



Universidad de Buenos Aires

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos

Tesis de Licenciatura en Oceanografía

**Estudio de la relación entre turbidez y concentración de sedimentos
en suspensión en función de la granulometría en el Río de la Plata**

Tesista: Giuliana Berden

Directores: Dra. Claudia Simionato, Dra. Ana Dogliotti y Lic. Diego Moreira

Índice

Resumen	4
1. Introducción	5
1.1 Motivación	5
1.2 Objetivos	8
1.3 Área de estudio	9
2. Datos y metodología	20
2.1 Datos	20
2.1.1. Campañas de observación	21
2.1.2. Análisis aplicados a las muestras	23
2.1.2.1. Turbidez superficial	23
2.1.2.2. Concentración de MPS superficial	24
2.1.2.3. Análisis granulométrico de sedimentos en suspensión	26
2.1.3. Control de calidad	27
2.2. Metodología	29
2.2.1. Análisis estadístico básico	29
2.2.2. Componentes principales	30
2.2.3. Test de regresión lineal	31
2.2.4. Test de paralelismo	31
2.2.5. Análisis Wavelet Morlet	32
2.2.6. Análisis espectral cruzado	33
3. Resultados	34
3.1. Campos medios y variabilidad	34
3.1.1. Turbidez superficial	34

3.1.2. Concentración de MPS en superficie	36
3.1.3. Análisis granulométrico de sedimentos en suspensión	37
3.2. Componentes principales	41
3.3. Relación entre turbidez y concentración de MPS en superficie	47
3.4. Descarga del Río Bermejo	49
3.5. Variabilidad de la relación entre turbidez y concentración de MPS en relación a resuspensión	53
3.5.1. Análisis Wavelet Morlet	56
3.5.2. Filtrados de series	59
3.5.3. Análisis espectral cruzado	63
4. Discusión y conclusiones	67
Bibliografía	72

Resumen

El problema de los sedimentos en estuarios y mares costeros es complejo. Esto hace que las observaciones sean indispensables para describir y entender los procesos que localmente son importantes y para calibrar y validar los modelos numéricos. De esta manera, las aplicaciones generalmente se realizan a través de estudios de modelado numérico apoyados por observaciones in situ y/o remotas. Existe un considerable interés en el uso de datos remotos para proporcionar mapas sinópticos de material particulado en suspensión (MPS) en aguas costeras. Sin embargo aún no se dispone de algoritmos que sean válidos a nivel global para estimar las concentraciones de sedimentos a partir de observaciones satelitales. Las observaciones remotas son generadas a partir de las propiedades ópticas (como la absorción y dispersión) del agua y sus componentes. De esta manera, a partir de las observaciones remotas se puede obtener por ejemplo información de la turbidez, definida como la dispersión de la luz a 90° con respecto a una sustancia de referencia (Formazina). Luego, a partir de una relación local entre turbidez y MPS pueden obtenerse mapas de MPS a partir de sensores remotos (Dogliotti et al. 2015). La relación empírica entre la turbidez y la concentración de MPS presenta diferencias en función del conjunto de datos utilizados. Moreira et. al. 2013 encontraron en el Río de la Plata una relación lineal entre ambas variables que presenta gran variabilidad. Estas variaciones se podrían deber al tipo de sedimento, forma y tamaño, presente.

En este trabajo se realizó un estudio de la variación de la relación entre turbidez y MPS considerando diferentes patrones de granulometría en el Río de la Plata a partir de datos de turbidez, MPS y granulometría obtenidos durante las campañas realizadas en el marco del Experimento FREPLATA/FFEM. Se encontró una distinción entre las relaciones de T y MPS de dos grupos con baja diferenciación entre los tamaños de sedimentos un 85% de confiabilidad. Este resultado lleva a pensar que la pendiente presenta una dependencia con el tamaño de los sedimentos.

Se analizaron hipótesis acerca de los procesos que determinan la distribución granulométrica observada. Primero se estudió la influencia de la descarga del río Bermejo, principal aportante de material sólido en suspensión a la cuenca del Plata, no encontrándose resultados determinantes con este set de datos. Segundo se evaluó la hipótesis de resuspensión de sedimentos, siendo el resultado más importante el hallazgo de periodicidades en escala sinóptica que podrían explicar parte de la variabilidad en la turbidez del RdP.

1. Introducción

1.1 Motivación

El estuario del Río de la Plata (RdP, Figura 1.1.1) es de gran importancia ecológica, social y económica para la República Argentina y la República Oriental del Uruguay. Las capitales de ambos países, Buenos Aires y Montevideo, se encuentran sobre sus costas al igual que numerosas ciudades, puertos y centros industriales (Simionato *et al.* 2006). La importancia del RdP reside no sólo en ser fuente de agua dulce para gran parte de la población de sus alrededores, sino que también presenta vías navegables que permiten el desarrollo de la actividad económica marítima y de transporte de pasajeros de las ciudades y países de la región. Además, es un sitio de desove y cría de un conglomerado de especies de peces, algunas de las cuales son de gran importancia económica. A su vez, el estuario es escenario de una gran actividad deportiva y recreativa, como la navegación a vela, el kite surf y otros deportes náuticos.

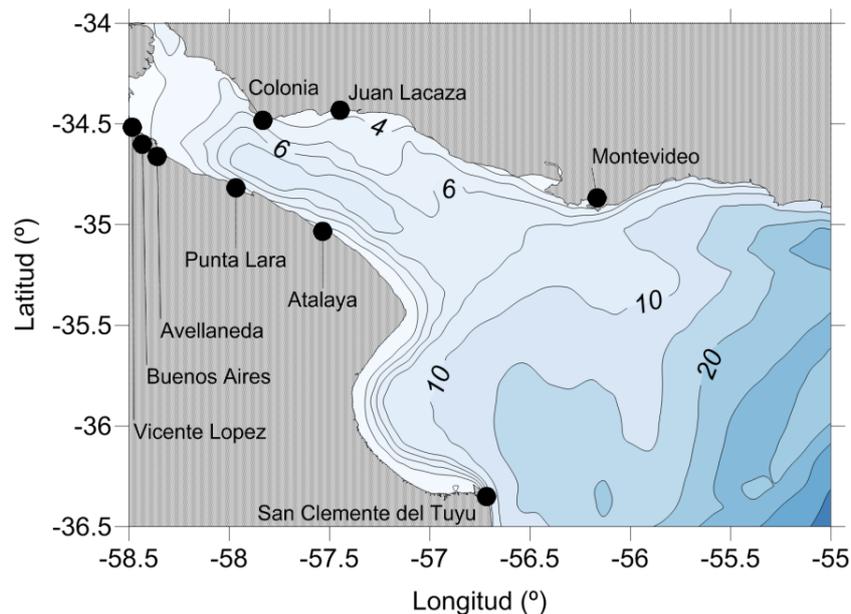


Figura 1.1.1. El Río de la Plata, su batimetría y las principales ciudades y localidades de la región.

La batimetría del RdP fue estudiada por Urien (1966, 1967, 1972), Parker *et al.* (1986 a, b), Ottman y Urien (1965, 1966), Depetris y Griffin (1968) y López Laborde (1987); los resultados fueron sumariados por Simionato *et al.* (2004a). El estuario superior e intermedio posee bajas profundidades (Figura 1.1.1) y su geometría es compleja. En la parte superior del RdP se descargan las aguas de tributarios principales que dan origen al sistema estuarino, el río

Uruguay y el Paraná. Estos conforman la cuenca del Plata, que es la segunda en importancia en América del Sur, luego de la del Amazonas. La descarga líquida media al RdP ha sido estimada en $22.500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

A través de los tributarios, particularmente del Paraná, se transporta gran cantidad de material sólido en suspensión y como carga de fondo, que ha sido estimada en el orden de 80 a 160×10^6 toneladas por año (Depetris y Griffin, 1968). En consecuencia, el volumen de sedimentos transportados y la tasa de sedimentación del estuario son muy altas y varían en las diferentes zonas del área de estudio. En particular, una de las problemáticas sociales asociadas es la necesidad de dragado periódico de los canales de navegación del RdP (Figura 1.1.2) para permitir el tráfico marítimo demandado por los puertos de la región. Menéndez (1994) encontró, mediante ensayos numéricos, que la tasa de sedimentación en los canales Mitre y Martín García varía en función del calado de los mismos, variando desde aproximadamente $7 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ para 28 pies hasta aproximadamente $30 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ para 46 pies de profundidad. Estas operaciones de mantenimiento son extremadamente costosas y pueden ser optimizadas con un mayor conocimiento acerca de las áreas de erosión y acreción de los sedimentos en el estuario. El dragado, a su vez, puede cambiar la dinámica de los sedimentos afectando directamente a la biota de la región.



Figura 1.1.2. Canales de navegación en el Río de la Plata. El Canal Mitre es el canal de acceso al Río Paraná, mientras que el Canal Martín García constituye el acceso al Río Uruguay.

El estuario es un ambiente óptimo para el desove y cría de numerosas especies de peces (Cousseau, 1985; Boschi, 1988). El ejemplo más típico es la Corvina Rubia (Figura 1.1.3), principal soporte de las pesquerías costeras de Argentina y Uruguay, cuyo ciclo de vida está ligado a las condiciones ambientales. En especial parece haber una íntima relación entre las

áreas de desove y cría de esta especie con la turbidez (Jaureguizar *et al.* 2003), por lo que el entendimiento de la dinámica de los sedimentos en suspensión brinda un conocimiento importante en relación con los ciclos de biológicos de los peces y la definición de áreas a conservar.



Figura 1.1.3. Corvina rubia (*Micropogoniasfurnieri*).

Otro problema ambiental de relevancia asociado a la dinámica sedimentológica es la contaminación. Los sedimentos en suspensión son medios de transporte para diversos contaminantes presentes en el agua (Honeyman *et al.* 1987, Jannasch *et al.* 1987) a través de un mecanismo conocido como adsorción. Existen zonas del estuario donde estos contaminantes se depositan en el fondo debido a procesos de sedimentación. Luego, estos sedimentos pueden ser resuspendidos y transportados hacia zonas donde pueden ser incorporados a la cadena trófica, lo cual podría implicar una amenaza a los pobladores que los consumen (Simionato *et al.*, 2011).

La dinámica sedimentológica interviene en otras cuestiones relevantes a la sociedad y el ecosistema, como la productividad primaria, los organismos bentónicos y la erosión costera.

En consecuencia, el estudio de la dinámica de los sedimentos en suspensión en el RdP puede contribuir a responder preguntas de importancia ambiental y, de esta manera, a una mejora en la calidad de vida de los pobladores de Argentina y Uruguay, y a la preservación del ecosistema. Sin embargo, el problema de los sedimentos en estuarios y mares costeros es complejo y requiere un estudio sistemático e interdisciplinario para abarcar los múltiples efectos y procesos que ocurren. Por ejemplo, una de las causas que determinan la sedimentación son los procesos físico-químicos de floculación que ocurren en la dinámica de las partículas finas (Fossati, 2013); estos procesos han sido poco estudiados, en gran medida por la complejidad que tiene su observación en sistemas naturales. Por otra parte, los procesos sedimentológicos no responden a leyes físicas universales sino que son altamente dependientes del lugar en cuestión. Esto hace que las observaciones sean indispensables para describir y entender los procesos que localmente son importantes y para calibrar y validar los

modelos numéricos. De esta manera, las aplicaciones generalmente se realizan a través de estudios de modelado numérico apoyados por observaciones *in situ* y/o remotas.

Dada la dificultad intrínseca y el alto costo de la obtención de muestras *in situ* de variables sedimentológicas, existe un considerable interés en el uso de sensores remotos para proporcionar mapas sinópticos de las mismas en aguas costeras, en particular de material particulado en suspensión (MPS). Sin embargo, aún no se dispone de algoritmos que sean válidos a nivel global para estimar las concentraciones de sedimentos a partir de observaciones satelitales. Las observaciones remotas son derivadas a partir de las propiedades ópticas (como la absorción y dispersión) del agua y sus componentes. De esta manera, a partir de las observaciones remotas se puede obtener, por ejemplo, información acerca de la turbidez, definida como la dispersión de la luz a 90° con respecto a una sustancia de referencia como la Formazina. Luego, a partir de una relación local entre turbidez y MPS (por ejemplo, Moreira *et al.* 2013) pueden obtenerse mapas de MPS a partir de imágenes satelitales (Dogliotti *et al.* 2015).

Se sabe que la relación entre la turbidez y la concentración de MPS depende principalmente por la distribución del tamaño de partículas y, en menor medida, del tipo de sedimentos (composición). Gohin (2011), Snedden *et al.* (2007) y Petus *et al.* (2010) encontraron diferentes relaciones en áreas de estudio distintas. Para el RdP, Moreira *et al.* (2013) encontraron una relación lineal entre ambas variables dada por la ecuación $MPS = 0,73 \times \text{Turbidez}$. Sin embargo, la relación empírica entre ambas variables presenta gran dispersión, que los autores atribuyen, en parte, a la variabilidad del tamaño y tipo de la partícula en distintas regiones del estuario. En este sentido, en este trabajo se estudia la posible variación de la relación entre turbidez (T) y MPS considerando diferentes patrones de granulometría en el Río de la Plata a partir de datos de turbidez, MPS y granulometría obtenidos durante las campañas realizadas el marco del Proyecto FREPLATA IFREMER entre 2009-2010 (Simionato *et al.* 2011a).

1.2. Objetivos

Teniendo en consideración lo mencionado en la sección precedente, el objetivo general de esta Tesis de grado es estudiar la variabilidad en la relación entre turbidez y

concentración del material particulado en suspensión (MPS) considerando los diferentes patrones de distribución granulométrica en el Río de la Plata.

Los objetivos específicos son:

1. Determinar patrones espaciales en la distribución granulométrica de los sedimentos en suspensión en el Río de la Plata utilizando datos de campo.
2. Evaluar la relación entre T y MPS en relación a las regiones previamente identificadas.
3. Determinar si existe una relación entre T y MPS para toda el área o si varía por regiones, según los resultados obtenidos.
4. Plantear hipótesis acerca de los procesos que determinan la distribución granulométrica observada.

1.3. Área de estudio

El Río de la Plata (RdP) es uno de los estuarios más grandes y someros del mundo, con una profundidad media de 10 m. Está ubicado sobre la costa este de Sudamérica a una latitud de aproximadamente 35°S (Figura 1.3.1). Su orientación general es del sudeste a noroeste y presenta una geometría con forma de embudo, con una extensión de 300 km de largo y un ancho que varía desde 40 km en su extremo superior hasta 220 km en su boca (Simionato *et al.*, 2004). Desde el punto de vista geográfico (Figura 1.3.2), el estuario se ha dividido clásicamente en tres secciones (Urien, 1972; Gagliardini *et al.*, 1984; Boschi, 1988; Perillo *et al.*, 1999): el "sector interno o superior", donde se encuentra la región llamada Playa Honda, va desde la cabecera hasta la línea imaginaria que une la ciudad uruguaya de Colonia con la Ciudad de Buenos Aires, presenta características; el "sector intermedio", se localiza desde la finalización del sector anterior hasta la línea que une la capital de Uruguay (Montevideo) con Punta Piedras, y está dominada por bancos someros y frentes de estuario. Por último el "sector exterior" presenta características típicamente marinas, y se extiende desde la región anterior hasta la línea que une Punta del Este con Punta Rasa.

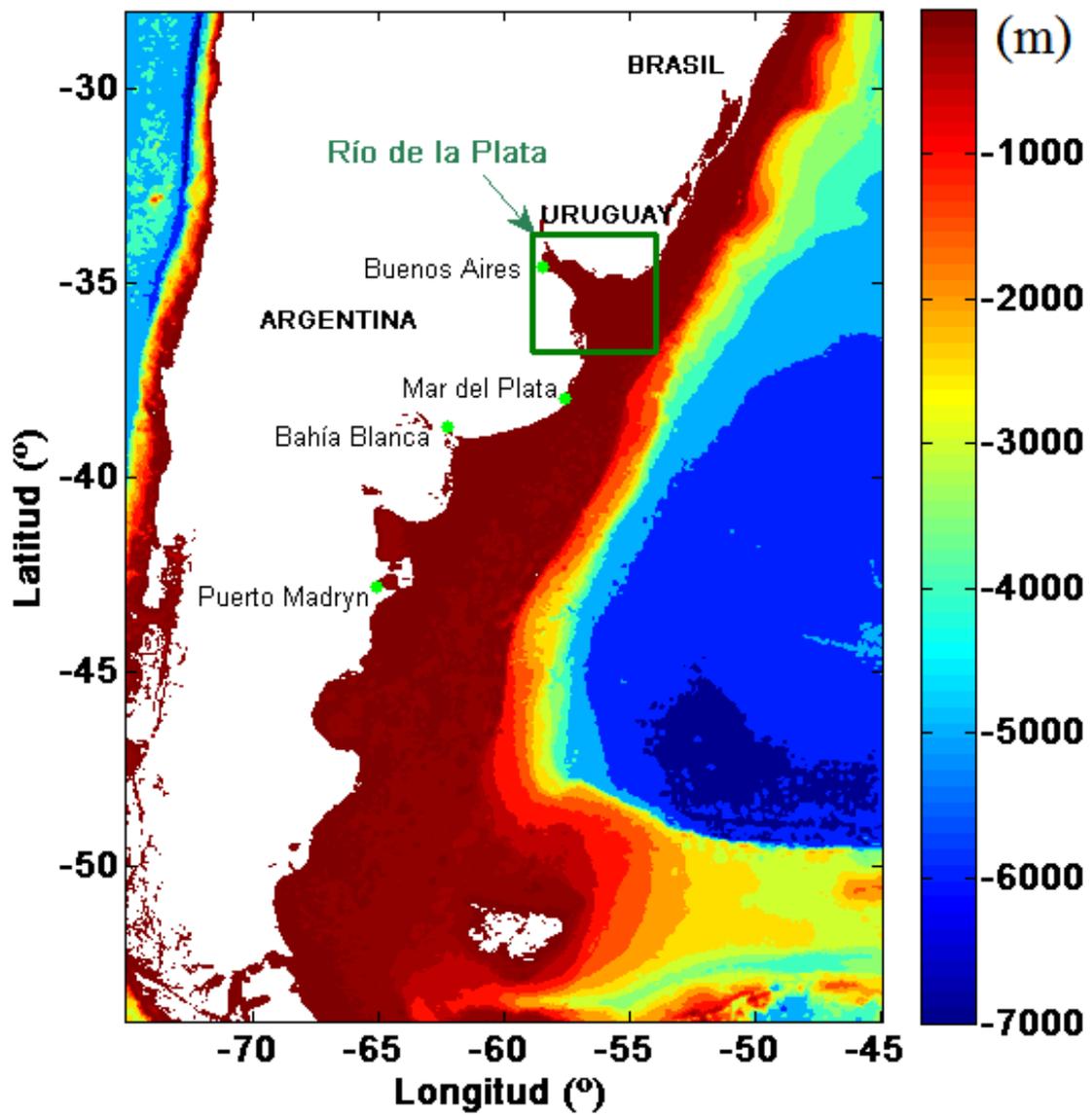


Figura 1.3.1. Ubicación geográfica del Río de la Plata. Batimetría realizada en base a datos de la NOAA.

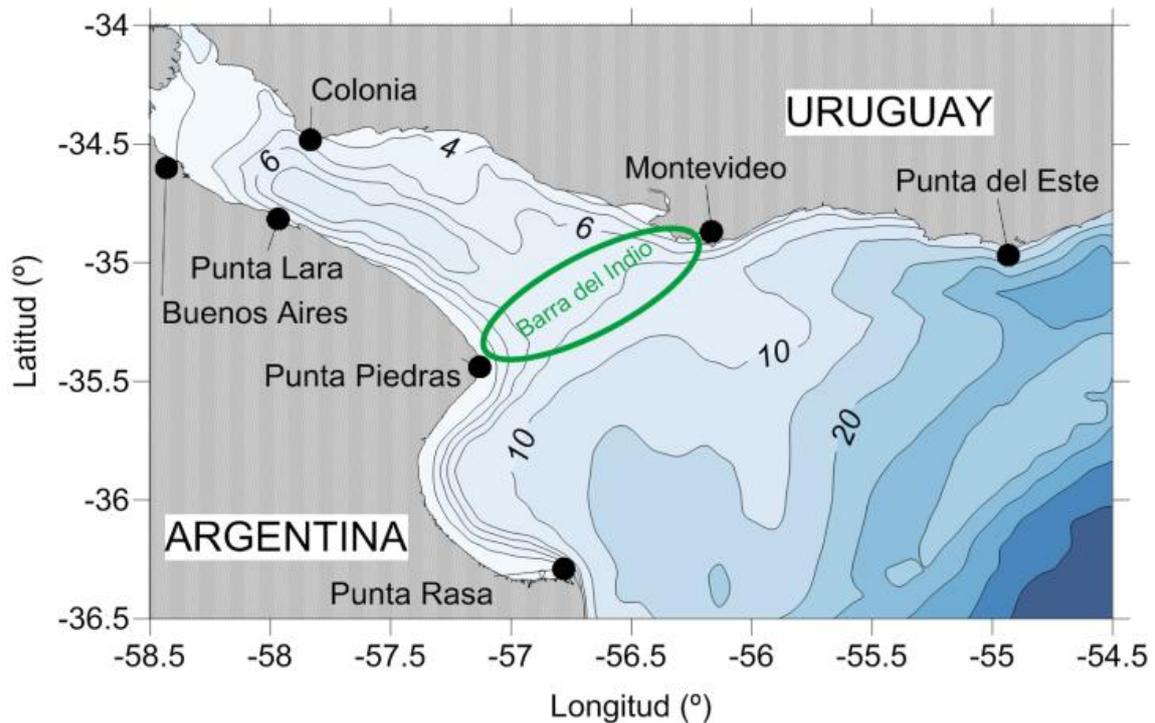


Figura 1.3.2. Mapa batimétrico y referencias geográficas del Río de la Plata

El RdP drena las aguas de la Cuenca del Plata (Figura 1.3.3), cuya extensión es de aproximadamente $3.200.000 \text{ km}^2$ (Framiñan *et al.*, 1999; Tossini, 1959). Su caudal está prácticamente determinado por el de sus dos mayores tributarios, los ríos Paraná y Uruguay (Figura 1.3.4), los cuales poseen descargas medias históricas del orden de los 16.000 y $6.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ respectivamente (Nagy *et al.*, 1997). Así, el RdP vierte sus aguas sobre el Mar Argentino con un caudal medio de $22.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Jaime *et al.*, 2002; Nagy, 1997), aunque se han registrado valores máximos de $80.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y valores mínimos de $8.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, asociados a los ciclos de El Niño - Oscilación del Sur (ENOS).

El Río Paraná, que forma un gran delta antes de la desembocadura, se divide en dos ramas, el Paraná Guazú (al norte) y Paraná Las Palmas (al sur, Figura 1.3.4). El primero de ellos posee el mayor caudal líquido, el 77%, considerando los datos reportados por la Red Hidrometeorológica Nacional para el periodo de 1993-2016, el cual concuerda con lo reportado por Jaime *et al.* 2002. La descarga del Río Paraná presenta variaciones a lo largo del año, siendo máxima en los meses de marzo/abril y mínima en septiembre (Figura 1.3.5). El Río Uruguay posee máxima descarga en los meses de junio, julio y octubre, y mínima en enero (Figura 1.3.6), pero su estacionalidad es menor que la del Paraná.



