) y el desvío estándar entre muestras (panel derecho). La mayor concentración (entre 10 y 40 %) se encuentra en las estaciones 22, 24 y 25, en la costa norte del estuario exterior, cerca de Montevideo. Se observan proporciones muy bajas (del

orden de 0,5 a 1,5 %) de grava en la costa sur del RdP al norte de Punta Piedras. En el resto del estuario esta textura está ausente. El panel derecho de la figura, muestra el desvío estándar entre muestras, que maximiza en la misma región donde se encuentra la mayor concentración de este material. Esta variabilidad está relacionada probablemente en las pequeñas diferencias de posición en la que se adquirieron las muestras en cada campaña.

Porcentaje de arena

La arena (diámetro de grano medio de 62,5 a 250 μm) encontrado en las muestras de fondo colectadas durante las 6 campañas se presenta en la Figura 3. La misma muestra los valores medios (panel izquierdo) y el desvío estándar (panel derecho). La concentración de arena maximiza en el estuario exterior, donde éste se conecta con la Plataforma Continental adyacente. Allí el porcentaje de arena alcanza el 70% y el tamaño medio de grano es de alrededor de 180 μm , mucho más grueso que en los otros sitios muestreados. El desvío estándar (panel derecho de la Figura 3) es bajo (menos del 5%) indicando baja variabilidad entre muestras. Un porcentaje bajo de arenas muy finas (con valores menores que 70 μm) se observa en el estuario superior y a lo largo de la costa argentina del estuario intermedio, con una desviación estándar algo mayor (hasta 7%).

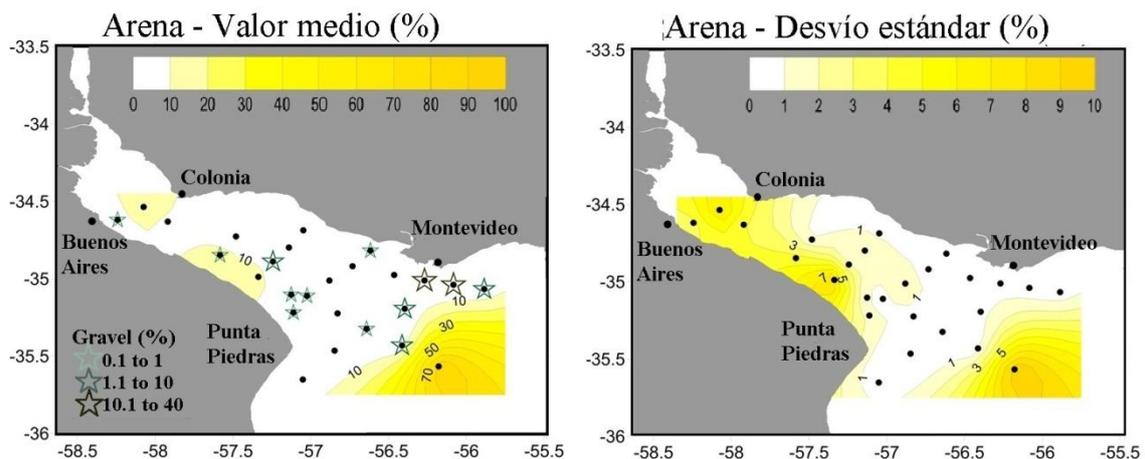


Figura 3. Valor medio del porcentaje de arena (%) en el sedimento de fondo, para las campañas 1 a 5 (panel izquierdo) y desvío estándar (panel derecho).

Porcentaje de limo

La siguiente textura según diámetro medio del grano es el limo, correspondiente a tamaños de entre 3,9 y 62.5 μm . La Figura 4 muestra en el panel izquierdo el valor medio de la concentración limo durante las seis campañas y en el panel derecho, su desvío estándar. Este sedimento está presente en todo el RdP y es el más abundante en el estuario superior y medio. En estas regiones, se observa un marcado gradiente norte-sur con un máximo extendido sobre el Banco Ortíz, donde la concentración excede el 80%. Aquí, el desvío estándar entre muestras es muy bajo, indicando poca diferencia entre las muestras. La orientación de las isolíneas cambia drásticamente aguas debajo de la Barra del Indio, donde se alinean perpendicularmente al

eje del estuario. Allí la concentración decae rápidamente aguas afuera. La máxima variabilidad entre muestras se observa cerca de Montevideo y al norte de Punta Piedras, aunque los valores son pequeños (menos del 10%).

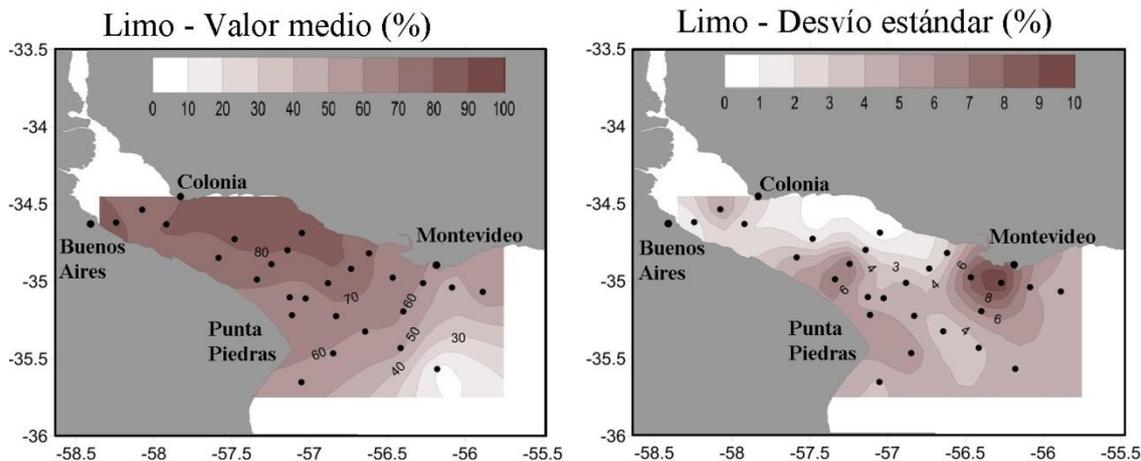


Figura 4. Valor medio del porcentaje de limo (%) en el sedimento de fondo, para las campañas 1 a 6 (panel izquierdo) y desvío estándar (panel derecho).

Porcentaje de arcilla

La concentración media de arcillas, sedimento con diámetro medio menor a $3,9 \mu\text{m}$ se presenta en la Figura 5, panel izquierdo y su desvío en el derecho. En este caso se observa un gradiente que apunta aguas afuera. La concentración de arcilla maximiza aguas debajo de la Barra del Indio, en el área del frente de salinidad de fondo, con valores mayores que el 40%. El desvío estándar es menos que 7% y maximiza a lo largo de la línea imaginaria que conecta Punta Piedras con Montevideo, con máximos absolutos próximos a esas localidades.