Figura 1.3.3. Cuenca del Plata. En rojo: Estación de aforos de El Colorado sobre el Río Bermejo.

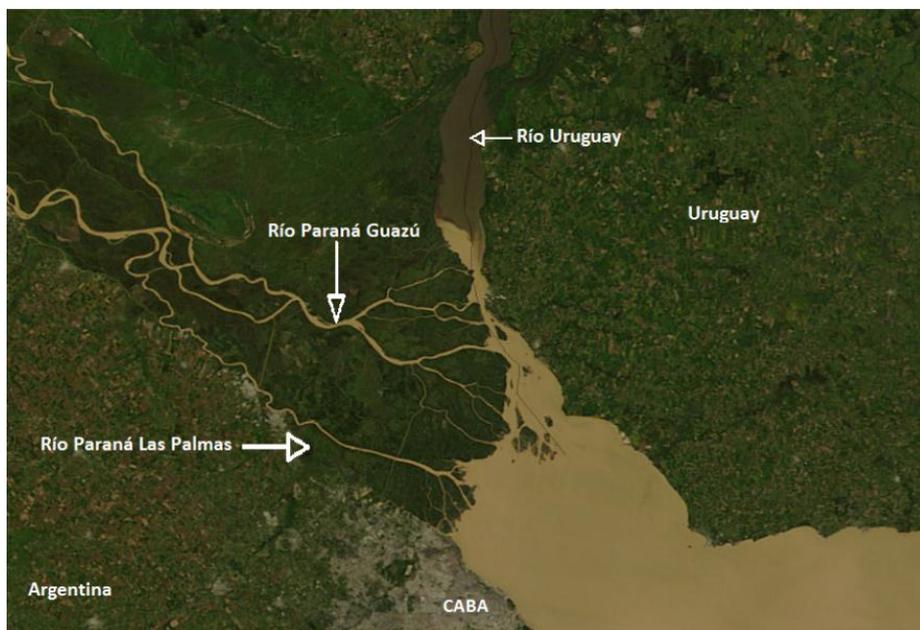


Figura 1.3.4. Imagen satelital (color casi-verdadero, MODIS) del Río de la Plata y sus principales tributarios: Paraná (rama Guazú y Las Palmas) y Uruguay.

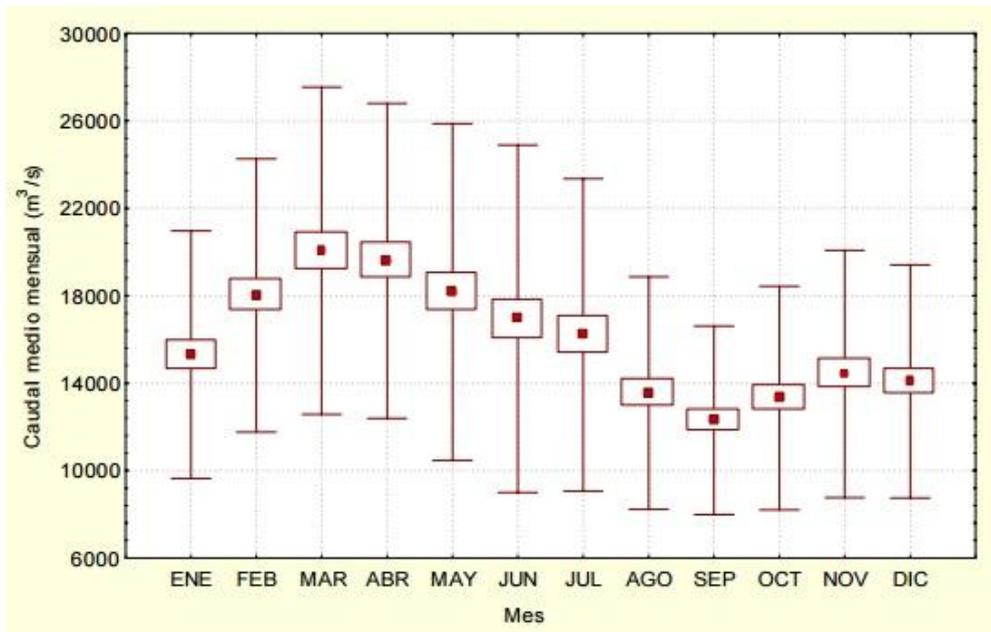


Figura 1.3.5. Evolución anual de los caudales medios mensuales en el río Paraná (1931-2001) en diagrama de caja a través de tres componentes: valor medio (cuadrado rojo sólido), error estándar (caja roja) y rango (barras). Adaptado de 'Análisis del Régimen Hidrológico de los Ríos Paraná y Uruguay', INA, 2002.

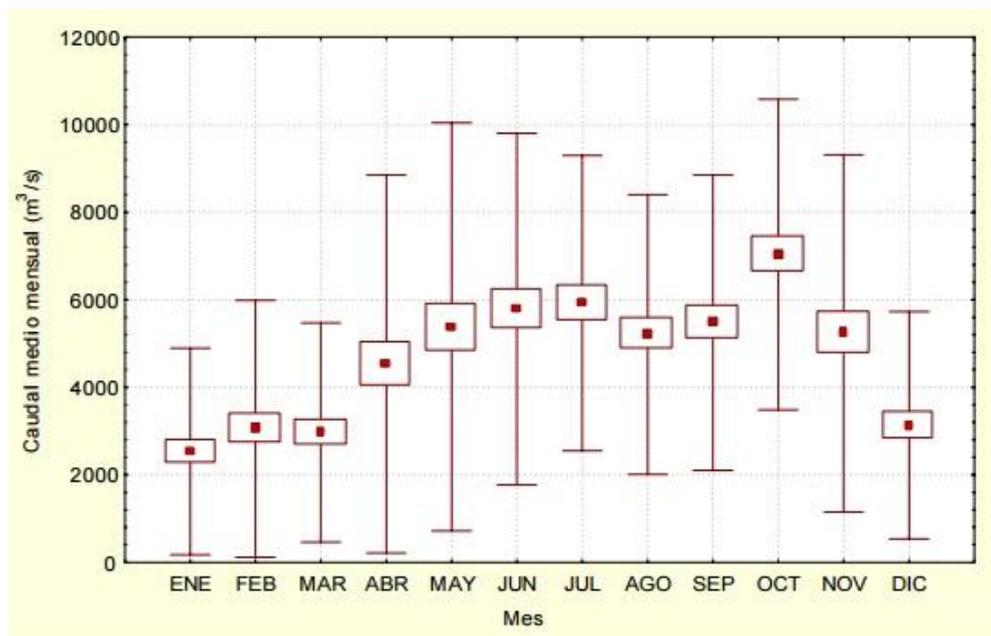


Figura 1.3.6. Evolución anual de los caudales medios mensuales en el río Uruguay (1931-2001) en diagrama de caja a través de tres componentes: valor medio (cuadrado rojo sólido), error estándar (caja roja) y rango (barras). Adaptado de 'Análisis del Régimen Hidrológico de los Ríos Paraná y Uruguay', INA, 2002.

Como se observa en la imagen satelital de color del mar de la Figura 1.3.4, los sedimentos en suspensión que llegan al RdP ingresan mayormente por el Río Paraná. Según Urien (1972), el promedio anual de la carga suspendida proveniente del Río Uruguay es del orden de 7 millones ton año^{-1} y la proveniente del Río Paraná es de 72,8 millones de ton año^{-1} . Estos últimos provienen principalmente (el 81% según Brea y Spalletti, 2010) de uno de sus afluentes, el Río Bermejo, a través del Río Paraguay (Figura 1.3.7). Por ello, es necesario conocer la descarga sólida del Bermejo para describir los patrones granulométricos de los sedimentos en suspensión en el RdP. La cuenca de este río se caracteriza por una gran concentración material sólido, que en su mayoría es aportado por el Río Iruya (Brea y Spalletti, 2010).



Figura 1.3.7. Imagen satelital (color casi-verdadero, MODIS) de la desembocadura del Río Paraguay sobre el Río Paraná. La diferencia en las concentraciones de sedimentos es evidente.

Tradicionalmente los sedimentos se clasifican según su diámetro de partícula (D_{50}). Aquellas que poseen los mayores ($> 2000 \mu\text{m}$) son las gravas o rocas; las arenas tienen un D_{50} que varía desde $2000 \mu\text{m}$ hasta $62 \mu\text{m}$; luego se encuentran los limos con D_{50} entre $4 \mu\text{m}$ y $63 \mu\text{m}$; y finalmente los sedimentos con menor tamaño ($< 4 \mu\text{m}$) son llamados arcillas (Departamento de Armas de Mississippi, 1984)

El Río Bermejo posee sedimentos con gran variabilidad en su granulometría, comprendiendo principalmente limos y arcillas (80-90%, Brea y Spalletti, 2010), y arenas en menor medida. Los sedimentos en suspensión más gruesos (arenas finas), se depositan en la cabecera del estuario del RdP, cuando la velocidad de la corriente disminuye por ensancharse y profundizarse la sección después de la desembocadura. De este modo se forman los bancos y el delta del Paraná (Sarubbi *et al.*, 2007). Los sedimentos finos (mayormente limos) encuentran condiciones favorables para su deposición a lo largo del estuario y sus canales de navegación (Brea y Spalletti, 2010). Finalmente, las partículas más finas, como la arcilla, se depositan en la Barra del Indio y el frente de salinidad, aparentemente en gran medida por el ensanchamiento y el cambio abrupto de la profundidad, que se ve reflejado en la disminución de la velocidad de las corrientes, y por los procesos de floculación, ya que se comportarían como sedimentos cohesivos (Fosatti, 2013; Moreira *et al.* 2013). La Figura 1.3.8 muestra la concentración media anual de sedimentos en suspensión medida sobre la Estación de aforos de El Colorado en el Río Bermejo (ver ubicación en la Figura 1.3.3). Se observa que la concentración de sedimentos en suspensión del Río Bermejo presenta un ciclo estacional marcado cuyo máximo ocurre entre los días 50 y 100, correspondientes a los meses de marzo y abril. Moreira *et al.* (2013) estimaron el tiempo de transporte de los sedimentos desde el Río Bermejo, estación El Colorado, hasta la parte superior del RdP en 13 días considerando una velocidad promedio del agua de 1 m s^{-1} . Simionato *et al.* (2009) estimaron a partir de simulaciones numéricas que el tiempo de recambio del 100% del agua desde su cabeza hasta el RdP intermedio es de 60 días considerando una descarga media. Por lo tanto si la concentración de MPS estuviera regulada únicamente por la descarga sólida del Río Bermejo, se debería observar un patrón similar al de la descarga sólida de este río desfasado temporalmente en aproximadamente dos meses para condiciones medias de descarga del RdP.

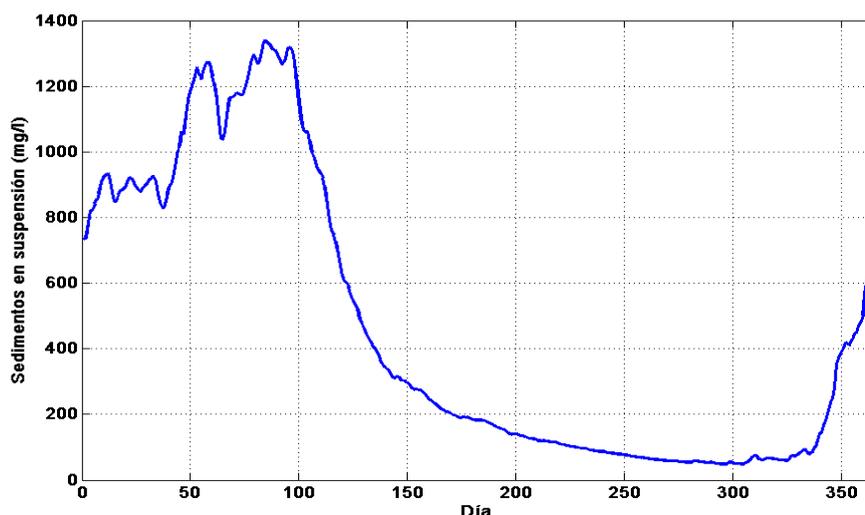


Figura 1.3.8. Concentración de sedimentos en suspensión media diaria en la estación El Colorado en el periodo 2002-2011, Río Bermejo.

El análisis de datos de campo muestra que las características granulométricas de los sedimentos del fondo del RdP se encuentran relacionadas con las plumas de los principales tributarios del RdP (Figura 1.3.9). Mediante el uso de modelos hidrodinámicos, Simionato *et al.* (2009) mostraron que la pluma de cada tributario sigue caminos preferenciales a lo largo del RdP y presentan poca mezcla en la parte superior del estuario. La pluma del Paraná de las Palmas fluye a lo largo de la costa Argentina. La pluma del Paraná Guazú fluye por el centro del estuario. Por último, la pluma del Uruguay fluye a lo largo de la costa uruguaya llevando arenas finas, que se depositan en su desembocadura, y limos, que se depositan en el RdP.

Los tributarios del RdP poseen velocidades altas, que permiten el transporte de los sedimentos en suspensión provenientes de la cuenca. Debido al ensanchamiento de la sección cuando éstos ingresan al RdP, ocurre una disminución de la velocidad del flujo, que permite la deposición de este tipo de sedimentos en el estuario (Menendez, 1994). El flujo en el estuario presenta un gradiente de velocidad, siendo máxima en su cabeza y mínima en su desembocadura (Simionato *et al.*, 2004). Estas características contribuyen a que el tamaño de los sedimentos de fondo disminuya aguas afuera. La presencia casi exclusiva de arenas en el RdP exterior es indicio de la influencia marítima en la zona (Figura 1.3.9).

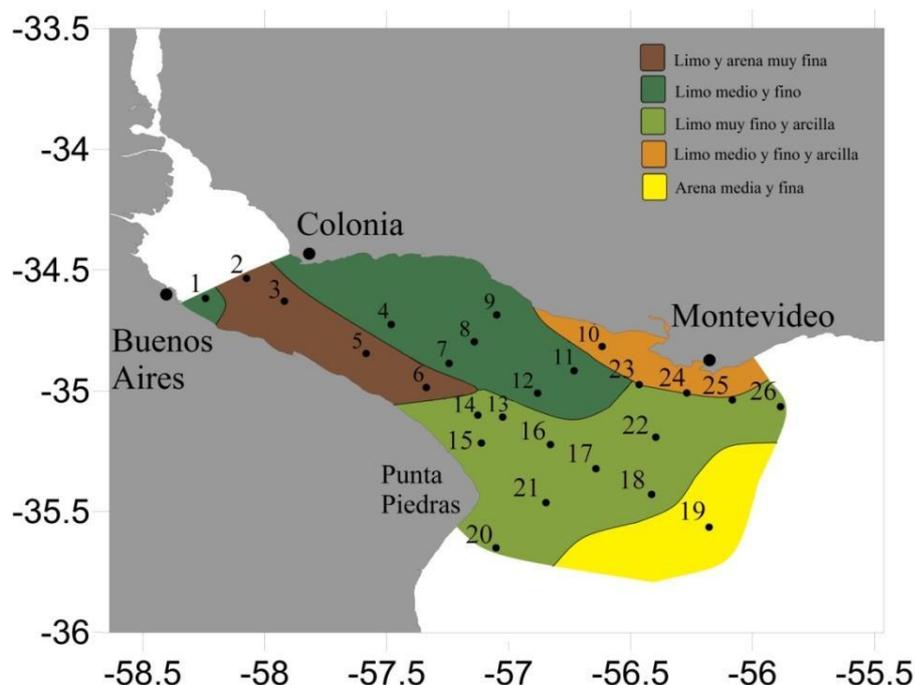


Figura 1.3.9. Sedimentos de fondo de RdP a partir de datos recolectados durante el proyecto FREPLATA. Adaptada de Moreira *et al*, 2016.

Los vientos en el RdP tienen direcciones preferenciales como consecuencia principalmente de dos fenómenos meteorológicos que ocurren en la región. Por un lado, el sistema atmosférico de alta presión semipermanente ubicado en el Océano Atlántico Sur (Figura 1.3.10) advecta aire cálido y húmedo desde regiones subtropicales hacia el área del estuario (Minetti y Vargas, 1990). Por otro lado, regularmente ingresan masas de aire frío, debido al pasaje de sistemas provenientes del sur con una periodicidad predominante de 4 días (Vera *et al.*, 2002). Por lo tanto, la región del RdP presenta vientos dominantes del noreste y del sudoeste que varían de una a otra dirección en la escala de pocos días. Además, la zona de estudio se caracteriza por ser muy ciclogénica, como resultado de ondas provenientes del oeste que viajan por latitudes subtropicales y que interactúan con las masas de aire tropical sobre el noreste de Argentina, Uruguay y sudeste de Brasil (Vera *et al.*, 2002, Simionato *et al.*, 2007). Esta interacción genera 2 o 3 tormentas intensas por año sobre el RdP (Escobar *et al.*, 2004), conocidas como Sudestadas, caracterizadas por fuertes vientos (Seluchi y Saulo, 1996) del sudeste que producen inundaciones sobre el RdP superior (D’Onofrio *et al.*, 1999). Debido a la mayor penetración de los frentes provenientes del sur en invierno que en verano, los norestes son más frecuentes en verano, mientras que los sudoestes y norestes son casi igualmente frecuentes en el invierno. En consecuencia, los vientos medios en la zona de estudio presentan un ciclo estacional con menor intensidad en invierno y mayor en verano

(Simionato *et al.*, 2005). Sin embargo, las velocidades del viento instantánea son mayores en invierno que en verano.



Figura 1.3.10. Posición del anticiclón semipermanente del Atlántico Sur (H).

Dragani *et al.*, 2004, utilizando observaciones adquiridas entre junio de 1996 y noviembre de 2001 en el RdP exterior, observaron que el oleaje en ese lugar posee dirección dominante del SE. Los autores mencionan dos tipos diferentes de olas de esa dirección: "sea" u olas generadas localmente, con un período cercano a los 5 s y altura característica de 1,25 m; y "swell" o mar de fondo, con período cercano a los 10 s y altura característica de 0,8 m. El oleaje, "sea" y "swell", que ingresa por el RdP exterior es atenuado por refracción y fricción en el RdP intermedio. Por lo tanto, el RdP interior se caracteriza por olas del tipo "sea", es decir que el clima de olas presentes en la zona es determinado por los vientos locales. Así, el principal forzante de olas en el RdP interior es el viento que sopla en el momento.

La complejidad en la comprensión de la propagación de la marea astronómica en el estuario se debe a las bajas profundidades, su batimetría complicada y las grandes descargas de sus tributarios (D' Onofrio *et al.*, 2012). El RdP se caracteriza por presentar una marea de régimen mixto, preponderantemente semidiurno (Servicio de Hidrografía Naval, 2011) cuya componente principal es la M_2 (O'Connor, 1991; Fossati y Piedra-Cueva, 2011; Fossati y Piedra-Cueva, 2013) con un periodo de 12,421 horas (O'Connor, 1991), representando un 80% de la misma (C.A.R.P., 1989). Las ondas de marea provenientes de la plataforma continental ingresan al estuario desde el sur y sureste (Simionato *et al.*, 2004; Sepulveda *et al.*, 2004), demorando 12 horas aproximadamente en llegar al límite interior del RdP (Simionato *et al.*, 2004b y D'Onofrio *et al.*, 2009). La onda de marea se acorta a medida que la profundidad

disminuye y penetra en el Río de la Plata, permitiéndole entrar prácticamente justa en la longitud del estuario (Luz Clara Tejedor, 2013). La amplitud de estas ondas decae con la distancia a la costa (Simionato *et al.*, 2004), comportándose como una onda de Kelvin. El rango normal de la amplitud de marea es de 1 m sobre la costa argentina y 0,3 m sobre la costa uruguaya (O'Connor, 1991). Simionato *et al.* (2004) encontraron a través de simulaciones numéricas que la energía de marea es mayor sobre la costa argentina y su máxima disipación se produce en los extremos norte y sur de la Bahía de Samborombón y a lo largo de la costa sur del estuario (Figura 1.3.12). Las corrientes de marea presentan valores cercanos a los $0,5 \text{ m s}^{-1}$ con valores mayores en la costa sur (Figura 1.3.11) (Urien, 1972; Simionato *et al.*, 2004; Simionato *et al.*, 2005b).

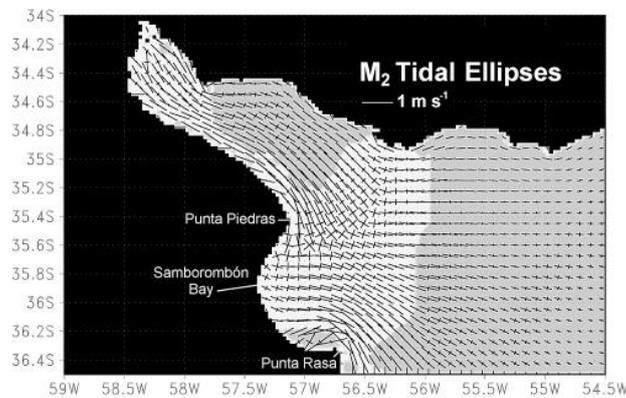


Figura 1.3.11. Velocidad de la componente M2 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) obtenido a partir de simulaciones. Adaptado de Simionato *et al.*, 2004.

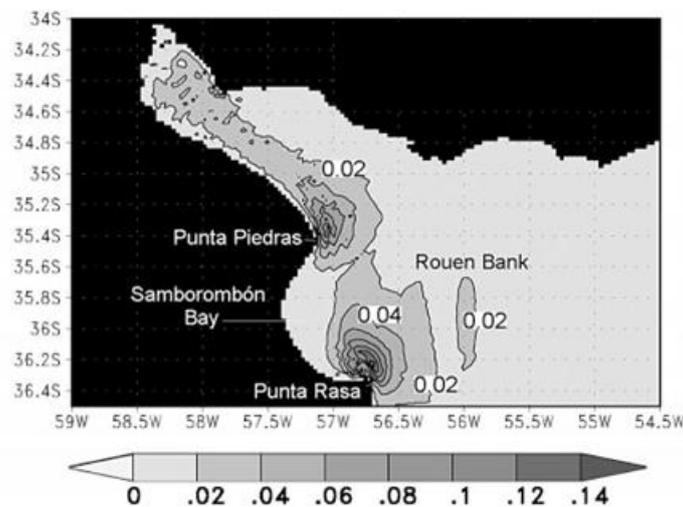


Figura 1.3.12. Energía de la componente M2 disipada por fricción de fondo (W/m^2) obtenido a partir de simulaciones. Adaptado de Simionato *et al.*, 2004.