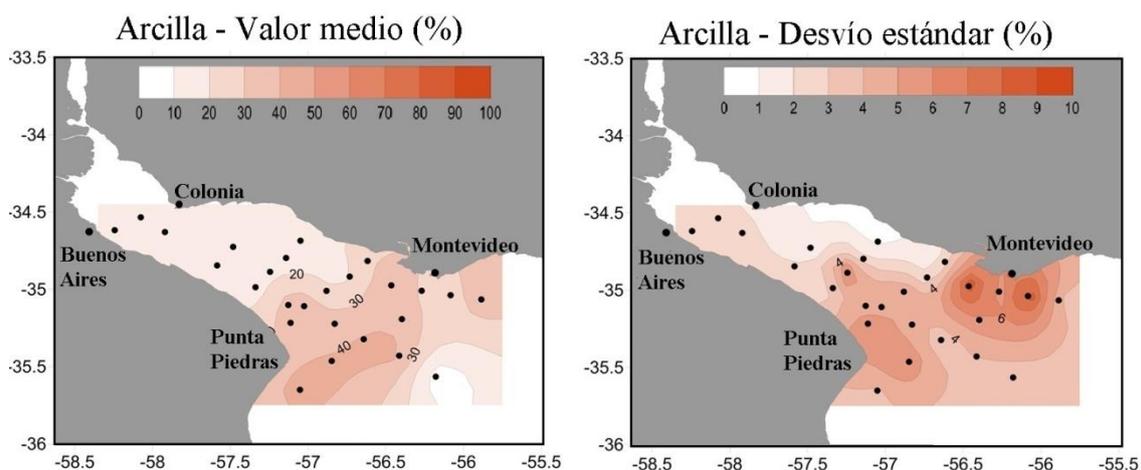


Figura 5. Valor medio del porcentaje de arcilla (%) en el sedimento de fondo, para las campañas 1 a 6 (panel izquierdo) y desvío estándar (panel derecho).

Distribución del contenido de agua y del material orgánico

Contenido de agua

El contenido de agua en las muestras de sedimentos de fondo (Figura 6) se obtuvo a partir de los datos colectados en las primeras cinco campañas y en las 26 estaciones y se asemejan a la distribución de la arcilla, sugiriendo que podrían reflejar en buena medida la porosidad efectiva, relacionada a su vez con el grado de compactación, de los sedimentos de fondo. Dado que el tamaño de la arcilla es muy pequeño, para este tipo de sedimento es más difícil expeler el agua; por lo tanto, el contenido de agua maximiza donde la concentración de esa textura es mayor. La máxima variabilidad de contenido de agua entre muestras se observa en la parte norte del RdP exterior, cerca de Montevideo (Figura 6), en el área relacionada con el desplazamiento forzado por el viento de la pluma de agua dulce del RdP.

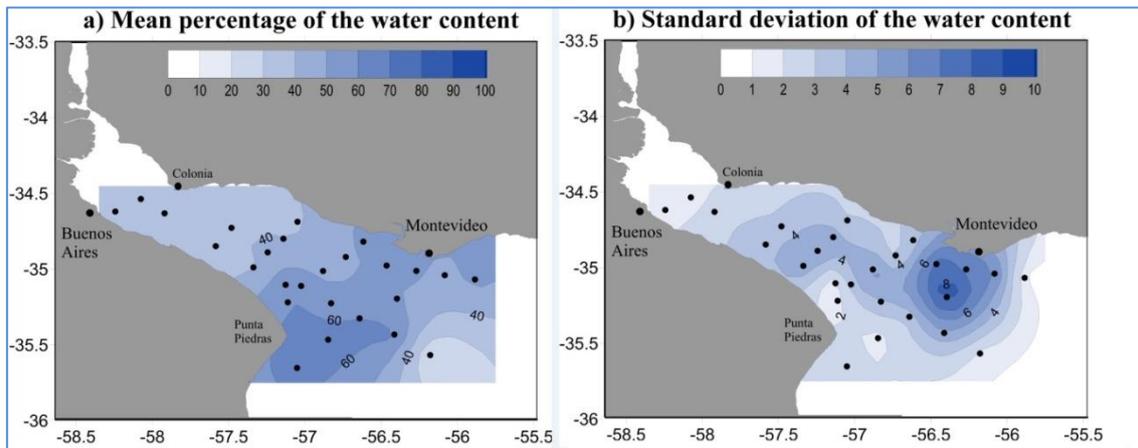


Figura 6. Valor medio del porcentaje de contenido de agua (%) en el sedimento de fondo, para las campañas 1 a 5 (panel izquierdo) y desvío estándar (panel derecho).

Material orgánico

El porcentaje de material orgánico encontrado en las muestras de fondo se presenta en la Figura 7, el panel izquierdo el valor medio encontrado para las seis campañas de medición y en el panel derecho el desvío estándar. Tanto la concentración de material orgánico en los sedimentos de fondo, como el desvío estándar entre muestras maximizan en una zona ancha ubicada aguas debajo de la Barra del Indio. Esta región coincide con el área donde el contenido de agua en el sedimento es máximo, donde está ubicado el frente de salinidad de fondo y donde la turbidez decrece rápidamente hacia el mar. El porcentaje medio máximo es de 5%, mientras que el desvío estándar puede alcanzar el 2,5%.

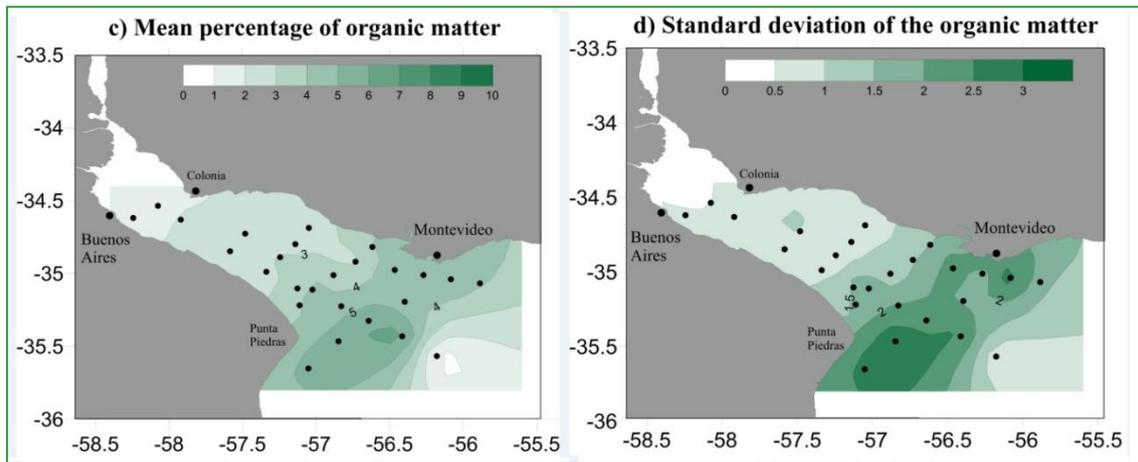


Figura 7. Valor medio del porcentaje de material orgánico (%) en el sedimento de fondo, para las campañas 1 a 6 (panel izquierdo) y desvío estándar (panel derecho).