2. Datos y Metodología

2.1 Datos

2.1.1 Campañas de observación

Los datos analizados en este trabajo corresponden a observaciones adquiridas durante 6 campañas oceanográficas realizadas en marco del Proyecto 'Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo: Prevención y Control de la Contaminación y Restauración de Hábitats' (FREPLATA). Las mismas fueron realizadas por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) de Argentina, y el Servicio de Hidrología, Oceanografía y Meteorología de la Armada del Uruguay (SHOMA), el Institut Français de Recherche pour l' Exploitation de la Mer (IFREMER) de Francia, el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA) y el Instituto de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP), de Argentina. Las campañas se efectuaron durante los siguientes periodos:

- 1: 23-28 de noviembre de 2009
- 2: 17-19 de marzo de 2010
- 3: 23-25 de junio de 2010
- 4: 23-27 de agosto de 2010
- 5: 25-28 de octubre de 2010
- 6: 15-17 de diciembre de 2010

Durante cada campaña se realizaron 26 estaciones de observación oceanográfica, cuyas posiciones geográficas se muestran en la Tabla 2.1 y la Figura 2.1. En cada una se obtuvieron muestras de agua cerca de la superficie y el fondo, que fueron procesadas en laboratorio para la determinación del MPS, turbidez y granulometría de los sedimentos en suspensión. También se realizaron simultáneamente estaciones con un perfilador CTD marca SeaBird, modelo SBE-19 plus V2, equipado con un sensor combinado de fluorescencia y turbidez marca Wet-Labs, modelo ECOFLNTU (RT) en las campañas 2, 3, 4, 5 y 6; y con un sensor de turbidez *OBS3+* en la campaña 1 (Simionato *et al.* 2011a).

Tabla 2.1. Posición geográfica de las estaciones de observación.

Estación	Latitud (°)	Longitud (°)
1	-34,6177	-58,2432
2	-34,5347	-58,0752
3	-34,6383	-57,9181
4	-34,7255	-57,4815
5	-34,8458	-57,5845
6	-34,9867	-57,3376
7	-34,8872	-57,2440
8	-34,7972	-57,1412
9	-34,6857	-57,0487
10	-34,8168	-56,6168
11	-34,9178	-56,7318
12	-35,0103	-56,8814
13	-35,1092	-57,0247
14	-35,2170	-57,1120
15	-35,1015	-57,1265
16	-35,2232	-56,8287
17	-35,3233	-56,6400
18	-35,4298	-56,4125
19	-35,5655	-56,1782
20	-35,6505	-57,0517
21	-35,4638	-56,8473
22	-35,1930	-56,3967
23	-34,9745	-56,4647
24	-35,0097	-56,2693
25	-35,0382	-56,0828
26	-35,1662	-55,8853

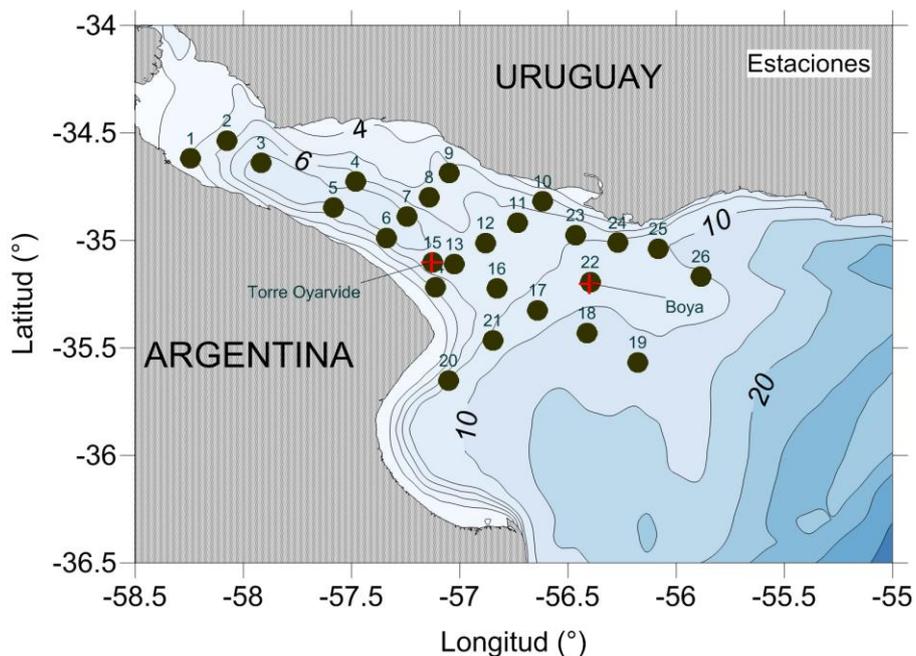


Figura 2.1.1. Posición de la boya oceanográfica y la estación fija Torre Oyarvide (cruces rojas) y de las estaciones de muestreo (círculos negros) de las campañas realizadas en marco del Experimento FREPLATA-FFEM.

En la primer campaña se instaló una boya oceanográfica (Figura 2.1.2), construida por la firma *NKE* de Francia, en proximidad del banco “Arquímedes”, en latitud $35^{\circ} 12' 0''$ Sur, longitud $56^{\circ} 24' 0''$ Oeste (Figura 2.1.1). La misma contó con instrumental para la medición de parámetros oceanográficos y parámetros meteorológicos, entre ellos el viento (Simionato *et al.* 2011a). Se cuenta con datos de viento para el periodo comprendido entre el 21 de diciembre de 2009 y el 21 de diciembre de 2010.



Figura 2.1.2. Boya oceanográfica instalada en marco del Experimento FREPLATA/FFEM.

También se instaló una estación fija ubicada en la Torre Oyarvide (Lat.: 35°6'0" Sur; Long.: 57°7'45" Oeste, Figura 2.1.1) que contó con un medidor y registrador "NKE", modelo Smatch, (Figura 2.1.3) de parámetros oceanográficos, presión, temperatura, conductividad, turbidez y oleaje no direccional (Simionato *et al.* 2011a). Se cuenta con datos de intensidad de viento y altura de ola para el periodo del 26 de octubre de 2010 al 17 de diciembre de 2010.

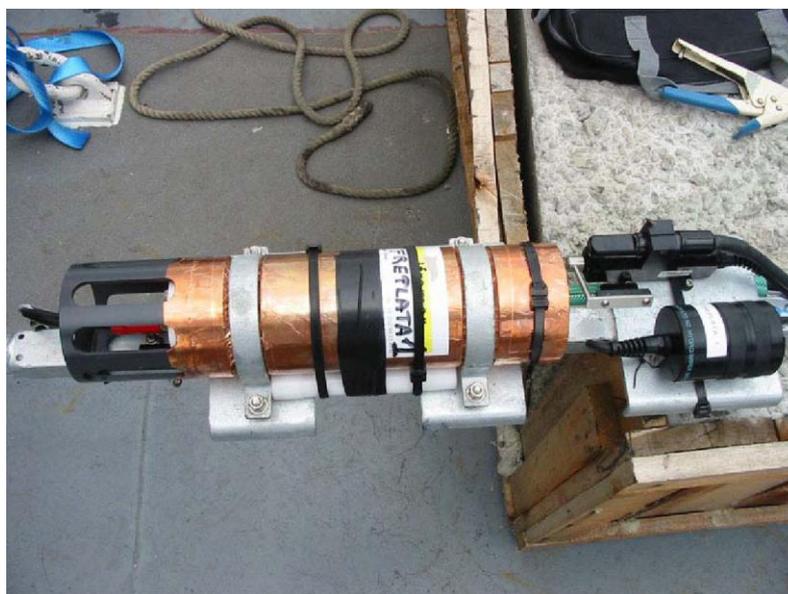


Figura 2.1.3. Medidor y registrador "NKE", modelo *Smatch* ubicado en la torre Oyarvide en marco del Experimento FREPLATA/FFEM.

2.1.2 Análisis aplicados a las muestras

2.1.2.1 Turbidez superficial

Las determinaciones de turbidez superficial fueron realizadas a bordo de las diversas plataformas oceanográficas, por el técnico químico Pablo Zorzoli, del Servicio de Hidrografía Naval, mediante el empleo de un turbidímetro marca "HACH", modelo 2100P ISO (Simionato *et al.* 2011a). Los resultados de turbidez obtenidos se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Datos de turbidez superficial (NTU) obtenidos en marco del Experimento FREPLATA-FFEM. Las observaciones descartadas luego del control de calidad se muestran en rojo.

Turbidez (NTU)						
Estación	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4	Campaña 5	Campaña 6
1	66,7	81,9	79	54,8	-	-
2	107	81,9	42	51,9	-	55,8
3	53,9	84,9	47	53,4	-	68,1
4	50,5	90,5	65	41,6	38,2	32,4
5	86,4	74,7	61	30	44,5	48,4
6	86,3	67	103	84,2	132	74
7	75	62,1	61	43,2	47,5	47,1
8	55,5	66,8	64	50,2	38,7	69,4
9	64,6	48,1	52	55,8	54,3	60,8
10	52,4	37,6	48	50,2	39	35,3
11	53,8	77,1	68	69,3	38,7	113
12	130	75,9	8	64,9	45,8	235
13	211	103	97	55,9	50,1	114
14	169	175	139	110	109	247
15	90,7	96,6	103	55,4	45	10,5
16	75,9	180	103	43,6	33	357
17	80,8	11,4	27	23,6	26,6	30,6
18	9,43	11,7	9	7,17	8,75	16,2
19	6,61	13	5	3,76	2,3	-
20	89,2	30,8	462	16,5	15	178
21	44,8	77,5	26	19,1	23,2	627
22	6,34	15,9	31	2,05	7,76	23,1
23	20,8	136	45	41	21,2	10,9
24	10,6	16,9	75	42,6	6,38	7,4
25	5,68	11,2	20	30,9	5,84	5,1
26	3,56	6,42	8	14,8	5,82	4,5

2.1.2.2 Concentración de MPS superficial

Para la determinación de la concentración de MPS se tomaron muestras de de 1 litro de agua para su posterior tratamiento en el laboratorio de Geología del SHN, mediante el

empleo de un tren de filtrado, la utilización de filtros de celulosa y acetato de 47 mm de diámetro y 0.45 μm de poro pre-pesados, su posterior secado y pesado (Simionato *et al.* 2011a). Con los resultados de la concentración de MPS obtenidos se confeccionó la Tabla 2.3. En los informes del SHN no se presentan datos de concentración de MPS para la campaña 6.

Tabla 2.3. Datos de concentración de MPS obtenidos en marco del Experimento FREPLATA-FFEM.

Concentración de MPS (mg/l)					
Estación	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4	Campaña 5
1	64	76	63	11,9	-
2	88	51	39	29,67	-
3	39	67	32	14,95	-
4	35	61	48	23,9	36,2
5	62	58	61	14,3	63,7
6	78	54	82	50,95	117,6
7	64	42	45	27,25	41,47
8	-	50	48	32,1	31,93
9	54	35	44	37,05	42,47
10	31	24	25	34,65	33,4
11	39	54	63	53,5	37,2
12	115	40	60	49,7	55,6
13	149	81	80	47,25	48,6
14	123	115	92	81,5	104
15	80	85	98	67,9	35,45
16	61	151	63	35,6	28,28
17	88	10	12	15,93	20,18
18	9	9	4	7,71	6,8
19	9	4	7	6,58	8,3
20	59	36	313	16,43	18,77
21	22	72	13	21,05	25,2
22	6	14	25	9,83	8,43
23	19	109	40	29,45	19,76
24	9	18	75	30,89	7,52
25	6	8	24	29,75	5,95
26	8	3	5	18,17	5,59

2.1.2.3 Análisis granulométrico de sedimentos en suspensión

La determinación de los perfiles granulométricos de sedimentos en suspensión estuvo a cargo del laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires y del laboratorio de Geología del Servicio de Hidrología Naval. Durante las campañas desarrolladas en el marco del Experimento FREPLATA-FFEM se tomaron muestras de agua (20 litros) que fueron almacenadas en bidones para su posterior tratamiento. Se dejaron en reposo durante 4 semanas para la separación de la fracción sólida, la cual fue sometida a reacción con peróxido de oxígeno (H_2O_2) al 20% para la eliminación de la materia orgánica. Posteriormente fue lavada con agua destilada y centrifugada para la separación de la fracción sólida. La porción seca fue analizada mediante un analizador de partículas marca "CILAS" modelo 1180, el cual utiliza un sistema óptico de difracción laser integrado que le permite medir partículas de entre 0,04 y 2500 μm en una sola medición. Las partículas más finas (0,04-500 μm) se miden capturando un patrón de difracción y aplicando la teoría de Fraunhofer o de Mie. Las partículas más gruesas se miden utilizando transformadas de Fourier en tiempo real de la imagen obtenida por la cámara CCD, equipada con una unidad de procesamiento digital (Simionato *et al.* 2011a).

Con los resultados de los análisis granulométricos se confeccionaron tablas y perfiles de granulometría; como ejemplo, se muestran la Tabla 2.4 y la Figura 2.1.4 correspondientes a la estación 16 de la campaña 4.

Tabla 2.4. Datos del análisis granulométrico de los sedimentos en suspensión correspondiente a la estación 16 de la campaña 4.

Customer defined classes					in volume / undersize					
x	0.69	0.98	1.38	1.95	2.76	3.90	5.50	7.80	11.00	15.60
Q3	15.28	20.97	29.09	40.46	54.90	70.30	83.00	92.16	98.40	100.00
x	22.00	31.20	44.00	62.00	88.00	125.0	177.0	250.0	354.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

x : diameter / μm Q3 : cumulative value / % q3 : population density / %

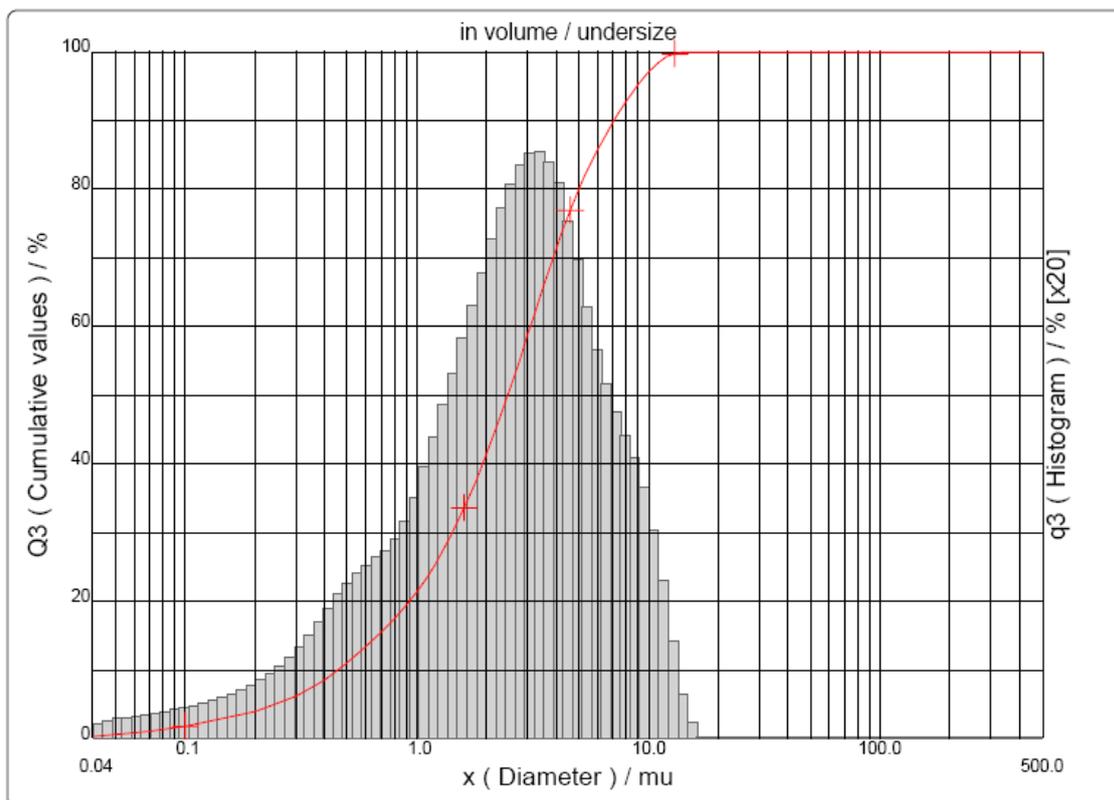


Figura 2.1.4. Perfil granulométrico de la estación 16, campaña 4. Escala logarítmica. *Informe Técnico Proyecto FREPLATA/IFREMER, 2010.*

2.1.3 Control de calidad

Berden *et al.* (2015) realizaron un control de calidad de un conjunto de datos de turbidez medidos en el RdP basándose en réplicas de las muestras. De esta forma se puede determinar un nivel de certeza de las mediciones. La base de datos con la que se contó para el presente trabajo no posee réplicas de las mediciones realizadas, por lo que no se pudo realizar este tipo de control de calidad. Sin embargo, se contó con los datos adquiridos con el perfilador CTD, que poseía un sensor de turbidez y fluorescencia calibrado de fábrica (campañas 2-6) y un OBS3+ no calibrado (campaña 1). Las mediciones realizadas con el CTD se obtuvieron a lo largo de un perfil vertical, comenzando cerca de la superficie con una profundidad dada, mientras que las mediciones con el HACH fueron obtenidas a partir muestras de agua superficial obtenidas con un balde. Por ello, las muestras podrían no ser homogéneas. Si bien los datos obtenidos por el CTD son aún preliminares ya que no fueron sometidos a un análisis de calidad, son un gran indicio de la calidad de datos obtenidos

mediante el HACH, por lo que se compararon los diferentes datos de turbidez obtenidos. En la Figura 2.1.5 muestra la turbidez superficial obtenida mediante el sensor de turbidez HACH en función de la obtenida por medio del CTD; se observa que la relación entre ambos datos de turbidez cuando se utilizó el sensor de turbidez OBS3+ (verde) presenta una dispersión mayor que cuando se utilizó el sensor Wet-Labs (azul). Además, en el gráfico se visualizan dos datos particulares (*) que presentan un comportamiento diferente, con valores de turbidez cercanos a 100 NTU en las observaciones del CTD y valores cercanos a cero NTU por en las observaciones del HACH. Se decidió, por lo tanto, no considerar estos datos correspondientes a la estación 12 de la campaña 3 y la estación 15 de la campaña 6 en los posteriores análisis. En ambos casos se compararon los datos, CTD y HACH, de la estación en cuestión con sus aledañas y parecería ser que el dato de turbidez proveniente del HACH es incorrecto.

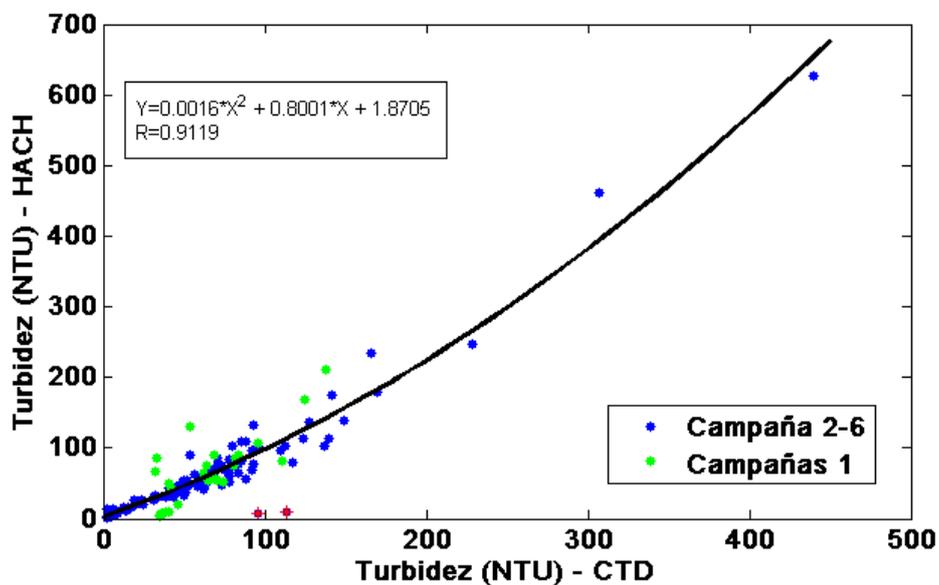


Figura 2.1.5. Turbidez superficial obtenida mediante el sensor de turbidez HACH en función de la obtenida por medio del CTD. Azul: Campañas 2-6. Verde: Campaña 1. Rojo: valores atípicos. Negro: Ajuste cuadrático.

2.2 Metodología

2.2.1 Análisis estadístico básico

El análisis estadístico de las variables turbidez y MPS fue realizado siguiendo la metodología planteada por Wilks (2006) donde se define la media (ecuación 1) y el desvío estándar (ecuación 2) como:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

El análisis estadístico de las curvas granulométricas se realizó siguiendo la metodología sugerida por Dean y Dalrymple (2001) y el Departamento de Armas de Mississippi, Estados Unidos (1984). La distribución de tamaños de sedimentos posee típicamente una distribución logarítmica normal, por lo que estudiarla utilizando la coordenada ϕ tal que

$$\phi = -\log_2(d) \quad (3)$$

donde d es el diámetro del grano en mm, suele ser más adecuada. Se utiliza la base 2 ya que los límites de la clasificación granulométrica en la escala de Wentworth (cita, creo que es del 64) en esta coordenada son enteros.

Una forma de presentar la información granulométrica es a través de la distribución acumulada, donde el porcentaje acumulado indica el porcentaje de la muestra, en peso, que posee diámetro más grueso al diámetro asociado. De esta forma d_{50} es el tamaño del diámetro que divide la muestra de manera tal que la mitad de la misma, en peso, tiene partículas más gruesas que el d_{50} . El d_{50} es un parámetro estadístico utilizado para caracterizar los perfiles granulométricos. Otros parámetros son

$$M_\phi = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3} \quad (4)$$

$$\sigma_{\phi} = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{2} \quad (5)$$

$$\alpha_{\phi} = \frac{M_{p_{hi}} - M_{d_{\phi}}}{\sigma_{p_{hi}}} \quad (6)$$

$$\beta_{\phi} = \frac{(\phi_{16} - \phi_5) + (\phi_{95} - \phi_{84})}{2\sigma_{\phi}} \quad (7)$$

Donde M_{ϕ} es la media, $M_{d\phi}$ es la mediana, ϕ es el tamaño de partícula de la curva de distribución en el percentil equivalente al subíndice. Estos cálculos fueron realizados siguiendo la metodología planteada por Dean y Dalrymple, 2001.

Debido a que la distribución en coordenada ϕ posee un comportamiento normal, la distribución puede ser descripta por la media (Ecuación 3) y el desvío estándar (Ecuación 4). Además de estos dos parámetros, la asimetría (Ecuación 5) y la curtosis (Ecuación 6) describen en qué medida la distribución del tamaño real de la muestra se aparta de la distribución normal teórica.

2.2.2 Componentes principales

En este trabajo se realizó el análisis granulométrico de los sedimentos en suspensión del estuario por medio del estudio de las curvas granulométricas. Debido a la dificultad de estudiar un conjunto de datos con esta extensión (144 curvas) se decidió utilizar el método de componentes principales (CP) para analizar y clasificar las mismas. Una de las características más importantes del método de componentes principales es que genera nuevas variables que pueden expresar la información contenida en el conjunto original de datos disminuyendo la dimensión del problema. Estas nuevas variables, llamadas componentes principales, son combinaciones lineales de las variables originales y son los autovectores de la matriz de correlación de la matriz de datos originales. Una característica muy importante de las CP es que son independientes entre sí, permitiendo aislar diferentes efectos que colaboran con la variabilidad. Una vez obtenidas las CP, se debe analizar su sentido físico, ya que estas pueden resultar de un artificio matemático.