Distribución de texturas del material de fondo según la clasificación de Shepard

A partir del porcentaje de cada textura, se realizó un diagrama según la clasificación de Shepard (1948) para el RdP sin considerar los depósitos de grava, que se presenta en la Figura 8.

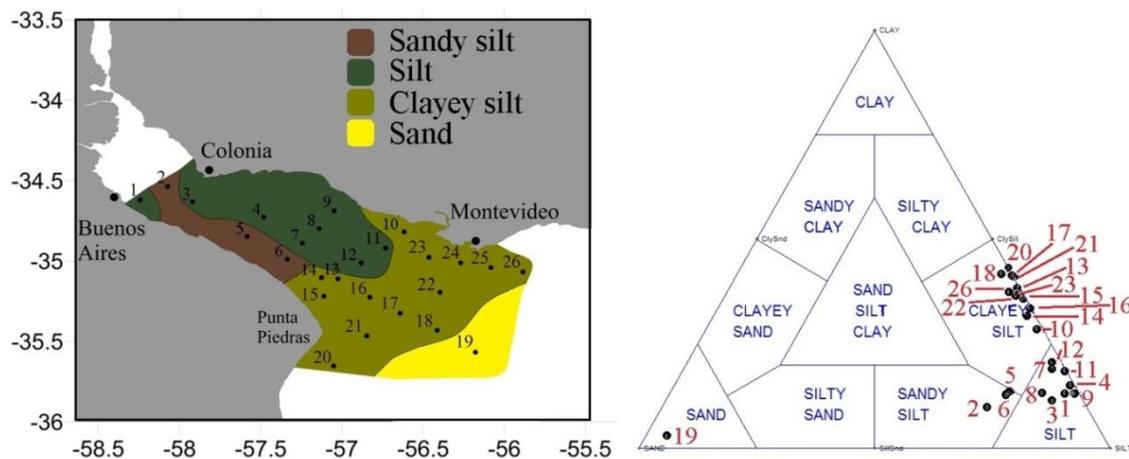


Figura 8. Esquema de distribución granulométrica según la distribución de Shepard (panel izquierdo) y distribución de texturas según Shepard (panel derecho), sin grava.

El panel derecho de dicha figura muestra la clasificación de Shepard, mientras que en el panel izquierdo se puede observar una distribución esquemática de las diferentes texturas del material de fondo sobre todo el RdP siguiendo dicha clasificación. Se observa que los sedimentos clasificados como “arena” se encuentran presentes sólo en la estación 19 (amarillo en el panel izquierdo de la Figura 8), localizada en el estuario exterior; estos sedimentos no parecen tener un origen similar a los sedimentos observados en el resto del RdP. En los sitios 2, 5 y 6 se observa “Limo arenoso” (marrón oscuro en el panel izquierdo de la Figura 8), correspondiendo a la costa Argentina del estuario superior e intermedio. En la costa norte del estuario intermedio, sobre y aguas abajo del Banco Ortiz, estaciones 1 (cercana al puerto de Buenos Aires), 3, 4, 7, 8,

9, 11 y 12, se observan sedimentos clasificados como “limo” (verde oscuro del panel izquierdo). Sedimentos clasificados como “limo arcilloso” están presentes sobre y aguas afuera de la Barra del Indio en los sitios 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23 y 26 (verde claro en el panel izquierdo de la figura).

Análisis de componentes principales de la distribución de los sedimentos de fondo

Un análisis más robusto de la distribución de los sedimentos de fondo, se realizó aplicando Análisis de Componentes Principales (ACP) a los 5×26 histogramas de tamaño de grano obtenidos del CILAS (analyzer de partículas que utiliza un sistema óptico de difracción láser integrado con una cámara CCD, que le permite medir partículas de entre 0.04 y 2500 μm en una sola medición) de las 26 muestras adquiridas en las campañas 2 a 6. El objetivo de este análisis es reducir la dimensionalidad del problema e investigar si es posible derivar patrones de homogeneidad y relaciones significativas entre estaciones, teniendo en cuenta la baja variabilidad entre muestras observada en cada sitio. La Figura 9 muestra los factores de carga correspondientes a cada uno de los tres modos dominantes. Estos factores muestran áreas donde la correlación/anticorrelación entre los “histogramas característicos” sugeridos por las CP y los histogramas reales es grande. Típicamente se considera que los valores son significativos cuando el valor absoluto del factor de carga excede 0,7. Para proporcionar un cuadro integrado, los resultados se resumieron en la Figura 10, que muestra esquemáticamente las cinco regiones diferentes del estuario identificadas por el método de ACP junto con los sedimentos característicos del fondo.

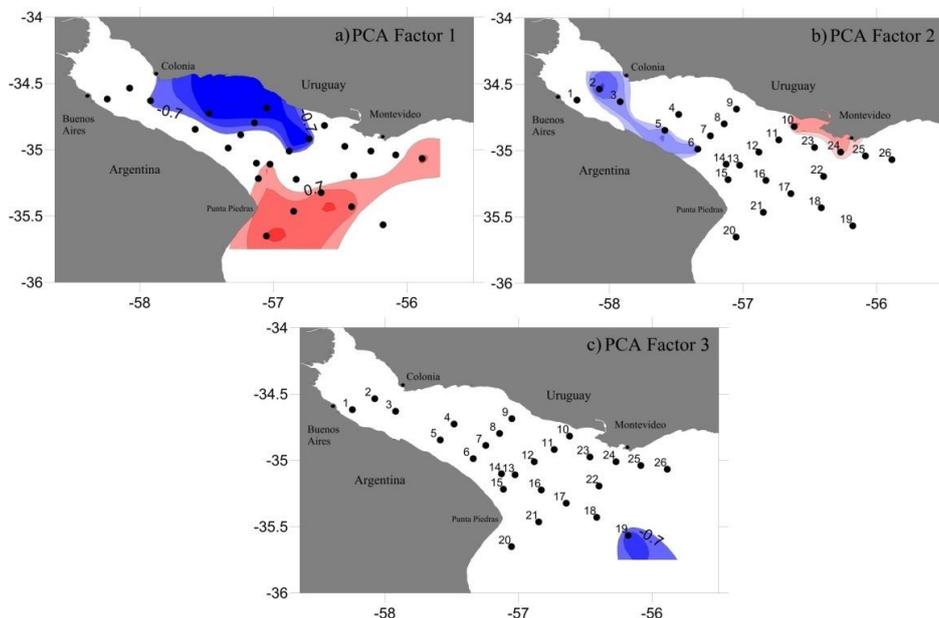


Figura 9. Distribución de los modos o factores (CPs) identificados por el ACP. Panel superior izquierdo muestra el Factor 1, el panel superior derecho el Factor 2 y el panel inferior el Factor 3.