Las CP se ordenan de forma decreciente según el porcentaje de varianza explicada. De esta forma la primer CP explica la mayor variabilidad de los datos originales. Cada CP posee

una correlación (factor loading) con cada anomalía de curva granulométrica original que nos indica la varianza explicada por la misma.

2.2.3 Test de regresión

En este trabajo se analizaron diferentes relaciones entre variables, como por ejemplo turbidez y concentración de MPS. Las regresiones lineales se testearon por medio de un test de T-student (Devore, 2008). Para ello se considera:

Ho: $\rho=0$, cuyo parámetro es el coeficiente de correlación

Ha : $\rho \neq 0$,

α = nivel de confianza

El estadístico T posee distribución T-student con grados de libertad igual a $n - 2$.

$$T = \frac{R\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}}, \quad (8)$$

Donde n es el número de datos.

Una vez calculado T, si este es menor al T (α) se rechaza la hipótesis nula. Por lo que ρ es significativamente diferente a cero.

2.2.4 Test de paralelismo

En este trabajo se evaluó la relación entre T y concentración de MPS en relación a una clasificación de la granulometría de los sedimentos en suspensión en el RdP. Para ello se

analizaron las diferentes relaciones lineales entre ambas variables utilizando el test de paralelismo, que permite comparar las pendientes de dos rectas. Este se realizó siguiendo la metodología para muestras grandes ($n > 25$) propuesta por Kleinbaum y Kupper (1978).

El test de hipótesis que se plantea es el siguiente:

$H_0: \beta_{01} = \beta_{02}$, siendo β_{01} y β_{02} las pendientes de las rectas 1 y 2.

$H_a: \beta_{01} \neq \beta_{02}$ (9)

α = nivel de confianza

El estadístico Z (ecuación 11) posee una distribución normal con media cero y desvío uno.

$$Z = \frac{\beta_{01} - \beta_{02}}{\sqrt{(S_{\beta_{01}}^2 + S_{\beta_{02}}^2)}} \quad (10)$$

siendo $S_{\beta_{0i}}^2$ la varianza estimada de la pendiente estimada para la recta i , $i = 1, 2$.

Una vez calculado Z, si este es menor al Z asociado al nivel de confianza se rechaza la hipótesis nula. Por lo que las pendientes son significativamente diferentes con un nivel de confianza igual a α .

2.2.5 Análisis Wavelet Morlet

Muchas veces las series temporales muestran un comportamiento no estacionario. Si bien puede presentar señales con períodos particulares, estas pueden no estar presentes durante todo el intervalo de muestreo. La metodología de wavelets parte de la base de que la señal está compuesta por una suma de oscilaciones, las cuales varían su importancia en función del tiempo. Este análisis permite descomponer las series temporales en el espacio de tiempos y frecuencias. Para ello se realiza la transformada de Fourier dentro de una ventana de cierto tamaño sobre la serie temporal. Por lo que este análisis no solo posibilita el análisis espectral, sino que también el estudio de su variabilidad temporal (Torrence y Compo, 1998). En particular en este trabajo se utilizó una ventana Morlet (Figura 2.2.1) siguiendo análisis similares realizados por Simionato *et al.* (2005), Matano *et al.* (2014) y Spennemann

(2015). Para ello se utilizó la guía práctica para análisis Wavelet brindada por Torrence y Compo (<http://ion.exelisvis.com/>).

Los productos obtenidos en la metodología wavelet son el espectro local y global wavelet. El primero indica una medida local del espectro, es decir que muestra la variabilidad temporal de las componentes oscilatorias presentes en la serie original. Los colores cálidos indican una mayor presencia de las componente y los colores fríos una menor presencia. Es necesario aclarar que este producto contiene un cono de influencia que se define como la región donde los efectos del borde empiezan a ser significativos. Por lo que los resultados a analizar son los que se encuentran en el sector superior del mismo. El segundo producto, el espectro wavelet global, es un promedio temporal del primero y da una idea de la varianza explicada por cada componente durante la totalidad del periodo de muestreo.

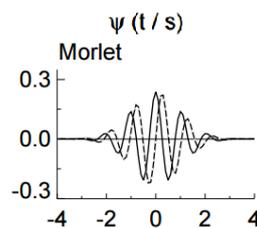


Figura 2.2.1. Ventana Morlet utilizada en la metodología wavelet.

2.2.6 Análisis espectral cruzado

En este trabajo se estudiaron las relaciones entre las series temporales de intensidad de viento, altura de ola y turbidez. Cuando dos series temporales parecen estar correlacionadas, la pregunta puede ser si esta correlación se debe a correlación entre las componentes de bajas o altas frecuencias (Panofsky, 1968). Por este motivo se implementó la metodología de espectros cruzados que brinda información acerca del grado de correlación entre diferentes ciclos presentes en dos señales. Los productos obtenidos en este análisis son la amplitud cruzada, la coherencia cuadrada y la fase. La amplitud cruzada es una medida de la covarianza entre los diferentes periodos de las dos series. La coherencia cuadrada puede ser interpretada como el cuadrado del coeficiente de correlación de las componentes de las series en cada periodo. Este coeficiente varía entre 0 a 1, siendo 1 cuando la correlación es máxima. La fase es la medida en la que cada modo (k) de una serie lleva al modo correspondiente de la otra serie (k). Todo el análisis se realizó por medio de los software Statistica y Matlab.

Goodman (1957) plantea un límite de significancia para el coeficiente de coherencia cuadrada. La fórmula aproximada para limitarla coherencia con cierto nivel de confiabilidad (ρ) es:

$$\beta = \sqrt{1 - \rho^{\frac{1}{df-1}}} \quad (11)$$

Siendo df el número de grados de libertad definido con respecto al análisis del espacio espectral por $\frac{2N - m}{m}$, con m número de datos considerados para realizar la metodología de espectros cruzados.

3. Resultados

3.1 Campos medios y variabilidad

3.1.1 Turbidez superficial

La figura 3.1.1 muestra el campo espacial medio de turbidez superficial en el RdP derivado de las muestras de agua colectadas durante el Experimento FREPLATA/FFEM, en la que se observan valores mayores al norte de la Bahía Samborombón y valores mínimos al aproximarse a océano abierto. También se puede apreciar que la turbidez superficial en el estuario intermedio, sobre la Barra del Indio, disminuye hacia la costa norte. La turbidez superficial presenta un valor medio sobre todo el estuario de 61 NTU, con un desvío estándar de 62 NTU. La máxima variabilidad temporal de esta variable (Figura 3.1.2) se encuentra en la Zona de Máxima Turbidez (ZMT); se encuentran valores bajos hacia el interior y el exterior del estuario, con el valor mínimo hacia el mar abierto.

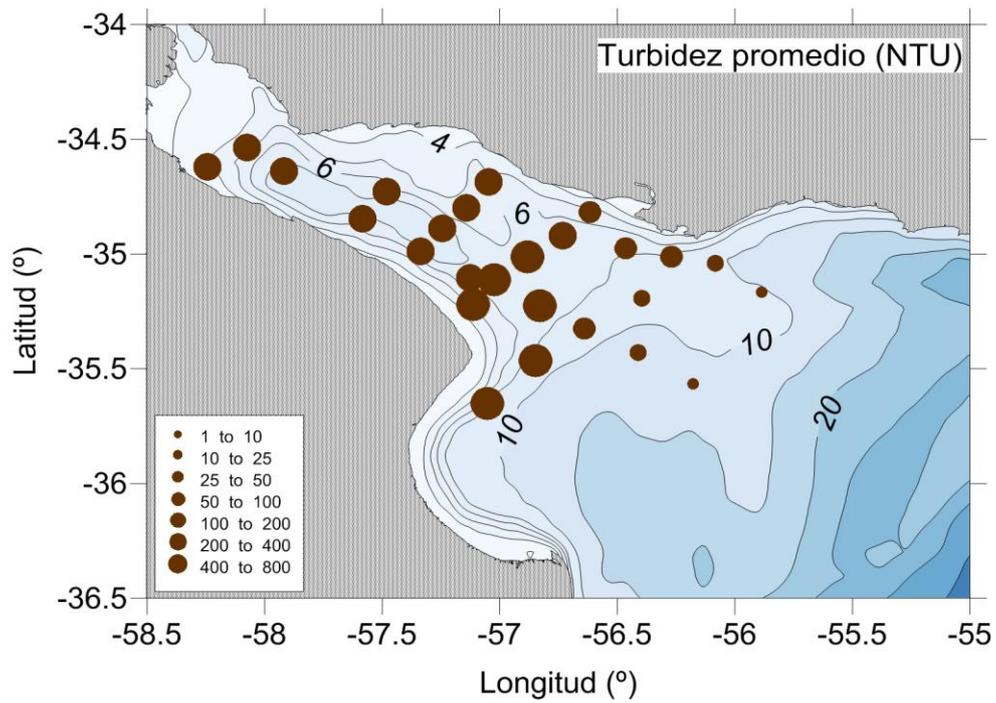


Figura 3.1.1. Campo medio de la turbidez superficial (NTU) en el RdP obtenido a partir de las muestras de agua analizadas con un sensor de turbidez HACH, en marco del Experimento FREPLATA/FFEM.

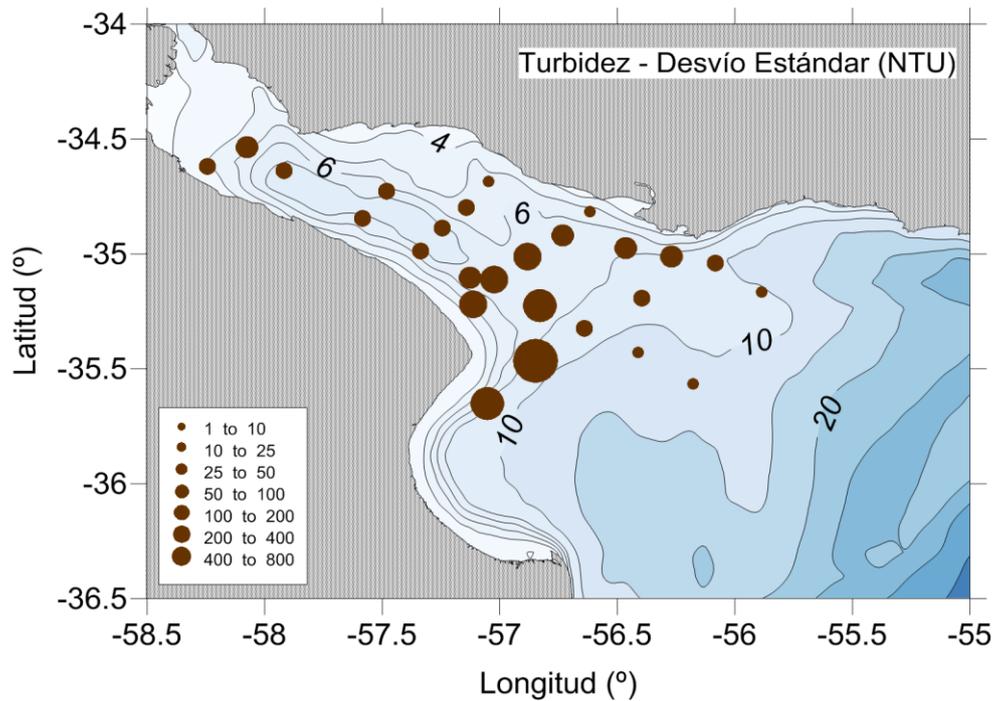


Figura 3.1.2. Desvío Estándar de la turbidez superficial (NTU) en el RdP obtenido a partir de las muestras de agua analizadas con un sensor de turbidez HACH, en marco del Experimento FREPLATA/FFEM.

3.1.2 Concentración de MPS

La Figura 3.1.3 muestra el campo espacial medio de la concentración de MPS derivado de las muestras de agua adquiridas durante el Experimento FREPLATA/FFEM en el RdP, en la que se observa un patrón similar al observado en la sección previa para el campo medio de turbidez (Figura 3.1.1). Donde las concentraciones más altas ocurren en la región cercana a Punta Piedras, mientras que los valores decrecen hacia el exterior del estuario y hacia la costa norte en proximidades de la desembocadura del río Santa Lucía. La concentración de MPS durante las 5 primeras campañas presenta un valor medio de 45 mg.l^{-1} sobre todo el RdP, con un desvío estándar de 40 mg.l^{-1} . En cuanto a la variabilidad temporal (Figura 3.1.4), el desvío estándar es mínimo hacia la Plataforma Continental y su valor máximo (126 mg.l^{-1}) se observa sobre la estación 20 durante la campaña 3, en la que se midió una concentración de 313 mg.l^{-1} . En el resto del RdP la variabilidad entre las muestras de las diferentes campañas es menor a los 60 mg.l^{-1} .

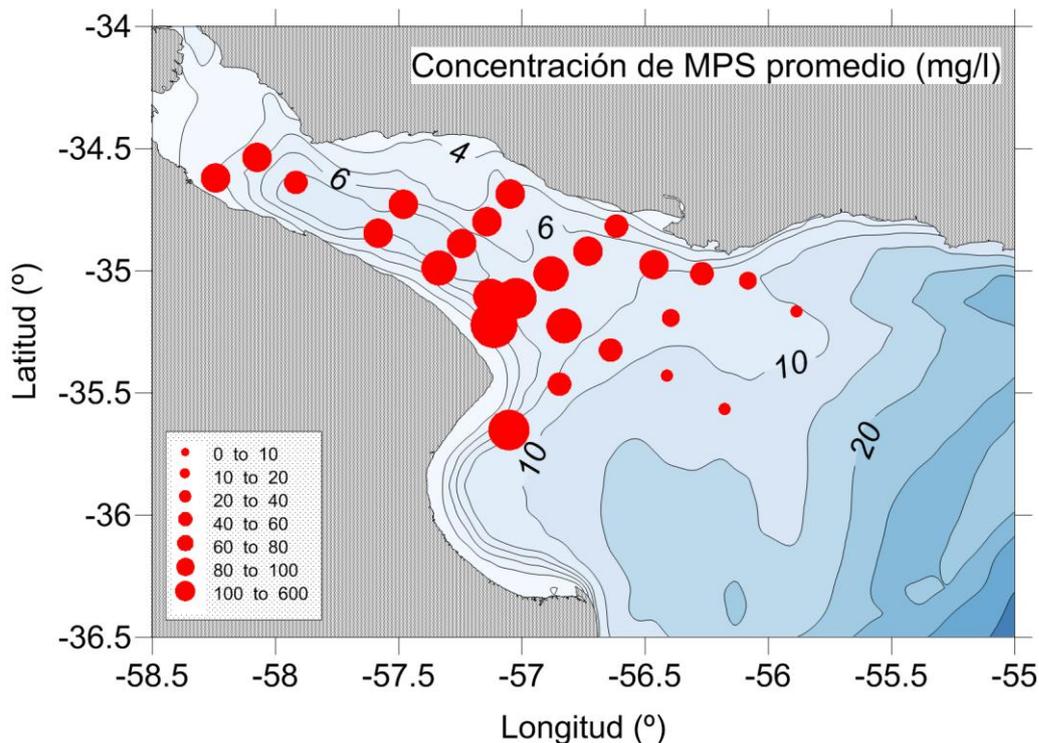


Figura 3.1.3. Campo medio de concentración de MPS superficial (mg.l^{-1}) en el RdP obtenido a partir de las muestras de agua analizadas con un sensor de turbidez HACH, en marco del Experimento FREPLATA/FFEM.

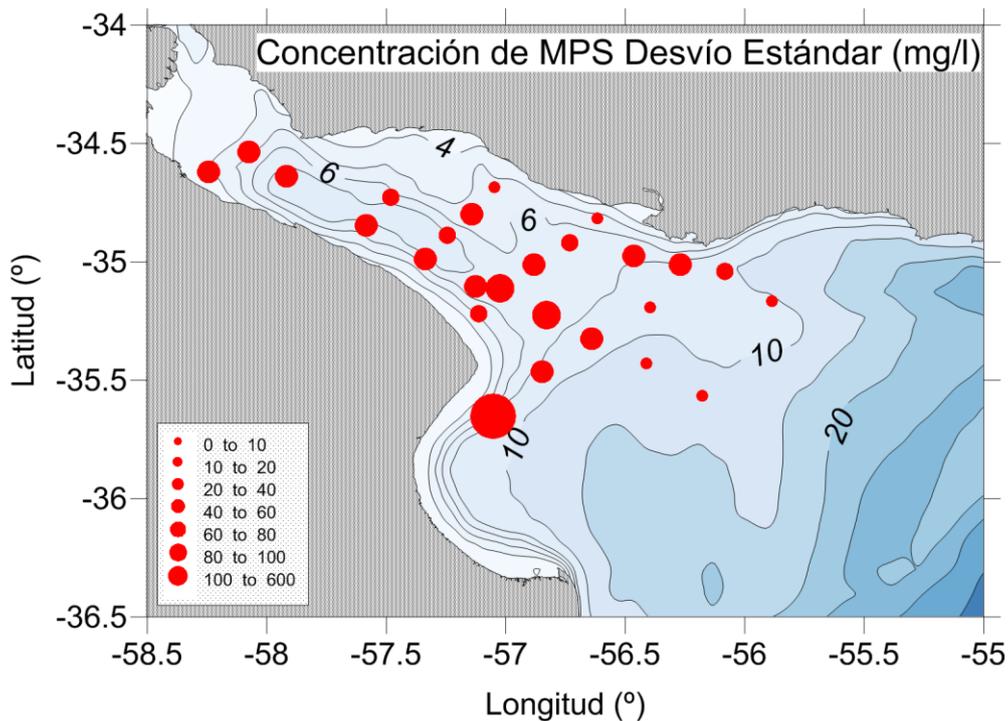


Figura 3.1.4. Desvío Estándar de la concentración de MPS superficial (mg.l^{-1}) en el RdP obtenido a partir de las muestras de agua analizadas con un sensor de turbidez HACH, en marco del Experimento FREPLATA/FFEM.

3.1.3 Análisis granulométrico de sedimentos en suspensión

Durante las campañas se obtuvieron 114 perfiles granulométricos (5 campañas de 26 estaciones cada una). El perfil medio se muestra en la Figura 3.1.5, donde se aprecia la predominancia de sedimentos con $18.0 \mu\text{m}$ ($0,018 \text{ mm}$) de diámetro, asociados a limos según la clasificación de Wentworth (Tabla 3.1).

La distribución granulométrica presenta la mayor variabilidad ($\pm 6,6 \mu\text{m}$) en los $22,0 \mu\text{m}$, disminuyendo para tamaños mayores y menores. Se percibe una variabilidad relativamente alta en los $250 \mu\text{m}$, asociado a las estaciones 4 y 7 de la campaña 5 cuyos perfiles son notablemente diferentes de un perfil típico como el de la estación 2 de la campaña 2 (Figura 3.1.6). La estación 4 se encuentra equidistante de las costas de Argentina y Uruguay a la altura de la ciudad uruguaya de Juan Lacaze. La estación 7 se ubica a la altura de la ciudad argentina de Atalaya, más cerca de la costa argentina. Ambas estaciones pertenecen al RdP

intermedio. La estación 2 se ubica sobre el límite entre el RdP interior e intermedio equidistante a ambas costas (Figura 1.1.1 y Figura 2.1.1).

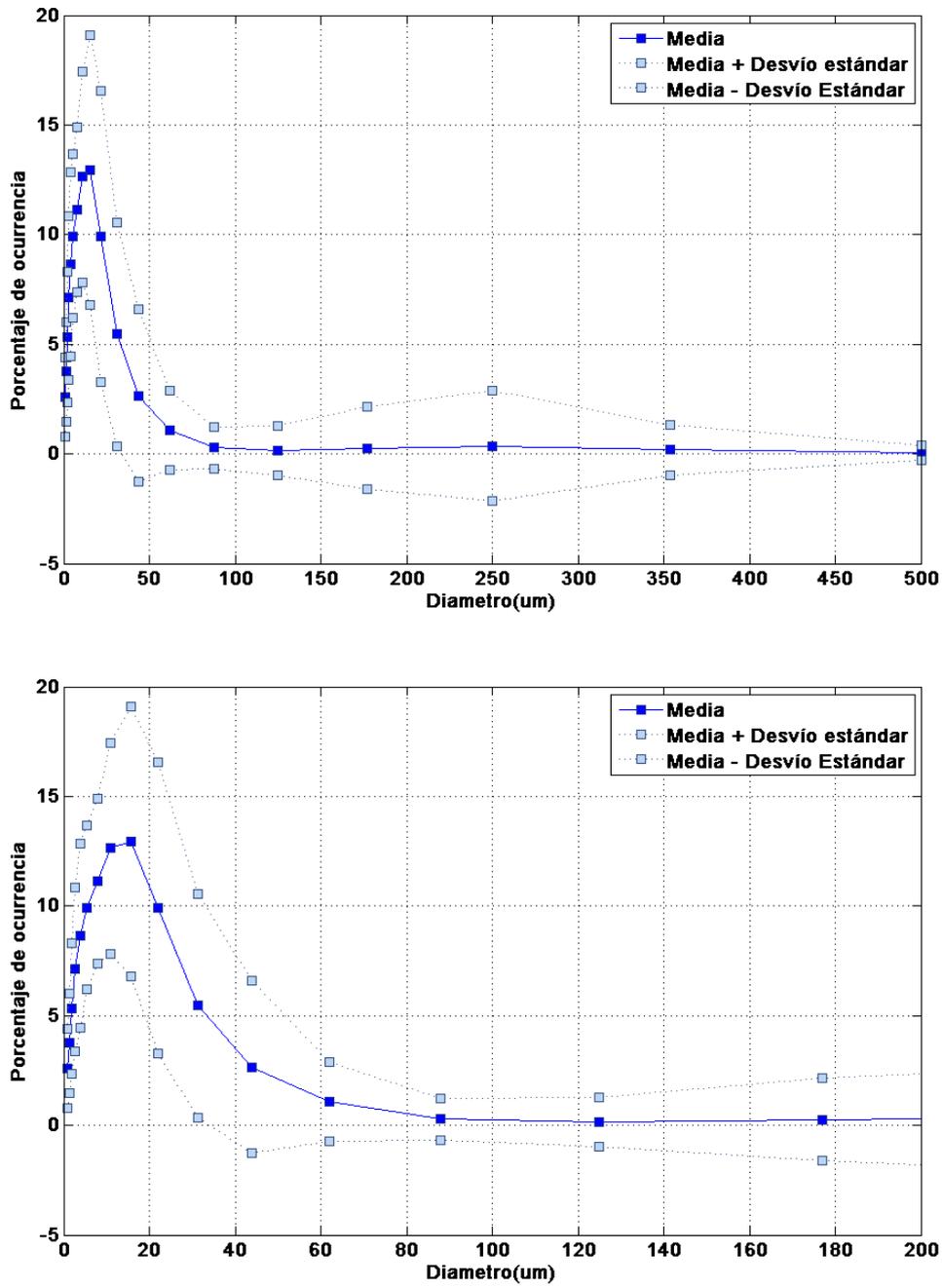


Figura 3.1.5. Perfil granulométrico medio obtenido a partir de de las observaciones realizadas en marco del Experimento FREPLATA/FFEM. Escala lineal. A) Curva granulométrica media entre 0-500 μm . B) Zoom de la curva granulométrica media entre 0 y 200 μm .

Tabla 3.1. Clasificación de tamaño de partícula según la granulometría (Departamento de Armas de Mississippi, Estados Unidos, 1984; *D'apres DYER, 1985*)

Díámetro (mm)	ϕ (Phi)	Clasificación Wentworth	
$256.0 > d$	$\phi < -8.0$	Canto Rodado	
$64.0 > d > 256.0$	$-8.0 < \phi < -6.0$	Adoquín	
$64.0 > d > 4.0$	$-6.0 < \phi < -2.0$	Guijarro	
$4.0 > d > 2.0$	$-2.0 < \phi < -1.0$	Grava	
$2.0 > d > 1.0$	$-1.0 < \phi < 0.0$	Muy gruesa	Arena
$1.0 > d > 0.5$	$0.0 < \phi < 1.0$	Gruesa	
$0.5 > d > 0.25$	$1.0 < \phi < 2.0$	Mediana	
$0.25 > d > 0.125$	$2.0 < \phi < 3.0$	Fina	
$0.125 > d > 0.062$	$3.0 < \phi < 4.0$	Muy fina	Limo
$0.062 > d > 0.031$	$4.0 < \phi < 5.0$	Grueso	
$0.031 > d > 0.016$	$5.0 < \phi < 6.0$	Mediano	
$0.016 > d > 0.008$	$6.0 < \phi < 7.0$	Fino	
$0.008 > d > 0.0039$	$7.0 < \phi < 8.0$	Muy fino	
$0.039 > d > 0.0024$	$8.0 < \phi < 12.0$	Arcilla	
$0.0024 > d$	$12.0 < \phi$	Coloide	

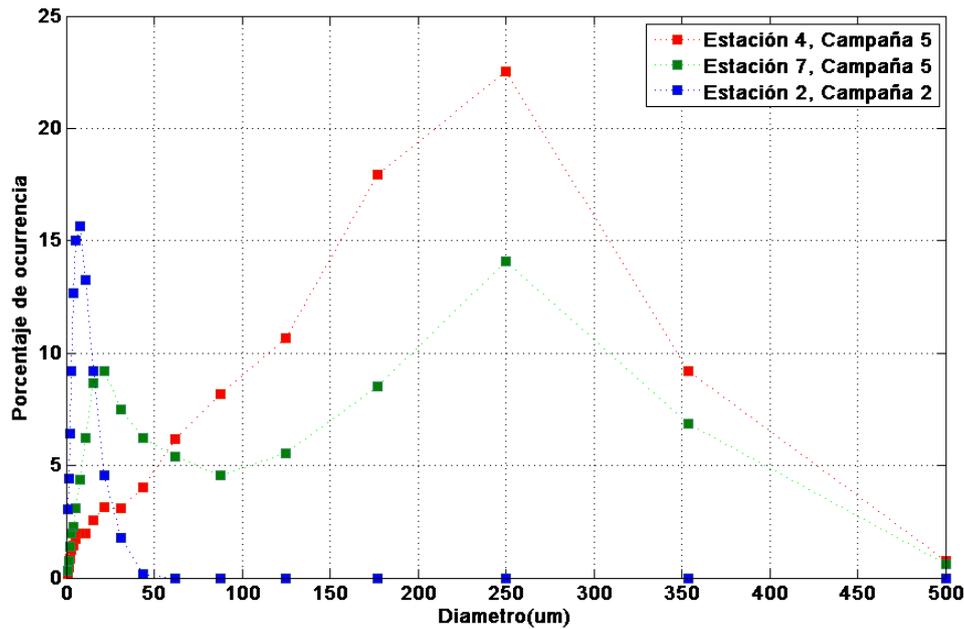


Figura 3.1.6. Perfiles granulométricos de las estaciones 4 y 7 de la Campaña 5 (rojo y verde, respectivamente) y la estación 2 de la Campaña 2 (azul) obtenidos a partir de las observaciones realizadas en marco del Experimento FREPLATA/FFEM. Escala lineal.

El perfil medio de este conjunto de curvas granulométricas posee un $d_{50} = 9,85 \mu\text{m}$, equivalente a $\phi_{50} = 6,67$, $M_{\phi} = 6,84$, $\sigma_{\phi} = 1,67$, $\alpha_{\phi} = 0,105$ (Figura 3.1.7). La media es más grande que la mediana, lo que quiere decir que la distribución no posee una simetría perfecta; esto se puede apreciar también a partir del valor de α_{ϕ} que, si bien es pequeño, es diferente a cero. Esta asimetría indica que la curva granulométrica media posee mucha información en sedimentos finos y poca en sedimentos gruesos. Por otro lado, el desvío estándar es mayor a 1 por lo que el sedimento en este caso está pobremente clasificado (Dean y Dalrymple, 2001). La curtosis no se pudo calcular debido a falta de información acerca de los sedimentos más finos menores a $0,69 \mu\text{m}$.

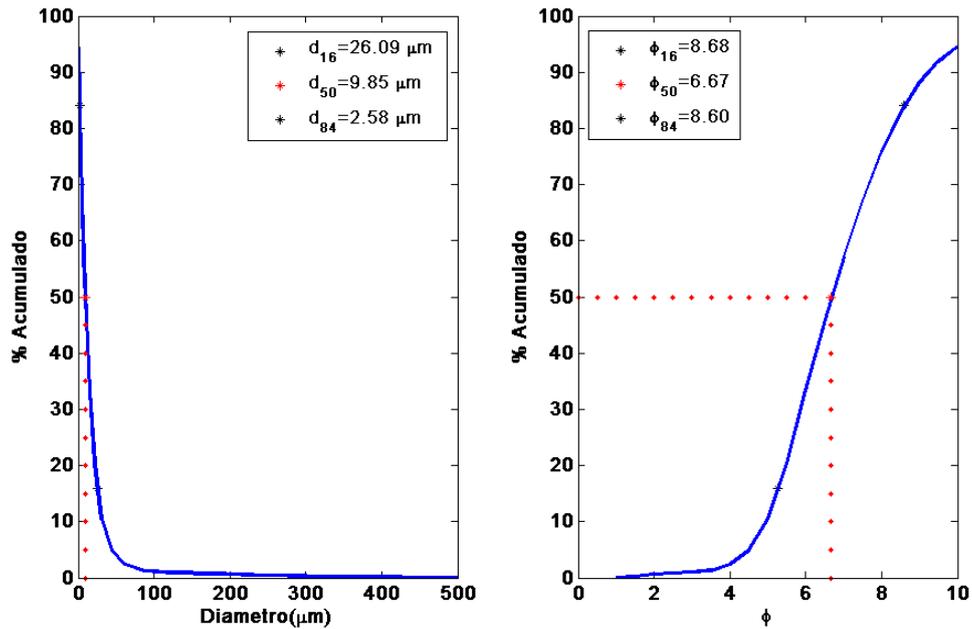


Figura 3.1.7. Perfil granulométrico medio acumulado obtenido a partir de las observaciones realizadas en marco del Experimento FREPLATA/FFEM. Escala lineal. Izquierda: diámetro (μm). Derecha: coordenada ϕ .

3.2 Componentes principales

Con el objetivo de analizar la ocurrencia de posibles patrones espaciales y temporales en la distribución granulométrica de los sedimentos en suspensión en el RdP, se realizó un análisis de componentes principales a partir de los histogramas de granulometría. Para ello se utilizaron las herramientas de los software Matlab y Statistica. Las muestras de sedimentos poseen distribuciones granulométricas con mucha información en pocos intervalos de clase (diámetro entre 0-75 μm aproximadamente) y poca información en otros (diámetro mayor a 75 μm). Por lo tanto se realizó el análisis sobre la anomalía, definida como el valor de la muestra menos la curva media, siguiendo la metodología realizada por Moreira en su tesis Doctoral.

El método estadístico de CP permite obtener curvas granulométricas características. Si bien estas curvas no son representativas de la distribución granulométrica real, su visualización es de gran utilidad (Figura 3.2.1). Cada CP explica cierto porcentaje de la varianza total, en este caso asociada al número de casos que presenta una distribución granulométrica similar a la del

modo. Para los histogramas analizados los resultados fueron CP1: 59,8% y CP2: 25,04%, mientras que el resto de los modos explican menos del 6% de la varianza total.

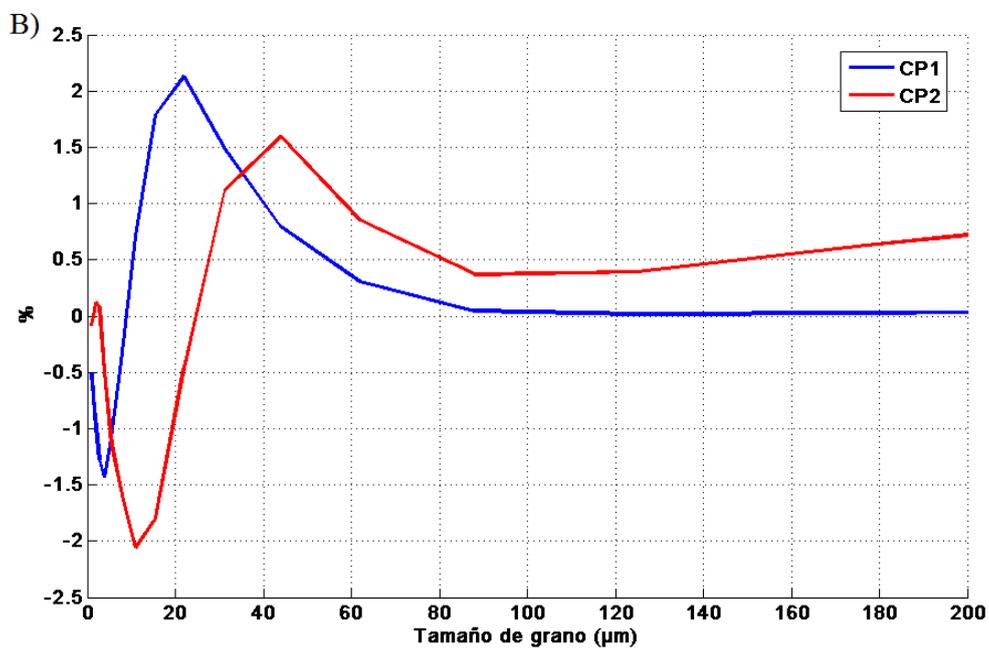
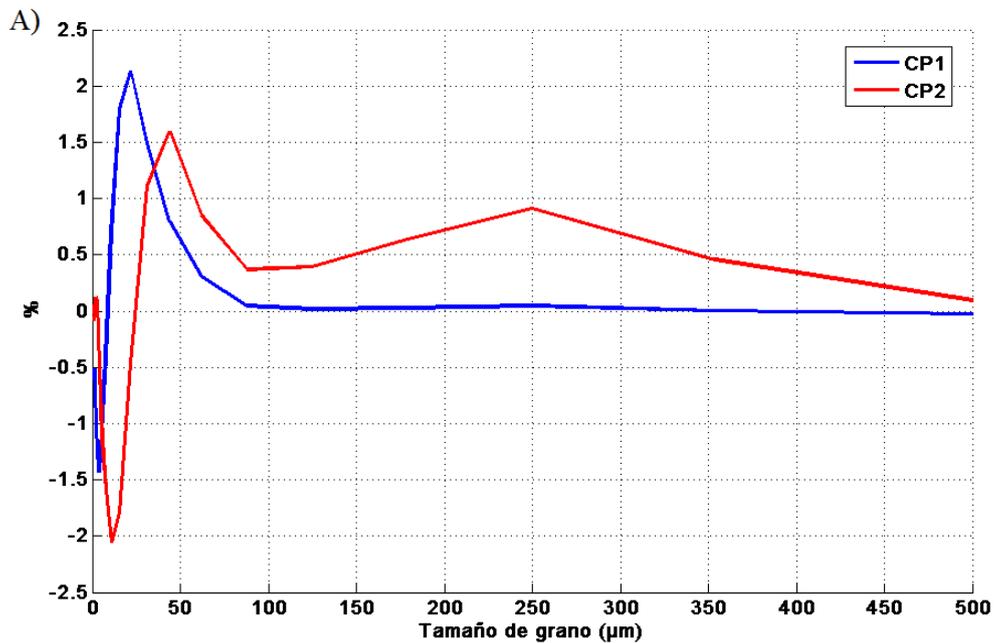


Figura 3.2.1. Componentes principales calculadas en base a la anomalía de las curvas granulométricas obtenidas en marco del Experimento FREPLATA/FFEM; se presentan las dos con mayor varianza explicada. A) Perfil completo. B) Ampliación.

Se puede observar que la CP1 en su modo positivo posee un mínimo asociado a sedimentos finos, correspondientes a arcilla y limo fino (2-10 μm) con el pico mínimo en limo muy fino (4 μm). También presenta un máximo asociado a sedimentos del tipo limo medio y grueso (12-40 μm), con un pico en limo medio (22 μm). La CP2 en su modo positivo posee un máximo relativo en los sedimentos muy finos, correspondientes a arcilla (1-3 μm); un mínimo en sedimentos del tipo de limo fino y muy fino (6-18 μm), con un pico mínimo en limo fino (11 μm); y un máximo de sedimentos del tipo limo grueso (29-57 μm) (Tabla 3.1).

Con la correlación que posee la CP1 y la CP2 con las anomalías de los histogramas de las curvas granulométricas originales (o factor loadings) se diseñaron mapas para cada una de las campañas con las correlaciones con módulo mayor a 0.7 (Figura 3.2.7 - 3.2.7, paneles izquierdos para CP1 y paneles derechos para CP2) de modo de poder visualizar las zonas en las que cada CP explica mayor varianza.

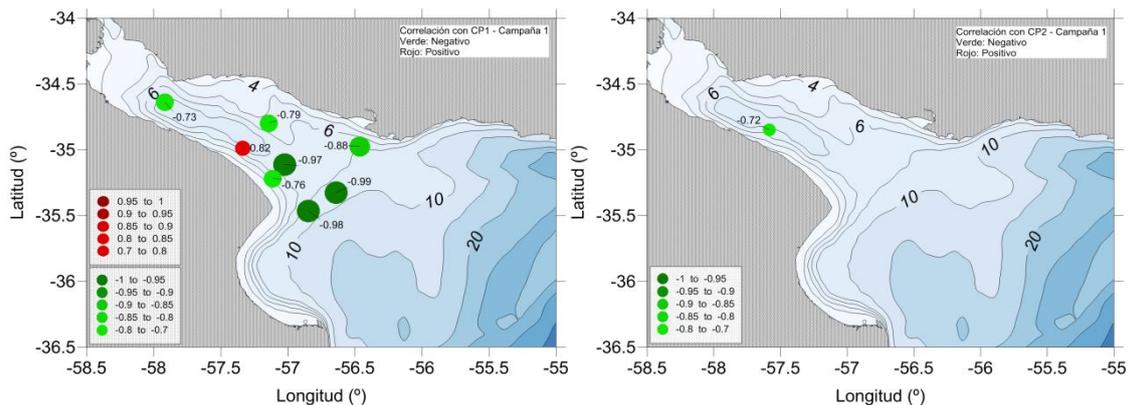


Figura 3.2.2. Correlaciones con módulo mayor a 0.7 entre las curvas granulométricas de las estaciones de la campaña 1 con CP1 (izquierda) y CP2 (derecha) obtenidas por medio del análisis estadístico de componentes principales. Rojo: valores positivos. Verde: valores negativos. El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud de la correlación.

La Figura 3.9 muestra que en la Campaña 1 (período 23-28 de noviembre de 2009) las estaciones cercanas a Punta Piedras presentan una correlación negativa con la CP1 (que identifica una anomalía positiva de sedimentos entre 2 y 10 μm que corresponden a arcilla y limo fino) y una anomalía negativa de sedimentos intermedios (12-40 μm). En su fase positiva (que representa anomalía positiva de sedimentos con valores de diámetro entre 12 y 40 μm , limo) se encuentra una buena correlación solamente en el RdP intermedio sobre la costa sur

(estación 6). Por otra parte la estación 5, ubicada cerca de la costa Argentina aguas arriba de la ciudad de Atalaya, presenta una correlación negativa con la CP2, asociado a una anomalía negativa de sedimentos con diámetro entre 6-18 μm (limo fino y muy fino) respecto del perfil medio de granulometría.

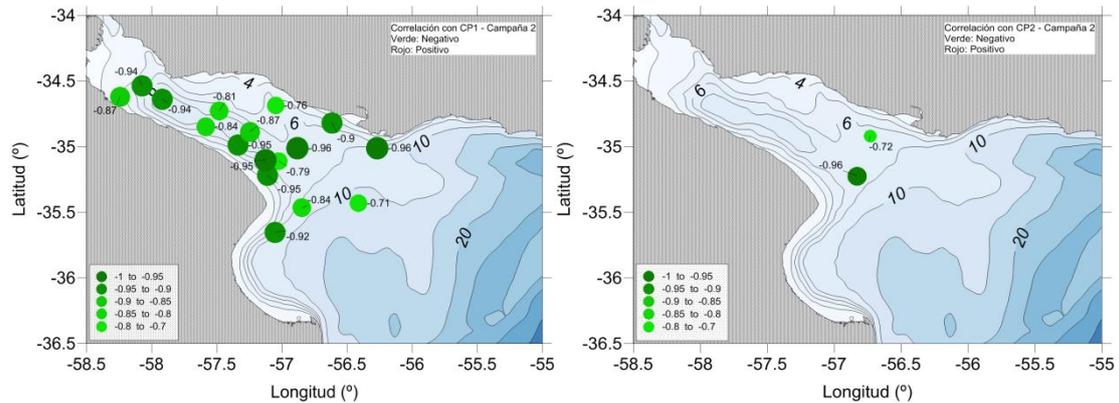


Figura 3.2.3. Correlaciones con módulo mayor a 0.7 entre las curvas granulométricas de las estaciones de la campaña 2 con CP1 (izquierda) y CP2 (derecha) obtenidas por medio del análisis estadístico de componentes principales. Rojo: valores positivos. Verde: valores negativos. El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud de la correlación.

La Figura 3.2.3 muestra que durante la Campaña 2 (período 17-19 de marzo de 2010) la mayoría de las estaciones presentan una correlación negativa con la CP1 que identifica un incremento de sedimentos entre 2 y 10 μm , correspondientes a arcilla y limo fino, y una disminución de sedimentos entre 12-40 μm , correspondientes a limo medio y grueso respecto del perfil granulométrico medio. Por otro lado dos estaciones cercanas a la Barra del Indio presentan correlación negativa con la CP2 asociada a una anomalía positiva en sedimentos del tipo limo fino y muy fino.

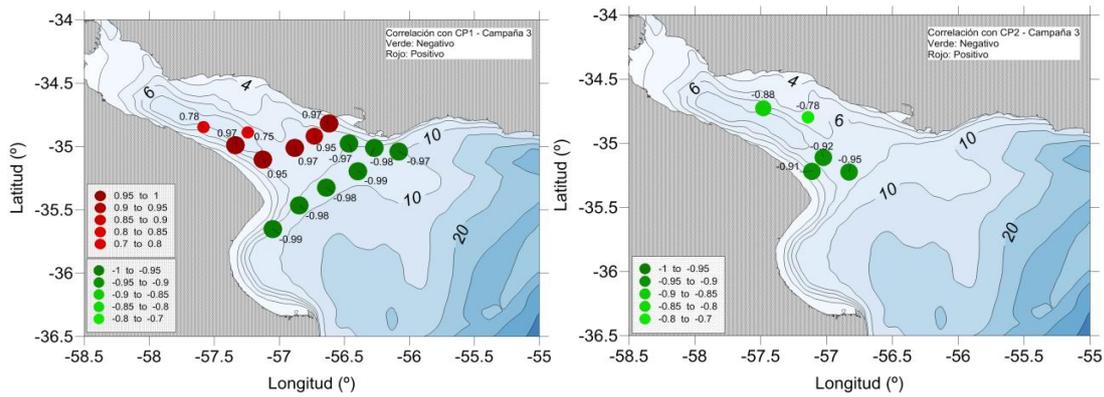


Figura 3.2.4. Correlaciones con módulo mayor a 0.7 entre las curvas granulométricas de las estaciones de la campaña 3 con CP1 (izquierda) y CP2 (derecha) obtenidas por medio del análisis estadístico de componentes principales. Rojo: valores positivos. Verde: valores negativos. El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud de la correlación.

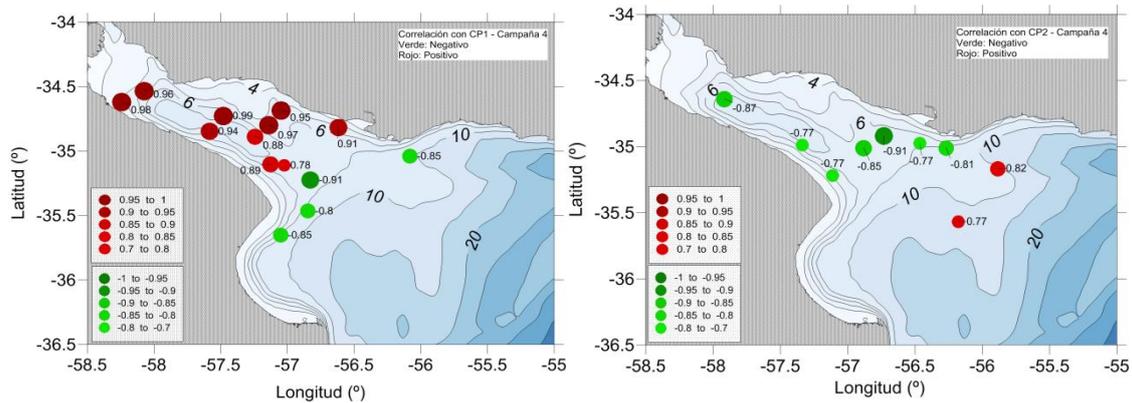


Figura 3.2.5. Correlaciones con módulo mayor a 0.7 entre las curvas granulométricas de las estaciones de la campaña 4 con CP1 (izquierda) y CP2 (derecha) obtenidas por medio del análisis estadístico de componentes principales. Rojo: valores positivos. Verde: valores negativos. El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud de la correlación.

Las Figuras 3.2.4 y 3.2.5 (paneles de la izquierda) muestran que durante las campañas 3 y 4 (períodos 23-25 de junio de 2010 y 23-27 de agosto de 2010) las estaciones ubicadas en la parte exterior del estuario presentan una correlación negativa con la CP1, asociada a una anomalía positiva de sedimentos del tipo arcilla y limo fino (2 y 10 μm de diámetro) y una anomalía negativa de sedimentos del tipo limo medio y grueso respecto a la curva granulométrica promedio. Mientras que las estaciones que se encuentran aguas arriba de la Barra del Indio, RdP interior e intermedio en la campaña 4 y RdP intermedio para la campaña 3, muestran una anomalía positiva de sedimentos del tipo limo (12 y 40 μm de diámetro) respecto del perfil medio.