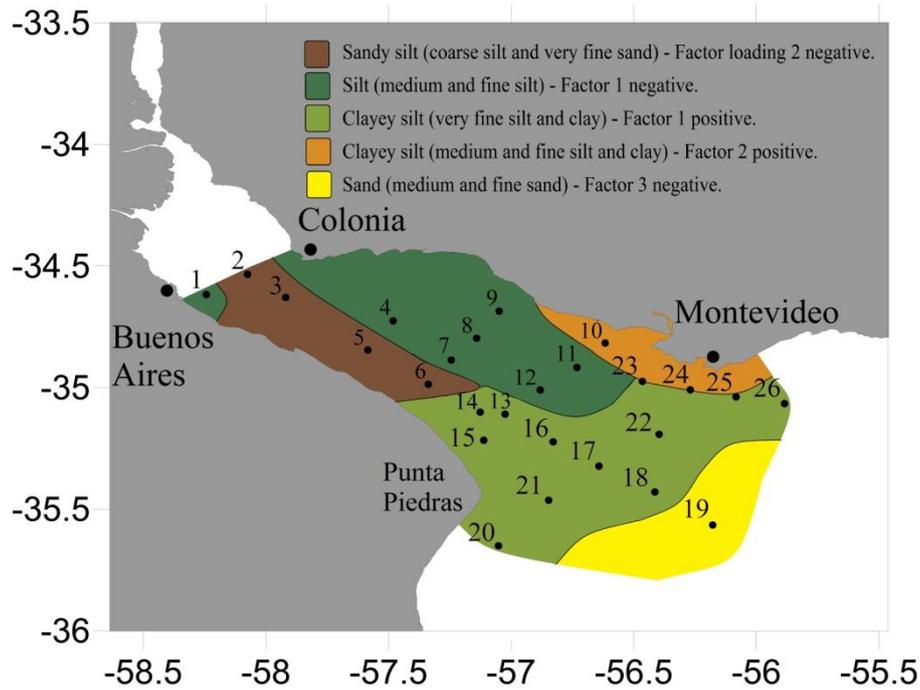


Figura 10. Esquema de distribución granulométrica según la distribución de Shepard derivado a partir del análisis ACP.

La primera “CP”, o Factor 1, (panel izquierdo de la Figura 9) explica un 70% de la varianza total de los histogramas. Los tamaños de grano de las estaciones 1, 4, 7, 8, 9, 11 y 12 (verde oscuro en la Figura 10) se correlacionan negativamente con esta CP, con un valor máximo de correlación (o factor de carga) de -0,98 correspondiente a la muestra colectada en el sitio 9 durante la tercera campaña. Esta estación se encuentra al norte del estuario intermedio, cerca de la costa uruguayana, a una distancia media entre Colonia y Montevideo. La distribución del tamaño de grano de los sitios 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23 y 26 (representada con el color verde claro) se correlacionan positivamente con la CP 1. La mayor correlación entre el modo y los histogramas se observa para la estación 20, localizada al sudeste de Punta Piedras, con un máximo de +0,94 para la muestra adquirida durante la segunda campaña. La segunda CP, o Factor 2 (panel derecho de la Figura 9) explica el 20% de la varianza total de los histogramas. Este modo está bien correlacionado con las muestras adquiridas en las estaciones 24 y 25 y parcialmente en la 23 (color naranja de la Figura 10), que se encuentran cerca de la desembocadura del río Santa Lucía. La mayor correlación, o factor de carga, ocurre en el sitio 10, con un máximo de +0,96 para la muestra colectada durante la cuarta campaña. El Factor 2 está negativamente correlacionado con la distribución de tamaño de grano de las estaciones 2, 3, 5 y 6 (marrón oscuro de la figura); la mayor correlación se observa para el sitio 2 durante la cuarta campaña con un valores máximo de -0,89. Las estaciones correspondientes se localizan a lo largo de la costa sur del estuario intermedio superior. Finalmente, la tercera CP, o Factor 3 (panel inferior de la Figura 9) explica un 5% de la varianza total. Este modo se correlaciona negativamente con la distribución del tamaño de grano para el sitio 19, con un máximo de -0,97 para la muestra colectada durante la quinta campaña. Este sitio se localiza en la región exterior del RdP (color amarillo en la Figura 10). De este modo, el ACP reduce las 130 (5×26)

muestras a 5 “histogramas característicos” que describen los sedimentos de fondo de todo el estuario. Para poder mostrar un histograma real y no el modo CP (que sería difícil de interpretar en términos físicos), la Figura 11 muestra las distribuciones de tamaño de grano características para estas 5 regiones identificadas mediante el ACP, representadas por el histograma con mayor correlación con cada modo, según la Tabla 6.7a, b y c. La fase positiva del Factor 1 (panel *a* de la Figura 11), representada por la estación 20 durante la segunda campaña, corresponde a una región con sedimentos del tipo “limo arcilloso” (con una mezcla de ~54% de limo y ~46% de arcilla, muy pobremente ordenada) con limos muy finos y arcillas (de menos de 5 μm). De aquí en más, nos referiremos a esta zona como la región de “*La Barra del Indio*” (verde claro de la Figura 10). La fase negativa del Factor 1 está representada por el sitio 9 durante la campaña 3 (panel *b* de la Figura 11). Es una zona con texturas del tipo “limo” (sedimentos de similar tamaño, menos del 1% de arena, ~85% de limo y ~14% de arcilla, bien ordenada), con limos medios y finos (diámetros del orden de los 10 a los 30 μm). En lo que sigue esta zona será denominada “*Costa norte del RdP intermedio*” (color verde oscuro de la Figura 11). La fase positiva del Factor 2 está representada por la estación 10 de la tercera campaña, con sedimentos del tipo “limo arcillo” (sedimentos más mezclados con menos del 1% de grava, ~68% de limo y ~31% de arcilla, pobremente ordenado). La distribución del tamaño de grano indica que los sedimentos son limos medios y finos (diámetros hasta 30 μm) con un porcentaje de arcilla (tamaño de 0,1 a 0,4 μm). Esta zona posee más limo que el área asociada a la fase positiva del Factor 1 (panel *b* de la Figura 11). De aquí en más será denotada como región de “*Santa Lucía*” (color naranja en la Figura 10). La fase negativa del Factor 2 (panel *d* de la Figura 11) está representada por el sitio 2 de la cuarta campaña. Está caracterizada por “limo arenoso” (mezcla de sedimentos, ~19% de arena, ~71% de limo, ~9% de arcilla, pobremente ordenada). Esta región será denotada como “*Costa sur del RdP intermedio*” (marrón oscuro en la Figura 10). La distribución del tamaño de grano para esta área muestra diámetros que van de los 30 a los 60 μm para limos gruesos, y hasta 80 μm para la arena muy fina; los sedimentos aquí son más gruesos que en las áreas mencionadas previamente. Finalmente, la fase negativa del Factor 3 (panel *e* de la Figura 11) está representada por la estación 19 en la quinta campaña y caracterizada por “arena” (~94% de arena, ~3% de limo y ~3% de arcilla, bien ordenada), con arena media y fina. El diámetro de grano medio para esta región es del orden de los 200 μm , el mayor encontrado en el estuario. Nos referiremos a esta región como “*RdP exterior*” (amarillo en la Figura 10).