La Figura 3.2.4 (panel de la derecha) muestra que las estaciones cercanas a Punta Piedras y dos estaciones ubicadas en el RdP intermedio presentan una correlación negativa con la CP2 que identifica una anomalía positiva de sedimentos del tipo limo fino y muy fino durante la Campaña 3. Durante la campaña 4 (Figura 3.2.5, panel de la derecha) este tipo de correlación está presente en estaciones ubicadas en el límite entre el RdP interior e intermedio, en la Barra del Indio y aguas abajo de la misma sobre la costa uruguaya. Además estaciones en el RdP exterior del lado uruguayo presentan una correlación positiva con CP2 que identifican un incremento de sedimentos con diámetro entre 29-57 μm , asociados a limo grueso.

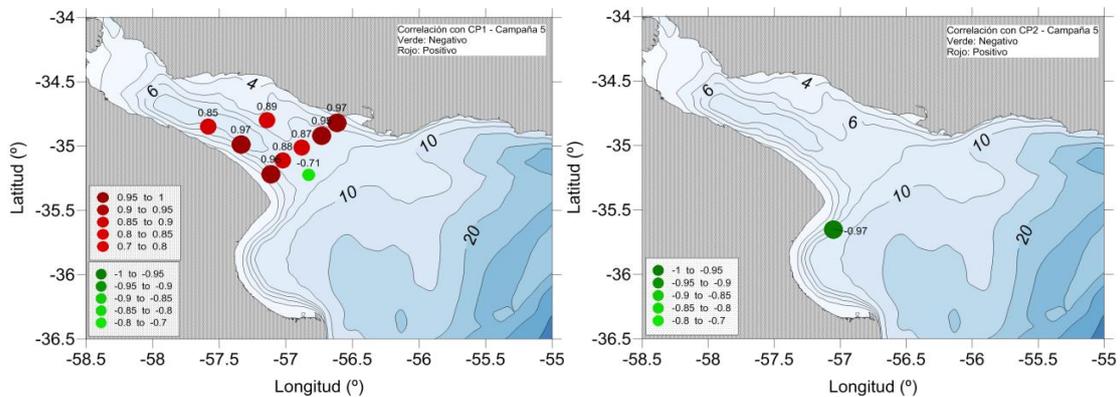


Figura 3.2.6. Correlaciones con módulo mayor a 0.7 entre las curvas granulométricas de las estaciones de la campaña 5 con CP1 (izquierda) y CP2 (derecha) obtenidas por medio del análisis estadístico de componentes principales. Rojo: valores positivos. Verde: valores negativos. El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud de la correlación.

La Figura 3.2.6 muestra que durante la Campaña 5 (período 25-28 de octubre de 2010) las correlaciones con la CP1 presentan el mismo patrón que para las campañas 3 y 4, con anomalías positivas en el RdP intermedio en sedimentos con valores de diámetro entre 12 y 40 μm respecto del perfil granulométrico medio y una estación aguas abajo de la Barra del Indio con correlación negativa con la CP1. Durante esta campaña no se realizaron varias estaciones debido a las malas condiciones meteorológicas imperantes. Por otro lado el sector norte de la Bahía de Samborombón presenta una correlación negativa con la CP2, asociada a una anomalía positiva de limo fino y muy fino y una anomalía negativa de limo grueso.

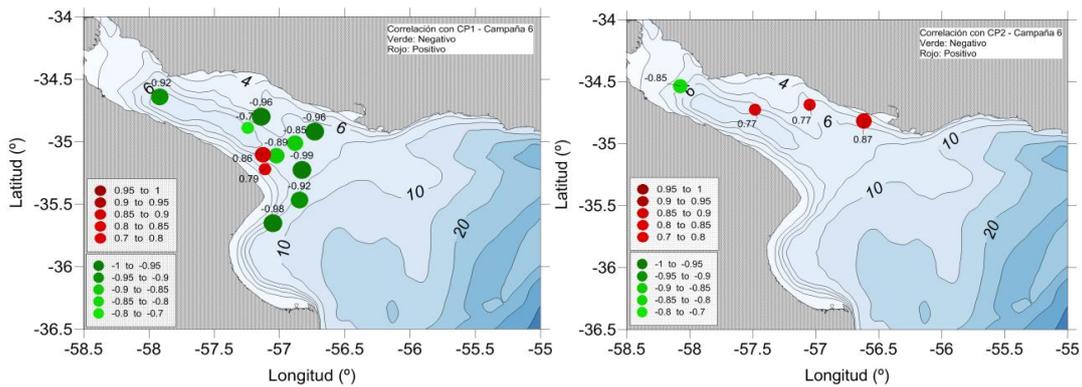


Figura 3.2.7. Correlaciones con módulo mayor a 0.7 entre las curvas granulométricas de las estaciones de la campaña 6 con CP1 (izquierda) y CP2 (derecha) obtenidas por medio del análisis estadístico de componentes principales. Rojo: valores positivos. Verde: valores negativos. El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud de la correlación.

Finalmente, la Figura 3.2.7 muestra que durante la Campaña 6 (período 15-17 de diciembre de 2010) las estaciones al norte de Punta Piedras presentan una correlación positiva con la CP1, asociado a un incremento de sedimentos del tipo arcilla y limo fino y una disminución de sedimentos intermedios del tipo limo medio y grueso (12-40 μm) respecto de la curva granulométrica media. Además se observa correlación negativa en la parte norte de la Bahía de Samborombón, en las zonas aledañas a la Barra del Indio y en el límite entre el RdP interior e intermedio (estación 3). Por otra parte las estaciones del RdP intermedio presentan correlaciones positivas con la CP2 sobre la margen uruguaya y el centro del estuario y una anomalía positiva en limo fino y muy fino en la estación 3 (correlación negativa con CP2).

En conclusión la varianza explicada por la CP2 es menor que la explicada por CP1 y no se observan patrones claros de correlaciones significativas para este modo.

3.3 Relación entre la turbidez y la concentración de MPS en superficie

Se estudió la relación entre concentración de MPS y la T, en particular la posibilidad de identificar diferentes relaciones en función de la granulometría de los sedimentos en suspensión. En este estudio se descarta la campaña 6 por falta de datos de MPS.

Se clasificaron las estaciones que poseen correlación entre la curva granulométrica y la CP1 mayor a 0.7 en módulo en dos grupos, según si la correlación fue positiva (R+) o negativa

(R-). Luego se determinaron las relaciones entre la T y la concentración de MPS de ambos conjuntos (Figura 3.3.1). La relación encontrada para el primer grupo (29 estaciones) posee un coeficiente de determinación $R^2 = 0,964$, mientras que la del segundo (42 estaciones) posee un $R^2 = 0,774$.

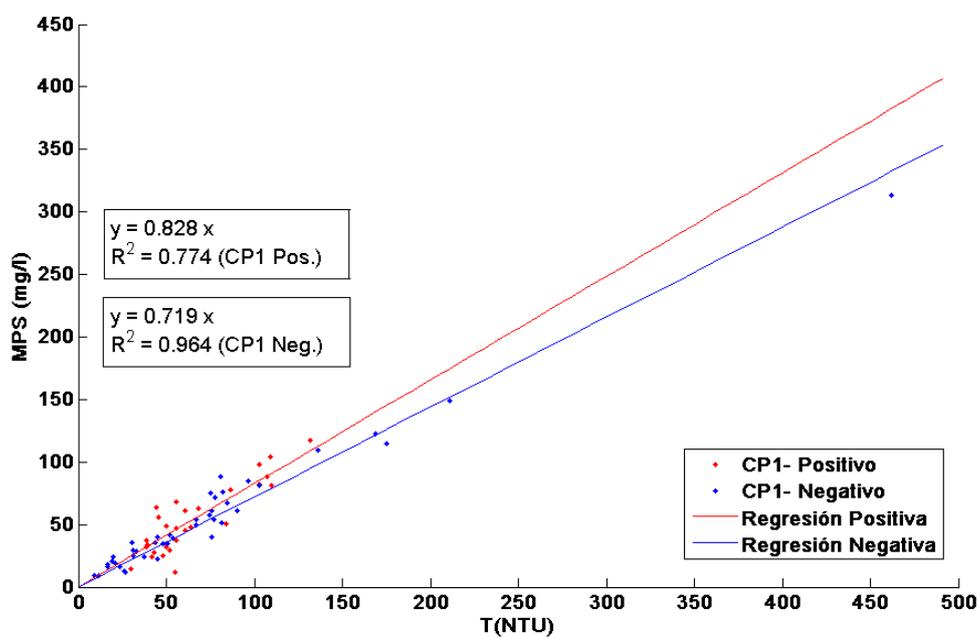


Figura 3.3.1. Relación entre T (NTU) y concentración de MPS (mg.l^{-1}) considerando las estaciones con correlación significativa positiva (rojo, N = 29) y negativa (azul, N = 42) con CP1. Datos obtenidos en marco del Experimento FREPLATA/FFEM.

Se testearon las relaciones encontradas por medio de un test de T-student (Devore, 2008), considerando n igual a 29 (correlación positiva) y 42 (correlación negativa). En ambos casos las regresiones lineales encontradas son estadísticamente significativas con una confianza del 99,5%. Posteriormente se analizó si existe una diferencia significativa entre las pendientes de las rectas encontradas para ambos grupos de datos. Para ello se utilizó un test de paralelismo (Kleinbaum y Kupper, 1978), el cual se implementó por medio del software Matlab, y se halló que son significativamente diferentes con una confianza del 85%.

Como resultado de la comparación de las diferentes regresiones lineales según la granulometría de los sedimentos en suspensión se obtuvo una mayor correlación en la relación entre T y la concentración de MPS en las estaciones asociadas a un CP1 negativo ($R^2 = 0,964$), es decir con un máximo en sedimentos finos (limo fino y arcilla) y un mínimo de sedimentos

intermedios (limo medio y grueso). En cambio, las estaciones asociadas con el CP1 positivo, mínimo en sedimentos finos (2 y 10 μm de diámetro) y máximo en sedimentos intermedios (12-40 μm), poseen una relación entre T y concentración MPS con menor correlación ($R^2 = 0,774$). Por otro lado se encontró que las rectas difieren significativamente con un 85% de confianza, resultado relevante dado la poca cantidad de datos disponibles.

3.4 Descarga del Río Bermejo

Los sedimentos en suspensión que llegan al RdP ingresan mayormente por el Río Paraná, proviniendo del Río Bermejo a través del Río Paraguay. Los sedimentos del Río Bermejo son del tipo limos y arcillas principalmente y presentan un ciclo estacional muy marcado (Dogliotti *et. al.*, paper en revisión). En esta sección se van a analizar los dos grupos de estaciones encontrados a través del análisis de componentes principales según su granulometría (Sección 3.2) en relación con la descarga del Río Bermejo.

La concentración de sedimentos en suspensión media diaria en la estación El Colorado, ubicada en el Río Bermejo, en el periodo 2002-2011 (ver posición en la Figura 1.3.3) muestra un máximo en Febrero-Marzo y según la bibliografía consultada (Simionato *et al.*, 2009 y Moreira *et al.*, 2013) este máximo influiría en el RdP en el orden de 1-2 meses más tarde (Marzo-Mayo) para condiciones de descarga líquida media.

Se analizaron la concentración de T y concentración de MPS en el RdP para las diferentes campañas realizadas. Las Figuras 3.4.1 y 3.4.2 muestran los campos de T y MPS durante las campañas 1 y 2 (períodos 23-28 de noviembre de 2009 y 17-19 de marzo de 2010), en la que se observan valores mayores en las estaciones cercanas a Punta Piedras y valores mínimos en el RdP exterior. También se aprecia que ambas variables en el RdP intermedio hacia río adentro y presentan un máximo relativo en el límite del RdP intermedio e interior (estación 1 y 2).

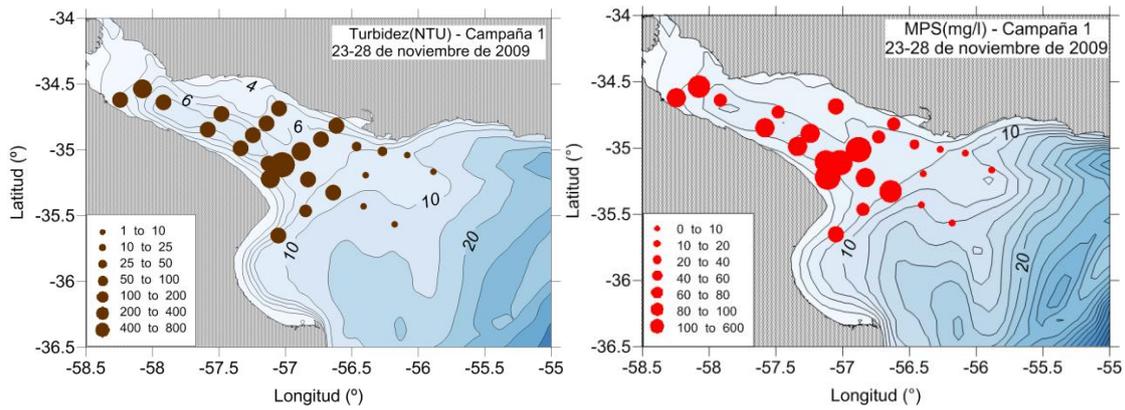


Figura 3.4.1. Turbidez (NTU) (Izquierda) y concentración de MPS (mg.l^{-1}) (derecha) de las estaciones de la Campaña 1 obtenidas a partir de mediciones realizadas en marco del Experimento FREPLATA/FFEM. El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud de la correlación.

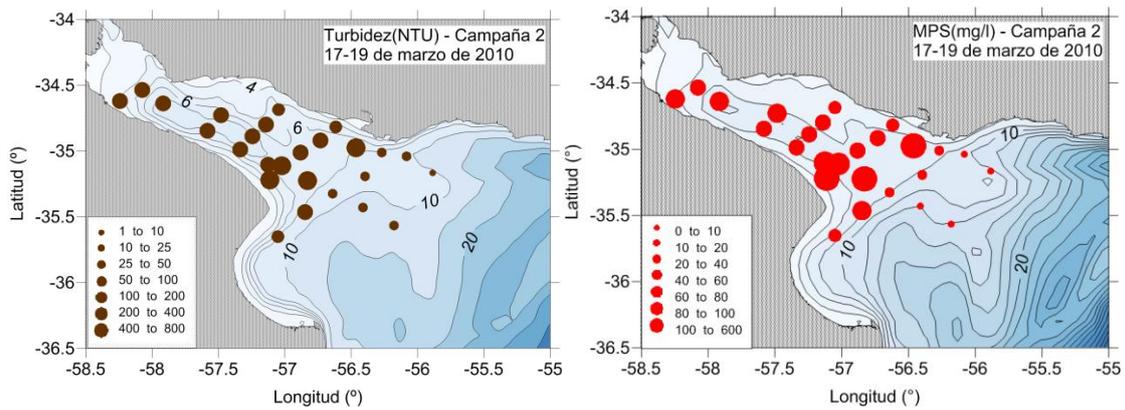


Figura 3.4.2. Turbidez (NTU) (Izquierda) y concentración de MPS (mg.l^{-1}) (derecha) de las estaciones de la Campaña 2 obtenidas a partir de mediciones realizadas en marco del Experimento FREPLATA/FFEM. El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud de la correlación.

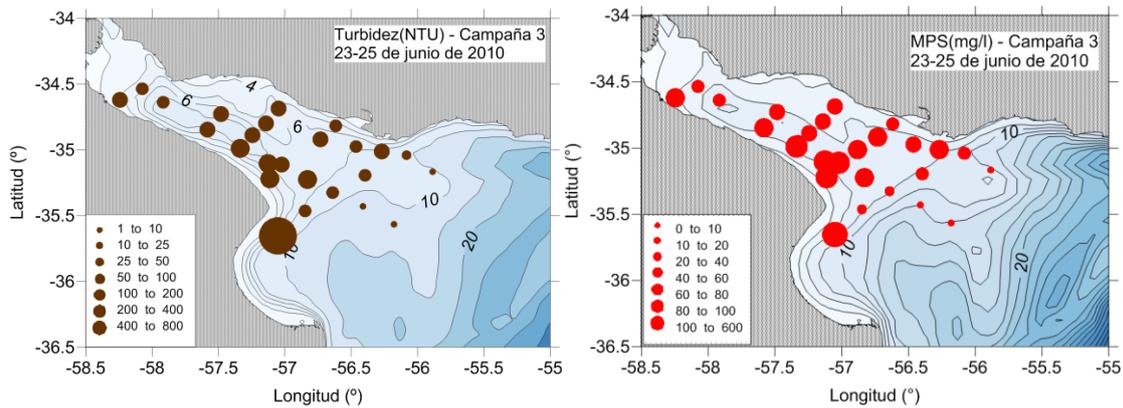


Figura 3.4.3. Turbidez (NTU) (Izquierda) y concentración de MPS (mg.l^{-1}) (derecha) de las estaciones de la Campaña 3 obtenidas a partir de mediciones realizadas en marco del Experimento FREPLATA/FFEM. El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud de la correlación.

Las Figuras 3.4.3 y 3.4.4 muestran los campos espaciales de T y concentración de MPS en el RdP para las campañas 3 y 4 respectivamente (períodos de 23-25 de junio y 23-27 de agosto de 2010), en las que se observan valores semejantes de turbidez en todo el RdP intermedio y valores mínimos hacia el RdP exterior, con excepción de la estación 20 de la Campaña 3 ubicada en el sector norte de la Bahía de Samborombón que presenta un valor de 462 NTU. El campo de concentración de MPS de la campaña 3 (Figura 3.4.3, derecha) es homogéneo en el RdP intermedio y presenta una disminución aguas abajo de la Barra del Indio. El campo de concentración de MPS para el segundo período presenta valores menores al campo promedio (Figura 3.1.3), con máximos relativos en las cercanías de Punta Piedras, que decrecen hacia la costa norte cercana a la desembocadura del río Santa Lucía y hacia mar adentro.

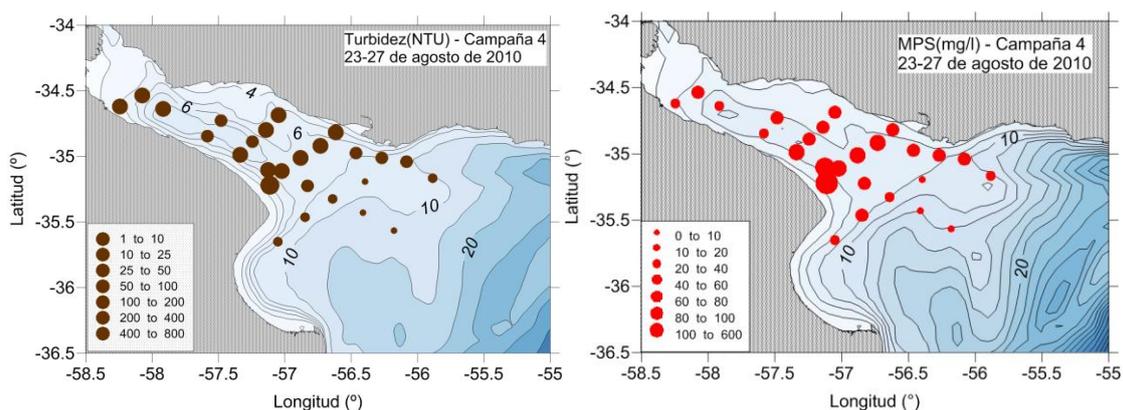


Figura 3.4.4. Turbidez (NTU) (Izquierda) y concentración de MPS (mg.l^{-1}) (derecha) de las estaciones de la Campaña 4 obtenidas a partir de mediciones realizadas en marco del Experimento FREPLATA/FFEM. El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud de la correlación.

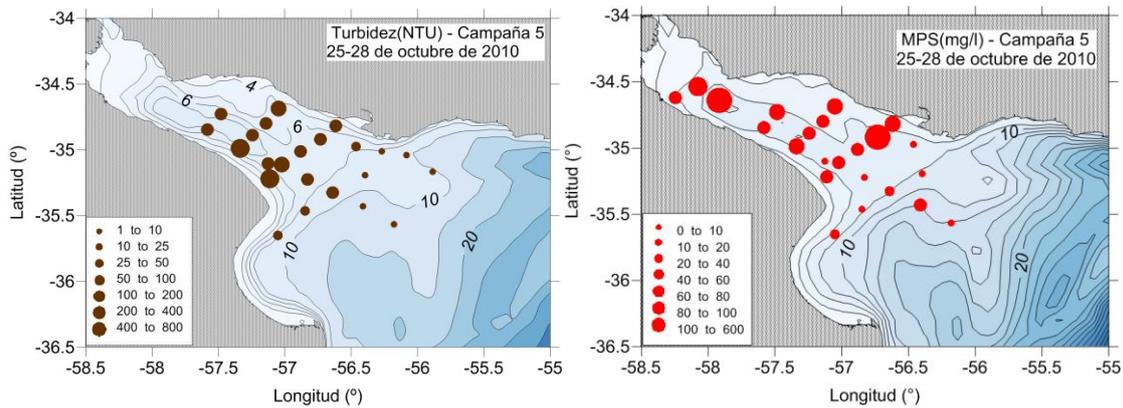


Figura 3.4.5. Turbidez (NTU) (Izquierda) y concentración de MPS (mg.l^{-1}) (derecha) de las estaciones de la Campaña 5 obtenidas a partir de mediciones realizadas en marco del Experimento FREPLATA/FFEM. El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud de la correlación.

La Figura 3.4.5 (panel derecho) muestra el campo espacial de concentración de MPS durante la Campaña 5 (período 25-28 de octubre de 2010), el cual presenta valores mínimos en la Barra del Indio y RdP exterior, excepto por la estación 11 cerca de costa uruguaya. El RdP intermedio presenta valores medios, con un máximo relativo en las cercanías de la ciudad de Colonia. El campo de T para este periodo (Figura 3.4.5, izquierda) posee valores menores a lo largo de todo el estuario medido al campo medio (Figura 3.1.1).

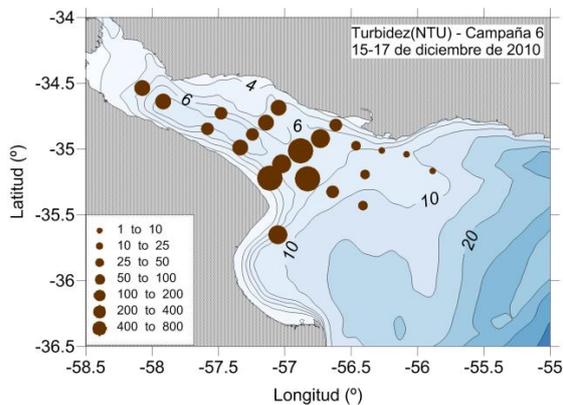


Figura 3.4.6. Turbidez (NTU) de las estaciones de la Campaña 6 obtenidas a partir de mediciones realizadas en marco del Experimento FREPLATA/FFEM. No se poseen datos de concentración de MPS para esta campaña.

Finalmente, la Figura 3.4.6 muestra la T durante la Campaña 6 (período 15-17 de diciembre de 2010), en la que se observa que las concentraciones más altas se encuentran en la región cercana a Punta Piedras hacia el centro del estuario, decrecen hacia el exterior del

mismo y hacia la costa uruguaya. Aguas arriba de la Barra del Indio el estuario presenta valores de T menores a 70 NTU.

Si la descarga del río Bermejo fuera la responsable de los patrones de T y concentración de MPS encontrados en la sección anterior, se debería observar un incremento en ambas variables luego de uno o dos meses del máximo de descarga del río Bermejo (aproximadamente entre marzo a mayo). Este aumento no se halló en el presente conjunto de datos. Esto se podría deber a que el año 2010 fue un año anómalo por ser Niño y la descarga líquida que ingresa al RdP fue mayor a la usual. Por lo tanto el material sólido podría haberse diluido y en consecuencia, la turbidez y MPS no alcanzarían los máximos típicos en el mes de marzo, como se discute en Dogliotti *et al.* (paper en revisión).

Los sedimentos sólidos presentes en el Bermejo son en su mayoría limos (Brea y Spalletti, 2010). Por lo tanto a pesar de no presentarse el máximo típico de turbidez ni de concentración de MPS, debería observarse un máximo en la concentración de limos en el RdP a partir de marzo-mayo. Esto explicaría el cambio en los patrones de granulometría asociado al modo positivo de la CP1 encontrado en el análisis de componentes principales, que posee un máximo en sedimentos tipo limos.

Las campañas 3, 4 y 5, correspondientes a los meses de junio, agosto y octubre, presentan una correlación positiva mayor a 0.7 con la CP1 positiva en la zona aguas arriba de la Barra del Indio. Sin embargo, debido a que la tasa de transporte es de dos meses aproximadamente, con los datos estudiados no se puede concluir una relación entre los patrones de granulometría del RdP y la descarga sólida del río Bermejo.

3.5 Variabilidad de la relación entre T y concentración de SPM en relación a resuspensión

La dinámica de los sedimentos es un área de estudio que todavía está en pleno desarrollo, por lo que existen preguntas sin responder en las que se está actualmente trabajando, en particular en el RdP. Una de ellas es la resuspensión de sedimentos. Se sabe que este proceso depende de varios forzantes (por ejemplo, Moreira Tesis). Entre ellos, la marea genera movimientos horizontales de los sedimentos distribuidos cerca del fondo que promueven este proceso. Además el viento juega un rol fundamental en la mezcla de la

columna de agua, a partir de la generación de oleaje que colabora a que las partículas del fondo lleguen a la superficie.

Una de las consecuencias de lo antedicho es que un incremento en la intensidad del viento podría generar un aumento en la altura de las olas promoviendo la resuspensión de sedimentos del fondo, los cuales poseen su granulometría particular. Esto afectaría a su vez al perfil granulométrico de los sedimentos en suspensión.

Con el objetivo de analizar esta hipótesis se estudió la relación entre viento, oleaje y turbidez con datos de intensidad de viento medido en la Boya Oceanográfica y alturas de ola y turbidez medidos en Torre Oyarvide (Figura 2.1.1) para el periodo 26 de octubre de 2010 al 17 de diciembre del 2010 (Figura 3.5.1, superior y centro). A pesar de presentar una gran dispersión de datos la relación entre viento y oleaje, al inspeccionar el gráfico (Figura 3.5.2) se pueden observar un comportamiento cuadrático $\text{Altura de Ola} = 0,0035 * (\text{Velocidad del Viento})^2 - 0,0093 * (\text{Velocidad del Viento}) + 0,22$, con un coeficiente de correlación $R = 0,762$ que es significativamente distinto que cero con un 95% de confiabilidad.

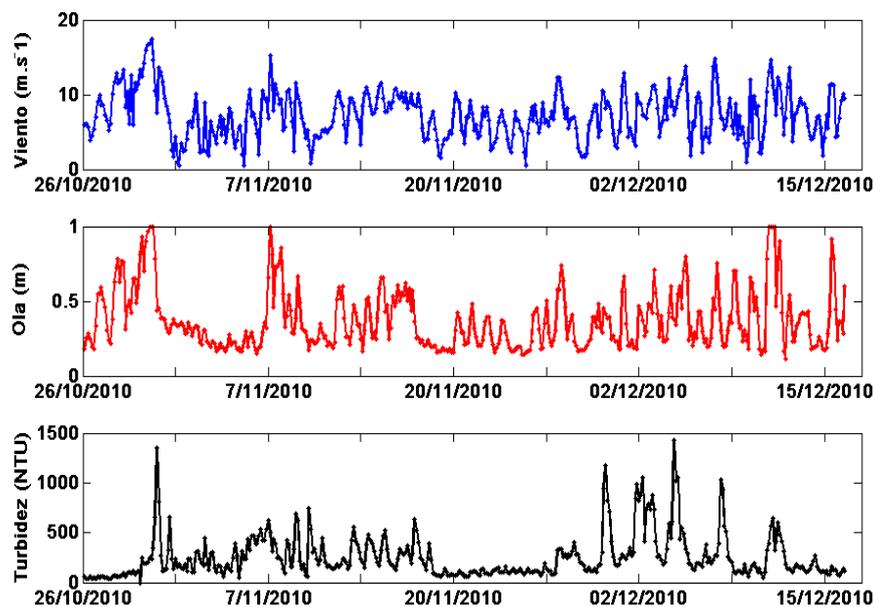


Figura 3.5.1. Series temporales de Intensidad de viento (m.s^{-1}) (superior) medida en la Boya Oceanográfica, altura de ola (m) (centro) y turbidez (NTU) (inferior) medidos en Torre Oyarvide para el periodo 26 de octubre de 2010 al 17 de diciembre del 2010.

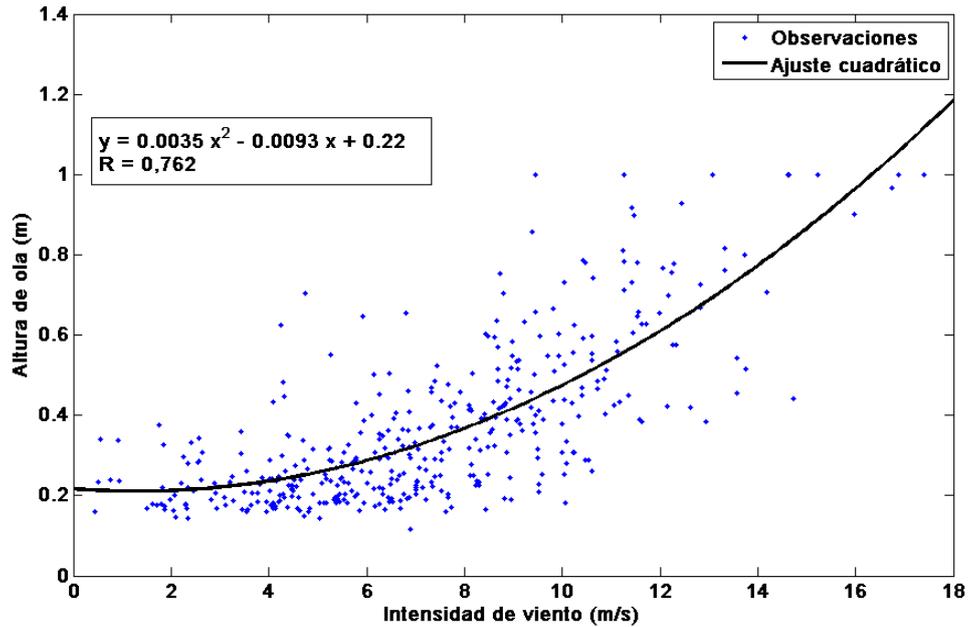


Figura 3.5.2. Relación entre la altura de ola (m) y la intensidad de viento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) con datos medidos en Torre Oyarvide y la Boya oceanográfica durante el periodo 26/10/10-17/12/10 y ajuste cuadrático en negro.

La relación entre la altura de ola y la intensidad de viento expone un comportamiento cuadrático. Para valores de viento altos (aproximadamente mayores a $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) el oleaje posee una respuesta considerable. Para valores menores (aproximadamente menores a $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) la respuesta del oleaje es considerablemente menor.

Considerando el comportamiento del oleaje en función de la intensidad del viento se estudió la relación de la turbidez con estas variables para vientos mayores a $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La Figura 3.5.3 muestra la gran variabilidad que presentan las variables y no se observa una relación clara. Posteriormente se desfasó la serie de turbidez respecto de las series de viento y oleaje, obteniendo que las máximas correlaciones se encuentran a las 6 hs respecto del oleaje ($R = 0,151$) y 9 hs respecto del viento ($R = 0,227$) (Figura 3.5.4). Ambas correlaciones son significativamente diferentes a cero.

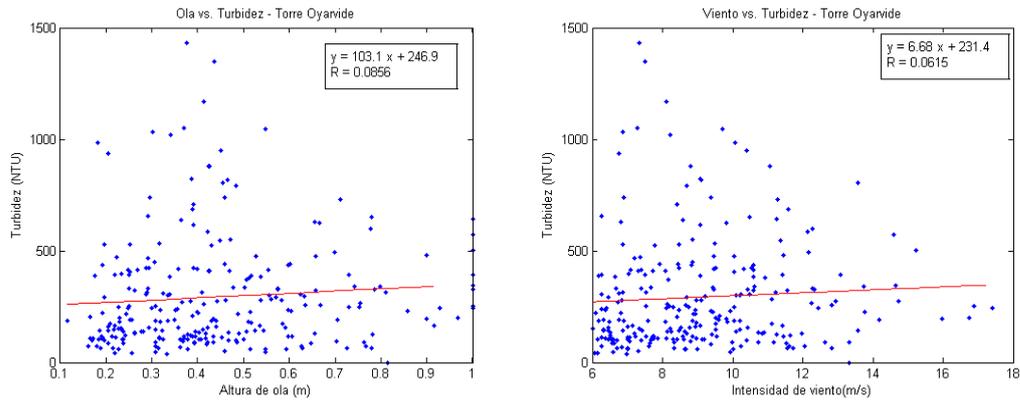


Figura 3.5.3. Relación entre altura de ola (m) y turbidez (NTU) (izquierda) y altura de ola (m) e intensidad de viento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (derecha) para mediciones con viento mayor a $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ con datos medidos en la Boya Oceanográfica y la Torre Oyarvide durante el periodo 26/10/10-17/12/10 y tendencias lineales en rojo.

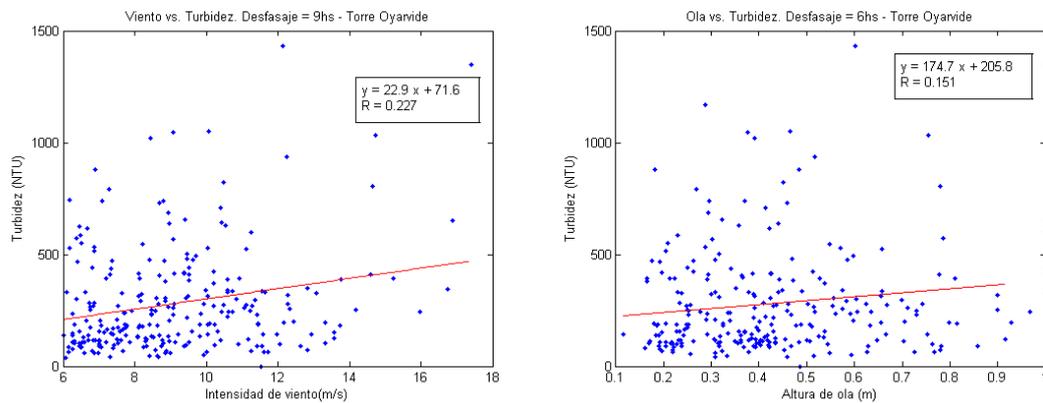


Figura 3.5.4. Relación entre intensidad de viento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) y turbidez (NTU) desfasados 9 horas (izquierda) y altura de ola (m) y turbidez (NTU) desfasados 6 horas (derecha) para mediciones con viento mayor a $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ con datos medidos en la Boya Oceanográfica y la Torre Oyarvide durante el periodo 26/10/10 - 17/12/10 y tendencias lineales en rojo.

3.5.1 Análisis Wavelet Morlet

Para evaluar las características espectrales y su variabilidad durante el período de muestreo de las series temporales de intensidad de viento, altura de ola y turbidez analizadas en la sección anterior, se realizó un análisis Wavelet Morlet. El método está realizado con las variables normalizadas por lo que la barra de colores de la figura no tiene unidades. La sección sombreada de las figuras de espectro local wavelet muestra el cono de influencia. Por lo que

sólo los resultados en la parte inferior del mismo presentan efectos de borde y los de la parte superior son válidos y serán analizados. Los contornos negros muestran las regiones que poseen una confiabilidad mayor al 95%.

El espectro global wavelet de la intensidad del viento (Figura 3.5.5, derecha) muestra la presencia de una señal en una banda de período centrada en los 8,5 días (200 horas aproximadamente) y dos máximos relativos, el primero en una banda centrada en los 4,5 días (100 horas aproximadamente) y el segundo, con menor varianza, en una banda centrada en 1 día aproximadamente. Las tres señales son significativamente distintas al ruido blanco con un 95% de confiabilidad. El máximo asociado al mayor período (21 días aproximadamente) no se analiza ya que se encuentra por debajo del cono de influencia. Al observar el espectro local wavelet (Figura 3.5.5, izquierda) se nota la presencia de periodicidades en una banda centrada en 8,5 días significativamente diferente a cero con 95% de confiabilidad durante casi la totalidad de la serie en la parte superior del cono de influencia. Las periodicidades con períodos aproximado de 4.5 días presentan mayor variabilidad temporal. Mientras que la señal con período aproximado de 1 día se muestra con mayor alternancia.

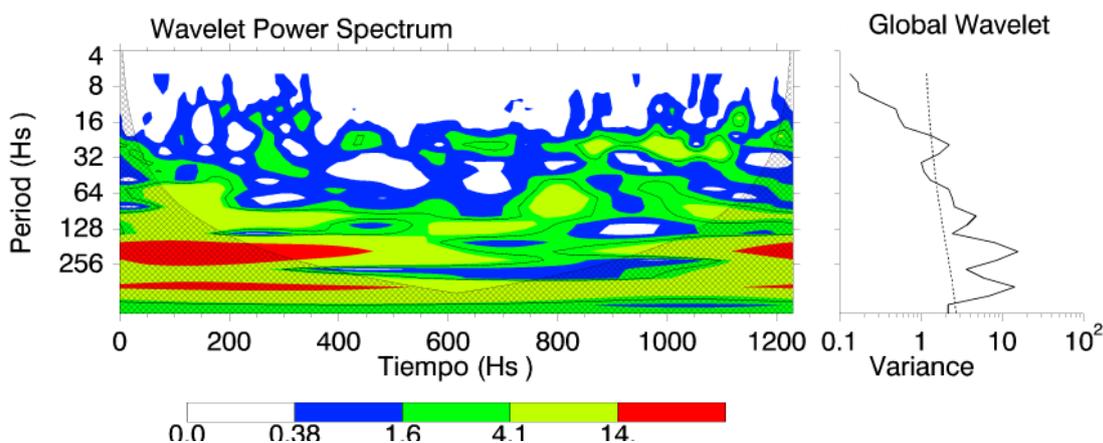


Figura 3.5.5. Izquierda: Espectro wavelet local de la intensidad del viento normalizada. Los contornos negros marcan el nivel de significancia del 5%, contrastando con ruido blanco. La zona sombreada señala el cono de influencia. Derecha: Espectro global wavelet en línea sólida. Nivel de significancia del 5% comparado con ruido blanco en línea punteada. (<http://ion.exelisvis.com/>)

El espectro global wavelet de la altura de ola (Figura 3.5.6, derecha) muestra la presencia de las tres señales que se observaron en la intensidad del viento. Además se observa un máximo relativo en una banda de períodos alrededor de 2.5 días (60 horas aproximadamente). Las cuatro señales son significativamente distintas al ruido blanco con un 95% de confiabilidad. Al observar el espectro local wavelet (Figura 3.5.6, izquierda) se notan las presencias de las periodicidades en 8,5 días y 4,5 días significativamente diferente a cero

con 95% de confiabilidad durante una gran parte de la serie en la parte superior del cono de influencia. Mientras que las periodicidades en 2 días y 1 día poseen mayor variabilidad temporal.

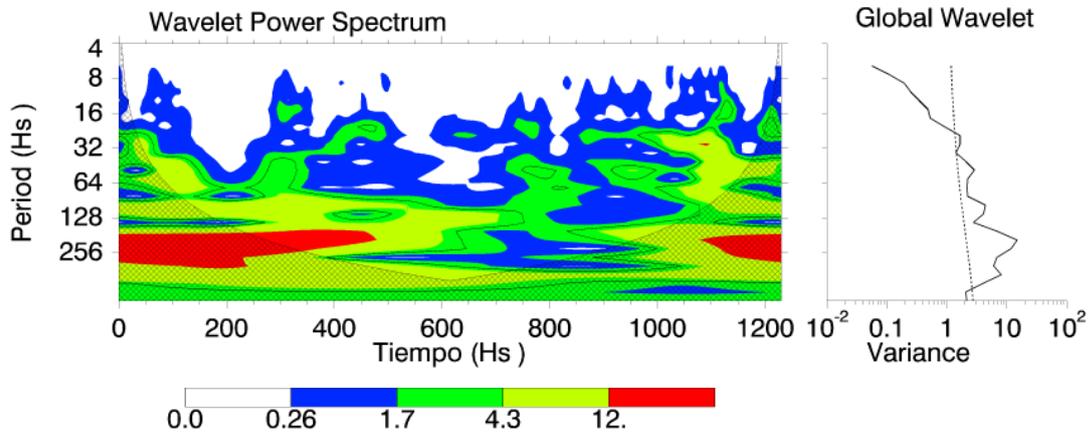


Figura 3.5.6. Izquierda: Espectro wavelet local la altura de ola normalizada. Los contornos negros marcan el nivel de significancia del 5%, contrastando con ruido blanco. La zona sombreada señala el cono de influencia. Derecha: Espectro global wavelet en línea sólida. Nivel de significancia del 5% comparado con ruido blanco en línea punteada. (<http://ion.exelisvis.com/>)

Espectro wavelet local de la turbidez (Figura 3.5.7, derecha) muestra la presencia de la señal en la banda de períodos centrada en 8,5 días que se observó en la intensidad del viento y altura de ola. Además se observa un máximo en una banda de período alrededor de 2,5 días aproximadamente. Las dos señales son significativamente distintas al ruido blanco con un 95% de confiabilidad. También se percibe un pico (marginamente) significativamente distinto al ruido blanco en la banda de período de 1 día. Al observar el espectro wavelet local (Figura 3.5.7, izquierda) se nota la presencia de las periodicidades en 8,5 días significativamente diferente a cero con 95% de confiabilidad durante una gran parte de la serie en la parte superior del cono de influencia. Mientras que la de 2,5 días posee mayor variabilidad temporal.

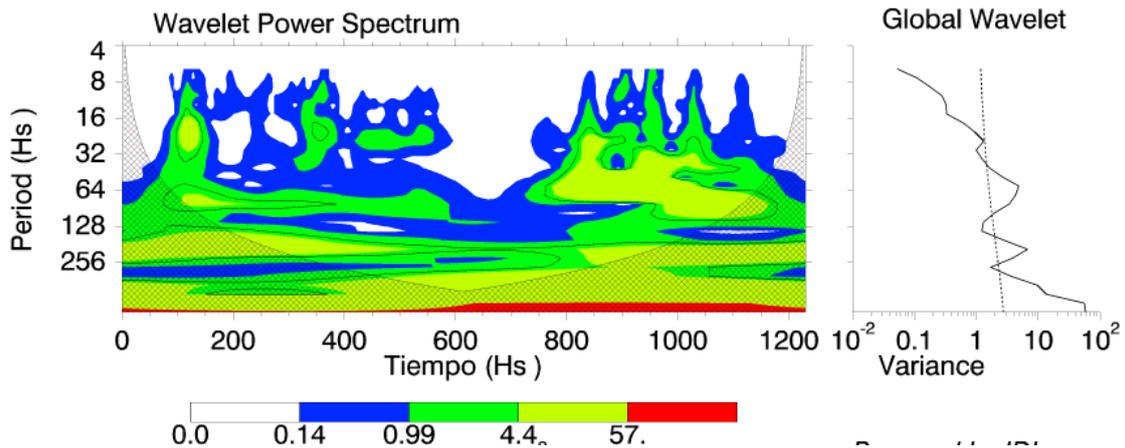


Figura 3.5.7. Izquierda: Espectro wavelet local de turbidez normalizada. Los contornos negros marcan el nivel de significancia del 5%, contrastando con ruido blanco. La zona sombreada señala el cono de influencia. Derecha: Espectro global wavelet en línea sólida. Nivel de significancia del 5% comparado con ruido blanco en línea punteada. (<http://ion.exelisvis.com/>)

3.5.2 Filtrado de series

A partir del análisis de wavelet se pueden destacar tres periodicidades asociadas a bandas de períodos alrededor de 8,5 días, 4,5 días y 1 día con máximos de varianza total. Por un lado se utilizó un filtro pasa bajo con período de corte en 3 días para estudiar las señales asociadas a los períodos mayores a ese período. Por otro lado se utilizó un filtro pasa alto con un período de corte en 1,5 días para estudiar señales con períodos menores. En las figuras 3.5.8, 3.5.9 y 3.5.10 se observan las series originales de intensidad de viento, altura de ola y turbidez (línea azul) y las filtradas (líneas roja y negra). La línea negra muestra la serie con un filtro que deja pasar aquellas señales con períodos menores a 1,5 días. La línea roja muestra la serie con un filtro que deja pasar las señales con períodos mayores a 3 días.

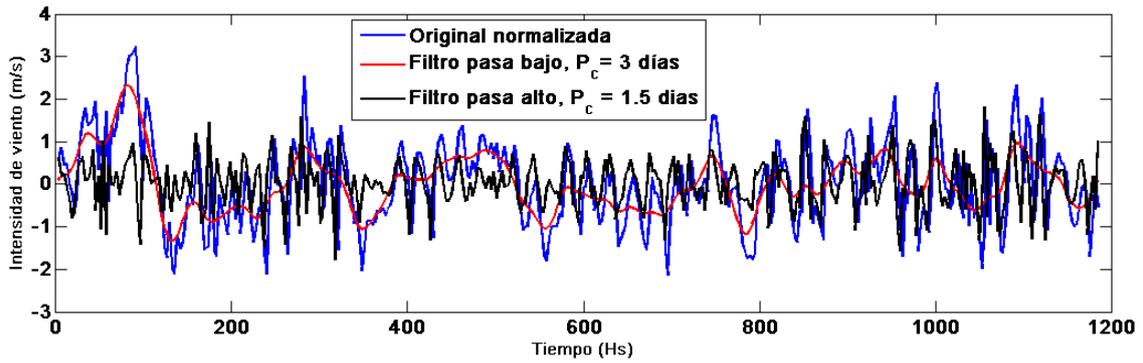


Figura 3.5.8. Serie temporal normalizada de intensidad de viento ($m \cdot s^{-1}$) (azul), misma serie con un filtro pasa bajo con período de corte en 3 días (rojo) y con un filtro pasa alto con período de corte en 1.5 días (negro). Datos medidos en la Boya oceanográfica durante el periodo 26 de octubre de 2010 al 17 de diciembre del 2010.