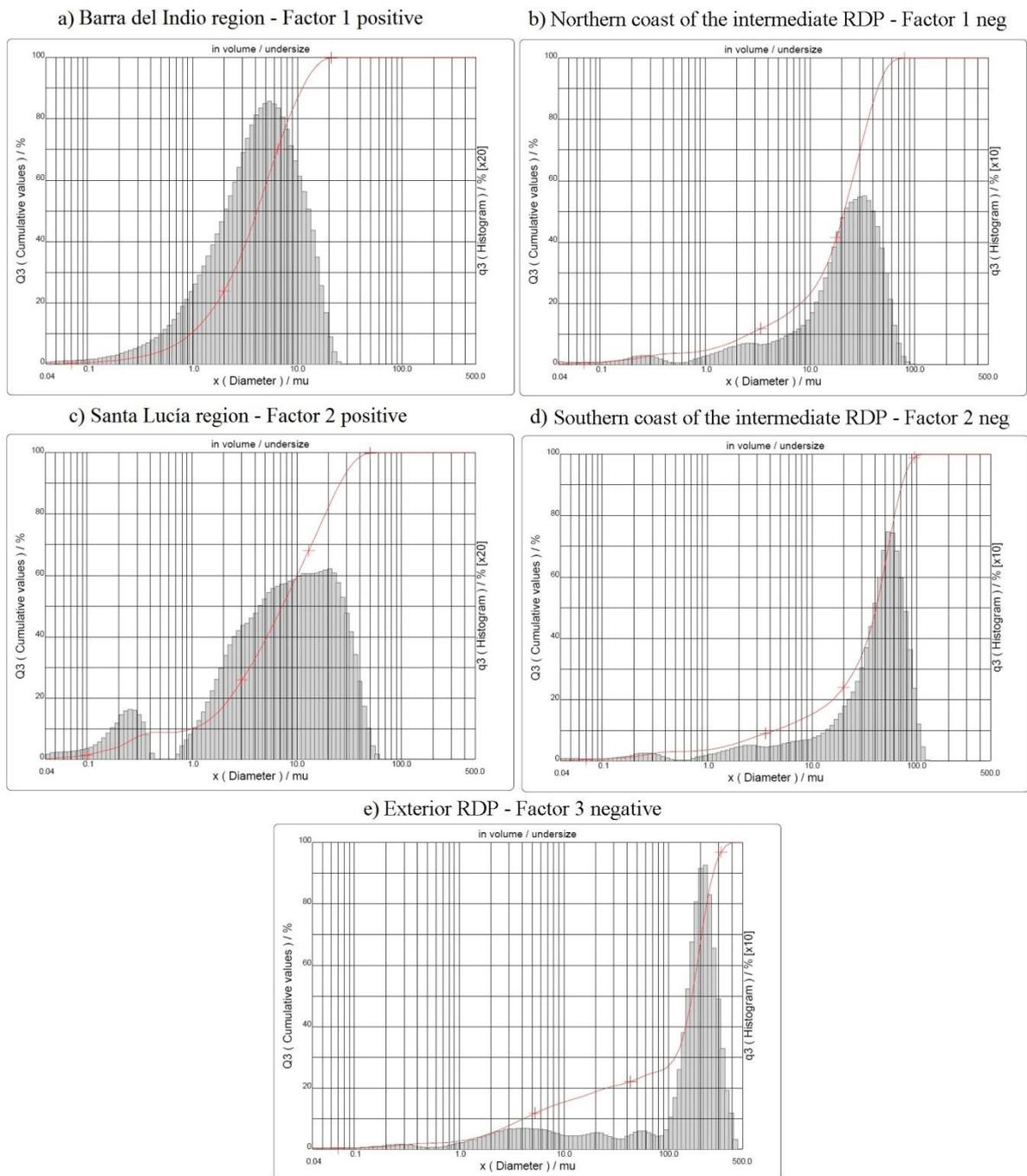


Figura 11. Distribución granulométrica a partir de los histogramas medios realizados con el CILAS y analizados a partir de Componentes Principales.

Análisis de vectores de transporte neto de sedimentos

El conjunto de parámetros de tamaño de grano calculados, se utilizó para realizar un análisis de tendencias con el fin de determinar patrones estadísticamente posibles de transporte neto de los sedimentos según la metodología discutida precedentemente. Para definir los vectores de tendencias y de transporte, se eligió una distancia característica en 60 km (D_{CR}), un poco mayor que la distancia máxima entre estaciones (~ 45 km). Por lo tanto, todas las muestras distanciadas menos de 60 km fueron comparadas entre sí. Los

vectores de transporte, representados en la Figura 12, se obtuvieron de acuerdo con las ecuaciones (6) y (7). Las tendencias residuales de grano de tamaño identificadas muestran un patrón altamente ordenado, con una longitud característica (no dimensional) del vector (L), estimado según la ecuación (8), de 1,35.

Los patrones estadísticos de transporte neto de sedimentos representados por las tendencias granulométricas, revelan varias características distintivas. En primer lugar, en la mayor parte del RdP el transporte de sedimentos es hacia el sudeste, es decir, hacia el mar, como era esperable. Esto ocurre para cada punto muestreado, con la excepción de la estación 19, en la cual el modelo sugiere un transporte neto inverso. Para la estación 18 también se encuentra un transporte hacia el interior, pero la longitud del vector asociado es muy pequeña, casi despreciable. La Figura 12 también revela que el transporte estadístico neto de sedimentos aumenta desde la cabecera del estuario hacia el RdP intermedio, y luego disminuye de nuevo hasta la Barra del Indio. Esto sugiere una convergencia en esta última región.

La divergencia en el transporte sugerida por la Figura 12 para las estaciones 1, 2 y 3, y las que se encuentran inmediatamente aguas abajo, parece ser un artificio matemático más que una característica real, debido a la poca cantidad de observaciones realizadas en el estuario superior.

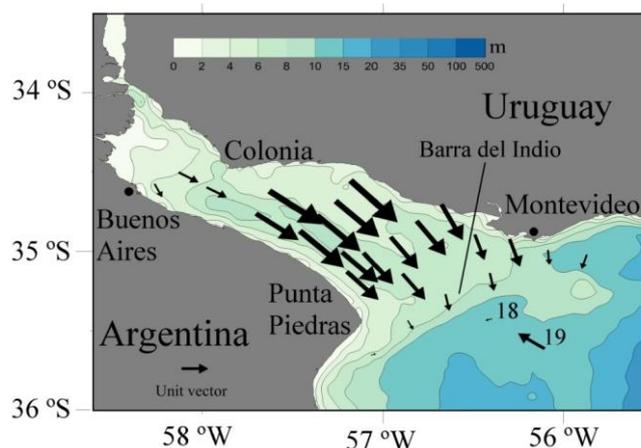


Figura 6.12. Vectores de transporte estadístico neto para el RdP.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis de los vectores de transporte (Figura 12) sugiere que a lo largo del estuario superior e intermedio, hasta la Barra del Indio, los sedimentos son transportados hacia el sudeste. Aguas afuera de la cuña de agua salina, la textura que predomina es arena gruesa (Figura 3), y el contenido de agua y material orgánico vuelve a disminuir. Las características de los sedimentos en esta área son diferentes de los sedimentos suspendidos encontrados en todo el estuario (Figura 10). Aquí los vectores de transporte neto sugieren una inversión en la dirección (Figura 12) y por lo tanto una convergencia. En el sector norte del estuario exterior, aguas afuera de Montevideo, son más abundantes los depósitos más gruesos (restos de caracoles carbonados con textura de grava), mientras que al noreste de Punta Piedras se observa un porcentaje mucho menor de este material.

Los resultados del ACP (figuras 10 y 11) y argumentos teóricos (algunos ya sugeridos en otros trabajos) muestran por primera vez que, en lo que se refiere a los sedimentos de fondo, el RdP se puede dividir en cinco regiones diferentes en donde los procesos sedimentológicos parecerían estar fuertemente influenciados por la hidrodinámica.

- 1) *El frente del Delta del Paraná / Playa Honda.* Trabajos previos mostraron que arena fina acarreada por los tributarios principales del RdP se depositan en la cabecera del estuario (no muestreada durante los experimentos de FREPLATA/FFEM), formando el Delta del Paraná y Playa Honda. Los sedimentos finos permanecen en suspensión dentro de los ríos tributarios debido a los grandes niveles de turbulencia, pero cuando la profundidad y el ancho del estuario aumentan, la velocidad de la corriente disminuye, y rápidamente se depositan en el fondo (Moreira *et al.*, 2013; Simionato *et al.*, 2004 y 2009). En esta región también se deposita la arena más gruesa transportada como carga de fondo, habiéndose estimado que los depósitos alcanzan los 15 millones de toneladas año⁻¹ (Amsler 1995, Amsler y Drago, 1988).
- 2) *El RdP intermedio*, que a su vez se puede dividir en una parte norte y una parte sur. En esta región predomina el limo, con porcentajes mayores al 70%, sobre la arcilla y la arena (Figura 4). La concentración de arcilla crece progresivamente aguas afuera, de modo que en el área del frente de salinidad de fondo (inmediatamente después de la Barra del Indio) los sedimentos de fondo se componen en su mayoría, de concentraciones casi iguales de limo fino y arcilla (Figuras 4 y 5). El dominio progresivo en el estuario intermedio de los sedimentos más finos sería debido a que la arcilla, más pequeña y liviana que el limo, puede permanecer en suspensión por más tiempo y recorrer mayores distancias desde su fuente. Además, las velocidades de la corriente media en el RdP disminuyen rápidamente aguas afuera, a medida que el estuario se ensancha y su profundidad aumenta, favoreciendo la deposición. Sin embargo, el análisis aquí presentado muestra un marcado gradiente de las características de las mezclas de sedimentos entre las porciones norte y sur del RdP, que no puede explicarse únicamente en términos de la reducción generalizada del transporte medio. La costa norte del estuario intermedio está caracterizada por sedimentos mejor ordenados conformados en más de un 85% por limo, con diámetros de entre 10 y 30 μm . En cambio, la costa sur está caracterizada por sedimentos más gruesos, con diámetros entre los 30 y 60 μm . En esta última región, aunque más del 70% de los sedimentos de fondo son limos, el porcentaje de arena alcanza casi el 20%. La dinámica del estuario debe jugar un rol significativo. En este sentido, se pueden identificar dos procesos, que pueden actuar individualmente o de forma sinérgica, que podrían explicar las diferencias observadas:
 - a. *Diferencias en los caminos de las plumas de agua dulce de los principales tributarios al estuario.* Este mecanismo fue sugerido por Parker *et al.* (1987). Las aguas de los ríos Uruguay y Paraná Guazú (la rama más caudalosa del Paraná), fluyen a lo largo del estuario norte, mientras que las aguas de la otra rama del Paraná (el Paraná de las Palmas) fluye a lo largo de la costa sur (Simionato *et al.*, 2009). Justo antes de la convergencia con el RdP, el Paraná de las Palmas recibe el agua del río Luján. Este tributario, con un caudal mucho menor, descarga agua y

sedimento de la región Pampeana y su influencia es obvia en otras propiedades, como por ejemplo en la baja conductividad en la porción sur del RdP (Simionato *et al.*, 2009).

- b. *La hidrodinámica de la marea.* Las corrientes de marea son más intensas a lo largo de la costa sur del RdP (Simionato *et al.*, 2004) y podría ser una causa adicional de las mayores concentraciones de sedimentos suspendidos a lo largo de la costa Argentina respecto de la Uruguaya. En contraste, a lo largo de la costa norte y sobre la región del Banco Ortíz, las corrientes de marea son más débiles y los sedimentos pueden depositarse.
- 3) *Sobre e inmediatamente aguas afuera de la Barra del Indio,* en la región del frente de salinidad de fondo, el porcentaje de arcilla en los sedimentos de fondo alcanza más del 45% y los contenidos de agua y material orgánico alcanzan su máximo. La presencia de sedimentos más finos y cohesivos en esta área podría ser debida, por lo menos en parte, al aumento de la salinidad y los procesos de floculación asociados, que se supone que comienzan a ser importantes en esta región llevando a una deposición de las arcillas (Ayup, 1986, 1987; Parker *et al.*, 1987). La profundidad y el ancho del estuario también aumentan rápidamente en esta región, conduciendo a una significativa disminución de las corrientes (Simionato *et al.*, 2004), lo que también favorece la deposición. Siendo más finos, los sedimentos en esta región son más porosos y, por lo tanto, el contenido de agua es mayor.
- 4) Los análisis realizados revelan la presencia de una textura de sedimento de fondo diferente a lo largo de la costa norte del estuario, en el *área entre el río Santa Lucía y Montevideo.* Aquí los sedimentos de fondo se componen de limo fino (casi el 70%) y arcilla (el 30% restante). La composición particular de estos sedimentos, que no muestran una coherencia con los sedimentos suspendidos en esta área sugiere que son sedimentos de fondo relictos. Parker *et al.*, (1987) sugirieron la ocurrencia de una región con barros relictos a lo largo de la costa norte del RdP, aunque la localizaron aguas afuera y corriente arriba de la desembocadura del río Santa Lucía.
- 5) Finalmente, en el *estuario exterior,* al sudeste del frente de salinidad de fondo domina la arena gruesa con diámetros de entre 170 a 200 μm . Esta arena es mucho más gruesa que la transportada por el RdP, indicando que debe provenir de la Plataforma adyacente. De hecho, esta arena con $d_{50} \sim 180 \mu\text{m}$ es característica de la zona marítima (Ottman y Urien, 1966; Parker *et al.*, 1987). La ausencia de sedimentos típicos del RdP en esta región también sugiere que el límite exterior de los depósitos significativos de sedimentos del RdP, formando el delta sumergido, ocurre justo aguas arriba en asociación con la cuña salina y la región de floculación. Esta hipótesis es respaldada por el análisis de vectores de transporte neto, que indica que en el área hay una reversión del transporte y, por lo tanto, convergencia.

En este Trabajo se analizó el nuevo conjunto de datos de propiedades de los sedimentos de fondo en el RdP derivados a partir de muestras colectadas en el estuario superior e intermedio. El objetivo fue proporcionar una caracterización comprensiva y objetiva de la distribución media (en un período largo) de los sedimentos de fondo, estudiar su composición, y progresar en la construcción de un modelo conceptual acerca de los mecanismos físicos involucrados. Este nuevo conjunto de datos, proporcionó por primera vez

observaciones simultáneas de la distribución granulométrica de los sedimentos de fondo y suspendidos, y de contenido de agua y material orgánico en los sedimentos de fondo, lo que permitió avanzar en la comprensión de los diversos procesos físicos que determinan la distribución media observada. Además, el hecho de que las nuevas muestras fueron analizadas utilizando CILAS, permitió la aplicación de herramientas estadísticas más robustas, como Análisis de Componentes Principales, para caracterizar objetivamente las áreas con distribución de sedimentos de fondo similares. Finalmente, la homogeneidad del muestreo permitió la construcción del primer diagrama de vectores de transporte neto para la región.

Los resultados muestran que los sedimentos de fondo tienen un ordenamiento gradual de texturas a medida que son transportados aguas afuera, con un dominio de la arena en la cabecera, del limo en el estuario intermedio, y de la arcilla limosa y la arcilla en la boca. Las texturas se tornan progresivamente peor ordenadas aguas afuera, y el contenido de agua y material orgánico aumenta; consistentemente, la velocidad de caída decrece. La distribución del contenido de agua y material orgánico se parece a la de la arcilla, sugiriendo que pueden reflejar en cierta medida el grado de compactación de los sedimentos de fondo. Los depósitos más gruesos (caracoles carbonados) son más abundantes en el sector norte del estuario exterior, cercano a Montevideo, y al noroeste de Punta Piedras en menores porcentajes.

El patrón de distribución de texturas inferido parece estar fuertemente relacionado con la geometría y con lo que se conoce de la hidrodinámica del estuario. A lo largo de la costa norte del RdP intermedio, predomina un limo fino mejor ordenado, mientras que en la costa sur, prevalece limo más grueso peor ordenado. Esto podría deberse a las diferencias en las corrientes de marea y/o los diferentes caminos que siguen las aguas provenientes de los tributarios a lo largo de ambas costas. A lo largo de la Barra del Indio, prevalece la arcilla sobre el limo y la arena, y los contenidos de agua y material orgánico alcanzan su máximo. Los procesos fisicoquímicos de floculación son, probablemente, importantes en la zona; esto, junto con la significativa disminución de las corrientes producida por el aumento del ancho y la profundidad del estuario favorecen la deposición de los sedimentos más finos. Inmediatamente aguas afuera de la cuña de agua salina, el transporte neto invierte su dirección y prevalece arena más gruesa y mejor ordenada. Esta arena es mucho más gruesa que los sedimentos transportados por los tributarios del RdP, sugiriendo que provienen de la Plataforma adyacente. Entre la desembocadura del río Santa Lucía y Montevideo, se observa un tipo de sedimento diferente, limo fino y arcilla pobremente ordenado, que parecen ser sedimentos relictos. El transporte neto inferido sugiere convergencia inmediatamente aguas afuera de la Barra del Indio, que es consistente con el crecimiento de los bancos observado en el RdP.

Los resultados discutidos previamente no sólo complementan sino que también validan algunas de las hipótesis de Parker *et al.* (1987) en su estudio pionero. Su Figura 3 muestra esquemáticamente sus conclusiones sobre la asociación genética de los sedimentos, y basada en la limitada información disponible en ese momento, tiene muchos aspectos en común con la Figura 10, basada en un estudio objetivo de un conjunto homogéneo de muestras analizadas con métodos modernos. En este sentido, este estudio respalda la mayoría de las conclusiones de Parker *et al.* (1987) y proporciona evidencia adicional acerca de otros mecanismos posibles que influyen la textura de los sedimentos de fondo en el RdP.

REFERENCIAS

- Amsler, M., 1995. "Carga de lavado del Río Paraná en sus tramos medio e inferior, Origen, comportamiento anual, concentraciones y caudales sólidos. Análisis del avance del frente del delta del Río Paraná". Ezeiza, Argentina: Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua (INA). *Technical Report*, 48p.
- Amsler, M. y Drago E., 1988. Suspended sediment at a cross section of the middle Paraná River: concentration, granulometry y influence of the main tributaries. *In: Bordas, M.P. y Walling, D.E. (eds), Sediment Budgets: Porto Alegre Symposium, Brazil, 1988: IAHS Publication No.174.* Porto Alegre, Brazil: International Association of Hydrological Sciences, pp. 381-396.
- Balay, M.A., 1961. "El Río de la Plata entre la atmósfera y el mar". *Publicación. H-621. Buenos Aires: Servicio de Hidrografía Naval.* Armada Argentina. pp. 153.
- Cardini, J.C., Garea, M., y Campos, M.R., 2002. "Modelación del transporte de sedimentos puestos en suspensión por actividades de dragado en el Río de la Plata, para la generación en tiempo real de pronósticos de afectación de áreas costeras". *Proceeding of the Congreso de Mecánica Computacional (Santa Fé- Paraná, Argentina)*, 21, pp. 2325-2342.
- Cheng, P., Gaob, S., y Bokuniewicz, H., 2004. "Net sediment transport patterns over the Bohai Strait based on grain size trend analysis". *Estuarine, Coastal y Shelf Science*, 60, 203-212.
- Codignotto, J.O., Dragani, W.C., Martin, P.B., Campos, M.I., Alonso, G., Simionato, C.G. y Medina, R.A. 2011, "Erosion at the samborombón bay and changes in wind direction, province of buenos aires, Argentina". *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales, Nueva Serie*, vol. 13, no. 2, pp. 135-138.
- Gao, S. y Collins, M., 1991. "A critique of the 'McLaren Method' for defining sediment transport paths". *Journal of Sedimentary Petrology*, 61, 143-146.
- Gao, S. y Collins, M., 1992. "Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of 'transport vectors'". *Sedimentary Geology*, 80, 47-60.
- Gómez-Erache, M., 1999. "Spatial and temporal variation in the copepod community of Montevideo Bay, Uruguay". *Proceedings of the Seventh International Conference on Copepoda (Curitiba, Brazil)*, pp 25-31.
- Guerrero, R.A., Molinari, G. y Jauregui, S., 2004. "Datos meteorológicos y climatología". Informe Final. Informe FREPLATA INIDEP A5.21, 13 pp. (<http://www.freplata.org>).
- Huret, M., Dadou, I., Dumas, F., Lazure, P. y Garçona, V., 2005. "Coupling physical and biogeochemical processes in the Río de la Plata plume". *Continental Shelf Research*, 25 (5-6), 629-653.
- Jaime, P.R. y Menéndez, A.N., 2002. "Análisis del régimen hidrológico de los ríos Paraná y Uruguay". Informe LHA-01-216-02, INA, Ezeiza.

- Jaureguizar, A., Militelli, M., y Guerrero, R., 2008. "Distribution of *Micopogonias Furnieri* at different maturity stages along an estuarine gradient y in relation to environmental factors". *Journal of the Marine Biological Association*, 88(1), 175-181.
- López Laborde, J., 1987a. "Distribución de sedimentos superficiales de fondo del Río de la Plata Exterior y Plataforma adyacente". *Investigaciones Oceanológicas*, 1(1), 19-30.
- López Laborde J., 1987b. "Caracterización de los sedimentos superficiales de fondo del Río de la Plata exterior y plataforma adyacente". *Anales Científicos Universidad Nacional Agraria La Molina*, 11, 33-47.
- López Laborde, J. y Nagy, G. J., 1999. "Hydrography y sediment transport characteristics of the Río de la Plata: a review". Perillo, G.M.E., Piccolo, M.C., y Pino, M. (eds.), *Estuaries of South America: Their geomorphology y dynamics*. New York: Springer, pp.133-160.
- McManus, J., 1988. "Grain size determination y interpretation". Tucker, M. (ed.), *Techniques in Sedimentology*. Oxford: Blackwell, pp. 63-85.
- McLaren, P., 1981. "An interpretation of trends in grain-size measurements". *Journal of Sedimentary Petrology*, 51, 611-624.
- McLaren, P. y Bowles, D., 1985. "The effects of sediment transport on grain-size distributions". *Journal of Sedimentary Petrology*, 55, 457-470.
- Meccia, V.L., Simionato, C.G., Fiore, M.M.E., D'Onofrio, E., y Dragani, W.C., 2009. "Sea surface height variability in the Río de la Plata estuary from synoptic to inter-annual scales: results of numerical simulations". *Estuarine, Coastal y Shelf Science*, 85(2), 327-343.
- Meccia, V.L., Simionato, C.G., y Guerrero, R., 2013. "The Río de la Plata estuary response to wind variability in synoptic time scale: salinity fields y breakdown y reconstruction of the salt wedge structure". *Journal of Coastal Research*, 29(1), 61-77. doi: 10.2112/JCOASTRES-D-11-00063.1.
- Moreira, D., Simionato, C.G., Gohin, F., Cayocca, F., y Luz Clara Tejedor, M., 2013. "Suspended matters mean distribution y seasonal cycle in the Río de la Plata estuary y the adjacent shelf from MODIS y in situ observations". *Continental Shelf Research*, 68, 51-66.
- Parker, G., Cavalloto, J.L., Marcolini, S., y Violante, R., 1986a. "Los registros acústicos en la diferenciación de sedimentos subácueos actuales (Río de la Plata)". *Proceedings of the 1er Reunión de Sedimentología* (La Plata, Argentina), pp. 42-44.
- Parker, G., Cavalloto, J.L., Marcolini, S., y Violante, R., 1986b. "Transporte y dispersión de los sedimentos actuales del Río de la Plata (análisis de texturas)". *Proceedings of the 1er Reunión de Sedimentología* (La Plata, Argentina), pp. 38-41.
- Parker, G., Marcolini, J., Cavalloto, J., y Violante, R., 1987. "Modelo esquemático de dispersión de sedimentos en el Río de la Plata". *Ciencia y Tecnología del Agua*, 1(4), 68-80.

- Parker, G. y López Laborde, J., 1989. "Estudio para la Evaluación de la Contaminación en el Río de la Plata, Aspectos geológicos". CARP-SHIN-SOHMA, Informe de Avance a la Comisión Administradora del Río de La Plata, *Report*, pp.1-72.
- Piola, A.R., Campos, E.J., Möller, O.O., Charo M. y Martinez, C., 2000. "Subtropical shelf front of eastern South America". *Journal of Geophysical Research* 105(C3), 6565-6578.
- Preisendorfer, R.W., 1988. "Principal Component Analysis in Meteorology y Oceanography". Amsterdam: Elsevier, 425p.
- Schenone, N; Volpedo, A.V. y Fernandez Cirelli, A., 2007. "Trace metal contents in water and sediments in Samborombón Bay wetland, Argentina". *Wetland ecology and management* 15: 303-310.
- Shepard, F.P., 1954. "Nomenclature based on sy-silt-clay ratios". *Journal of Sedimentary Petrology*, 24, 151-158.
- Simionato, C.G., Dragani, W.C., Meccia, V.L., y Nuñez, M.N., 2004. "A numerical study of the barotropic circulation of the Río de la Plata Estuary: sensitivity to bathymetry, Earth rotation y low frequency wind variability". *Estuarine, Coastal y Shelf Science*, 61, 261-273.
- Simionato, C.G., Meccia, V.L., y Dragani, W.C., 2009. "On the path of plumes of the Río de la Plata estuary main tributaries y their mixing time scales". *Geoacta*, 34, 87-116.
- Simionato, C.G., Meccia, V.L., Dragani, W.C., Guerrero, R., y Nuñez, M.N., 2006. "The Río de la Plata Estuary response to wind variability in synoptic to intra-seasonal scales: barotropic response". *Journal of Geophysical Research*, 111, C09031.doi:10.1029/2005JC003297.
- Simionato, C.G., Meccia, V.L., Guerrero, R.A., Dragani, W.C., y Nuñez, M.N., 2007. "The Río de la Plata estuary response to wind variability in synoptic to intra-seasonal scales: 2. Currents' vertical structure y its implications for the salt wedge structure". *Journal of Geophysical Research*, 112, C07005.doi:10.1029/2006JC003815.
- Skene, D., Ryan, D., Brooke, B., Smith, J., y Radke, L., 2005. "The Geomorphology y Sediments of Cockburn Sound". *Geoscience Australia, Record* 2005/10, pp. 90.
- Urien, C.M., 1966. "Distribución de los sedimentos en el Río de la Plata Superior". Boletín Servicio de Hidrografía Naval, *Technical Report No.3*, pp. 197-203.
- Urien, C.M., 1967. "Los sedimentos modernos del Río de la Plata Exterior". Servicio de Hidrografía Naval, Argentina, Público H-106, *Technical Report No. 4*, pp. 113-213.
- Urien, C.M., 1972. "Río de la Plata Estuary environments". *Geological Society of America Memoirs*, 133, 213-234.
- Wentworth, C.K., 1922. "A scale of grade y class terms for clastic sediments". *Journal of Geology*, 30, 377-392.