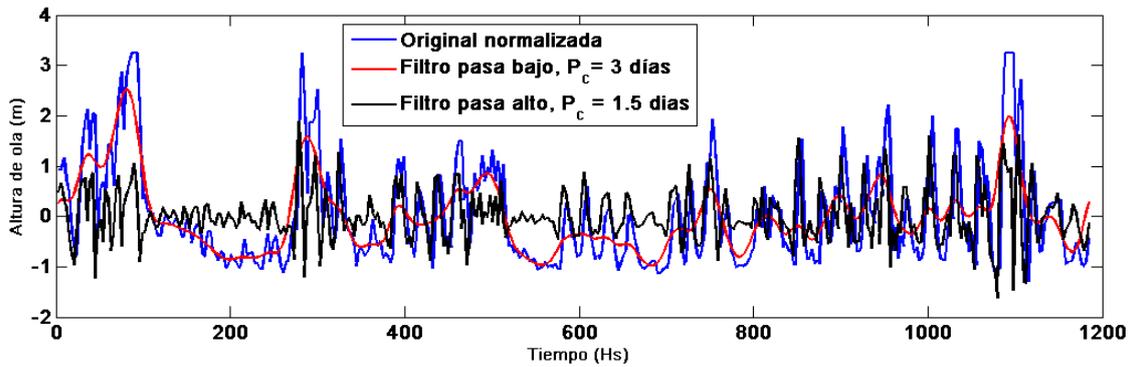


Figura 3.5.9. Serie temporal normalizada de altura de ola (m) (azul), misma serie con un filtro pasa bajo con período de corte en 3 días (rojo) y con un filtro pasa alto con período de corte en 1.5 días (negro). Datos medidos en Torre Oyarvide durante el periodo 26 de octubre de 2010 al 17 de diciembre del 2010.

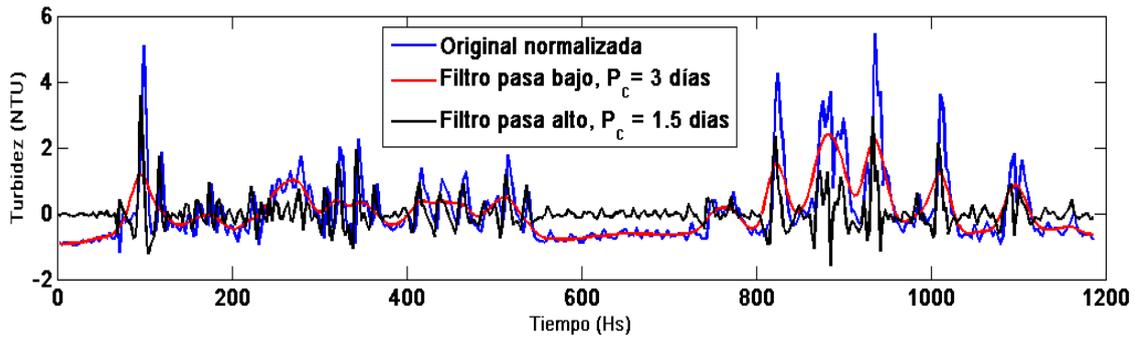


Figura 3.5.10. Serie temporal normalizada de Turbidez (NTU) (azul), misma serie con un filtro pasa bajo con período de corte en 3 días (rojo) y con un filtro pasa alto con período de corte en 1.5 días (negro). Datos medidos en Torre Oyarvide durante el periodo 26 de octubre de 2010 al 17 de diciembre del 2010.

Una forma común de estudiar una serie temporal en el espacio espectral es por medio de la utilización de un análisis de Fourier. Este análisis permite separar a la señal original en la suma de componentes oscilatorias, asociadas a diferentes frecuencias o períodos, independientes entre sí. El estudio de la varianza explicada por cada componente se realiza por medio de la densidad espectral, la cual indica la distribución de varianza (o energía) sobre los diferentes períodos. Un estimador de la densidad espectral es el periodograma.

Los periodogramas de la intensidad de viento, altura de ola y turbidez filtradas con un pasa bajo se muestran en la Figura 3.5.11. En las tres series se observa un pico en la banda centrada en el período de 8,5 días aproximadamente (200 hs), el cual se encontró en el análisis wavelet previamente realizado. Además se ven picos de menor intensidad en los períodos cercanos a 4,5 días (100 Hs) en la señal de turbidez y en períodos superiores en las señales de viento y ola. El periodograma de turbidez, además, muestra un máximo en períodos cercanos a 25 días (600 Hs).

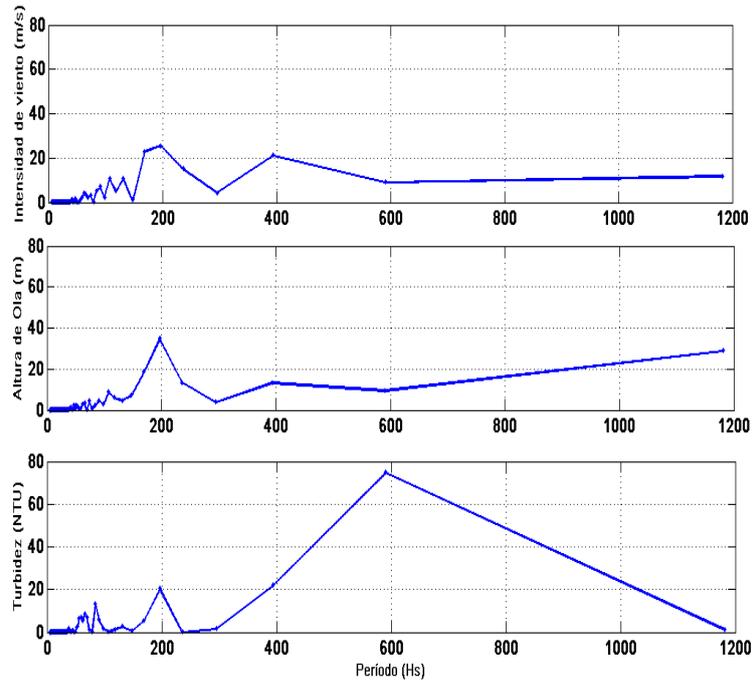


Figura 3.5.11. Periodograma de las series temporales normalizadas y filtradas con un pasa bajo (período de corte de 3 días) de Intensidad de viento ($m.s^{-1}$) (superior), Altura de ola (m) (central) y Turbidez (NTU) (inferior). Datos medidos en la Boya Oceanográfica y Torre Oyarvide durante el periodo 26 de octubre de 2010 al 17 de diciembre del 2010.

Los periodogramas de la intensidad de viento, altura de ola y turbidez filtradas con un pasa alto se muestran en la Figura 3.5.12. En los periodogramas asociados a las dos primeras variables se observa un pico en la banda de período alrededor de 24 Hs. Si bien en la turbidez este pico no está presente con la misma intensidad, se observa un aumento relativo en la amplitud. Además en este último periodograma se observa un pico en la banda de período de banda alrededor de 18 Hs y un máximo relativo en 12.5 Hs aproximadamente.

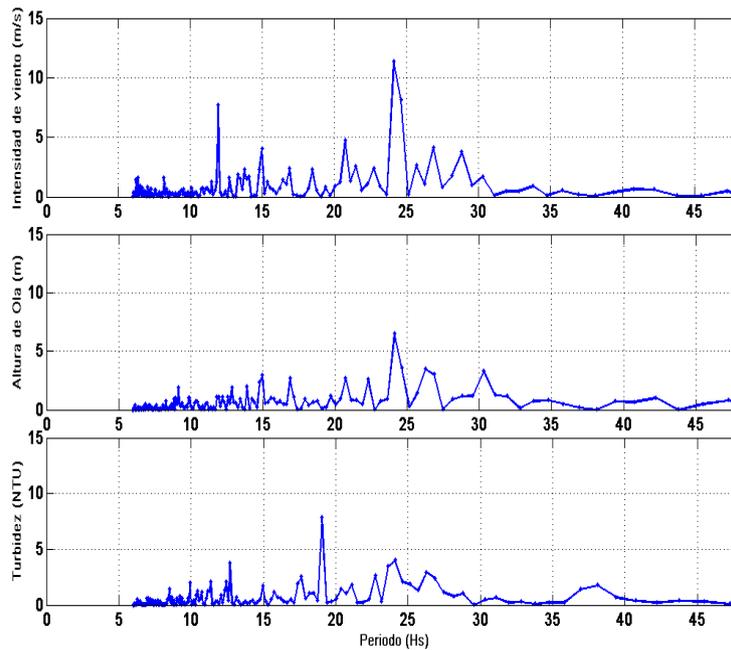


Figura 3.5.12. Periodograma de las series temporales normalizadas y filtradas con un pasa alto (período de corte de 1.5 días) de Intensidad de viento ($m.s^{-1}$) (superior), Altura de ola (m) (central) y Turbidez (NTU) (inferior). Datos medidos en la Boya Oceanográfica y Torre Oyarvide durante el periodo 26 de octubre de 2010 al 17 de diciembre del 2010.

3.5.3 Análisis espectral cruzado

Con el objetivo de estudiar la existencia de periodicidades comunes en determinadas bandas entre pares de series temporales se implementó un análisis espectral cruzado. Los parámetros obtenidos de este análisis son: amplitud cruzada que puede ser interpretada como la covarianza entre los períodos particulares de las dos series temporales; coherencia cuadrada (C^2) que se puede interpretar como un coeficiente de correlación en el campo de las frecuencias y nos va a brindar información de la significancia de la misma.

Por un lado se realizó el análisis espectral cruzado para las series filtradas para conservar períodos mayores a 3 días. La amplitud cruzada entre las series temporales filtradas de intensidad de viento y altura de ola se muestra en la Figura 3.5.13. Se observa una gran acumulación de energía para ciclos con períodos cercanos a 8.5 días, con C^2 de 0,94. Además se destaca un pico menor en 4.5 días, con C^2 de 0,95. Por otra parte se visualiza una gran cantidad de energía en los ciclos de períodos más altos, con un C^2 de 0,89 en períodos

cercanos a 25 días (600 horas). Para determinar la significancia de estos ciclos se usa el coeficiente de coherencia cuadrada y el test planteado por Goodman. Tanto las periodicidades alrededor de 8,5 días y 4,5 días como el de 25 días resultan significativos con un 95% de confianza para estas series filtradas.

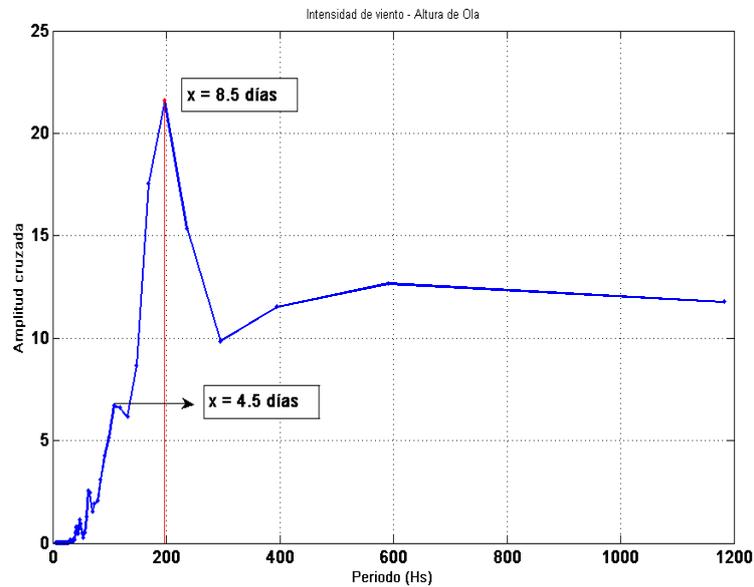


Figura 3.5.13. Amplitud cruzada entre las series temporales de Intensidad de viento y altura de ola con un filtro pasa bajo cuyo periodo de corte es igual a 3 días. Producto obtenido por medio del software Statistica.

La Figura 3.5.14 muestra la amplitud cruzada entre las series temporales con filtro pasa baja frecuencia de altura de ola y turbidez. Al igual que en el análisis anterior se observa una gran acumulación de energía para ciclos con períodos cercanos a 8,5 días, con C^2 de 0,76. Además se destaca una banda de períodos centrada en 3,25 días como un máximo relativo, con C^2 de 0,18. Asimismo se visualiza una gran cantidad de energía en las periodicidades con períodos más altos al igual que en el caso previo pero con C^2 de 0,13. En cuanto a la significancia de estas señales, ninguna logra superar el umbral y ser significativa al 90%. Si resulta significativa la periodicidad en la banda de 8,5 días a un nivel de confianza del 80%.

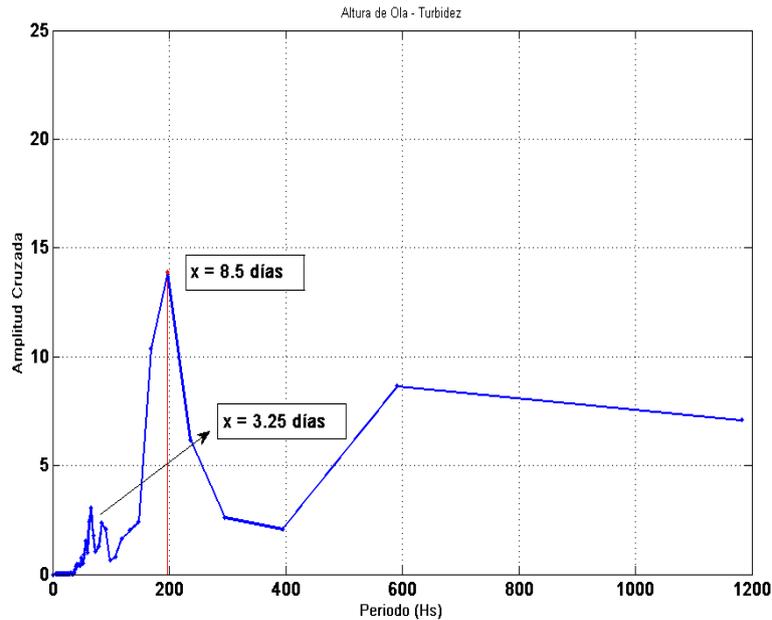


Figura 3.5.14. Amplitud cruzada entre las series temporales de Altura de ola y turbidez con un filtro pasa baja frecuencia cuyo periodo de corte es igual a 3 días. Producto obtenido por medio del software Statistica.

Por otro lado se realizó el análisis espectral cruzado para las series filtradas con el pasa alta frecuencia. La amplitud cruzada entre la intensidad de viento y la altura de ola se muestra en la Figura 3.5.15. Se observa una gran acumulación de energía para ciclos con períodos cercanos a 24 horas y 26 horas, con C^2 de 0,93 y 0,81 respectivamente. Además se destacan picos menores en 12 horas, 15 horas y 21 horas aproximadamente, con C^2 de 0,72, 0,96 y 0,77 respectivamente. Para determinar la significancia de estos ciclos se usa el coeficiente de coherencia cuadrada y el test planteado por Goodman. Sólo las ondas con períodos cercanos a 24 horas y 15 horas resultan significativas con un 95% de confianza dentro de las ondas cortas. Los otros ciclos, en cambio, no logran superar el umbral de 0,83 y ser significativos. Las periodicidades alrededor de 26 horas, 21 horas y 12 horas, en cambio, resultan ser significativas con un nivel de confianza del 80%.

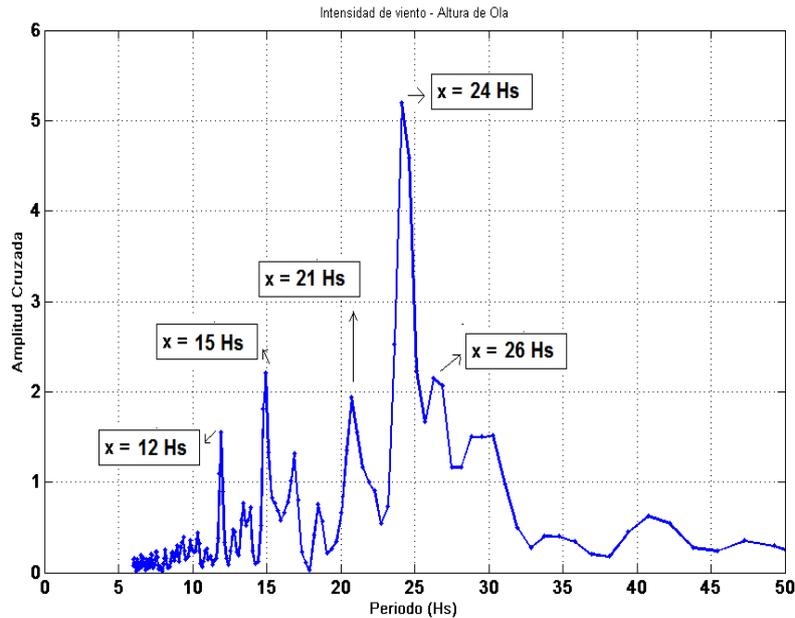


Figura 3.5.15. Amplitud cruzada entre las series temporales de Intensidad de viento y altura de ola con un filtro pasa alta frecuencia cuyo periodo de corte es igual a 1.5 días. Producto obtenido por medio del software Statistica.

La Figura 3.5.16 muestra la amplitud cruzada entre las series temporales de altura de ola y turbidez con un filtro pasa alto. En términos generales se percibe menor energía que en el caso previo. A su vez se observa una gran acumulación de energía para ciclos con períodos cercanos a 24 horas y 26 horas aproximadamente, con C^2 de 0,14 y 0,76 respectivamente. Además se destacan máximos relativos en las bandas de períodos centradas en 12,5 horas y 15 horas con energía relativamente alta con C^2 de 0,38 y 0,91 respectivamente. Para determinar la significancia de estas periodicidades se usa el coeficiente de coherencia cuadrada y el test planteado por Goodman. La única periodicidad que supera el umbral de 0,83 para ser significativa con un 95% de confianza dentro de las ondas cortas es la asociada a períodos cercanos a 15 horas. La periodicidad alrededor de 26 horas, en cambio, resulta significativa con un nivel de confianza del 80%.

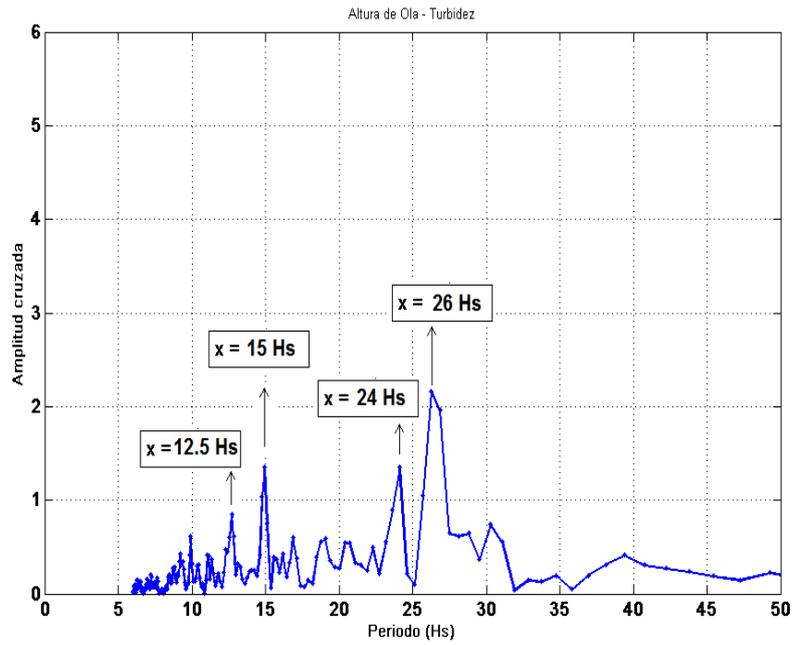


Figura 3.5.16. Amplitud cruzada entre las series temporales de Altura de ola y turbidez con un filtro pasa alta frecuencia cuyo periodo de corte es igual a 1.5 días. Producto obtenido por medio del software Statistica.

4 **Discusión y Conclusiones**

En este trabajo se estudió la turbidez, concentración de sedimentos en suspensión y granulometría de los mismos en las aguas superficiales del estuario del RdP. Este análisis se realizó para un conjunto de datos del RdP obtenidos entre 2009 y 2010 en marco del Experimento FREPLATA/FFEM. Tanto la T superficial como la concentración de MPS muestran que las aguas al norte de la Bahía Samborombón presentan mayor cantidad de material sólido en suspensión, lo que incrementa la turbidez de la zona. En cambio, las aguas cercanas a océano abierto se destacan por valores bajos de T y MPS. A partir del conjunto de datos disponible se mostró que el RdP posee sedimentos en suspensión del tipo limo mayormente, lo cual concuerda con Brea y Spalleti (2010). El perfil medio de este conjunto de curvas granulométricas posee un $d_{50} = 9,85 \mu\text{m}$ con mayor cantidad en sedimentos finos y poca en sedimentos gruesos.

Las muestras granulométricas utilizadas en este trabajo mostraron que el estuario presenta variaciones menores en la concentración de sedimentos finos (limo fino y arcilla) y sedimentos intermedios (limo medio y grueso) respecto del perfil granulométrico medio observado. Se regionalizó espacial y temporalmente al estuario según su granulometría. Esta partición se realizó a partir de los resultados de un análisis de componentes principales, hallándose dos comportamientos característicos. El primero, corresponde a las campañas de junio, agosto y octubre de 2010. Presenta una zona aguas arriba de la Barra del Indio con una anomalía positiva de sedimentos del tipo limo medio y grueso respecto al perfil medio, y una zona aguas abajo de la Barra del Indio con una anomalía positiva de sedimentos del tipo arcilla y limo fino. El segundo, correspondiente a las campañas de noviembre de 2009, marzo y diciembre de 2010, muestra un predominio de anomalías positivas de sedimentos del tipo arcilla y limo fino en todo el estuario.

La relación entre la T y la concentración de MPS presenta una dependencia con la distribución del tamaño de partículas. En particular, Moreira *et al.* (2013) estudiaron esta relación en el RdP y atribuyeron parte de la dispersión de la relación a la variabilidad en la granulometría de los sedimentos. Las variaciones en los tamaños de sedimentos encontradas en el conjunto de datos disponible son pequeñas respecto a la curva media granulométrica. En efecto, de los 114 perfiles granulométricos iniciales, el 37% de ellos posee un perfil semejante a la media observada y sólo el 63% restante presenta variaciones suficientes para analizar la dependencia de la relación de T y MPS con la granulometría. A partir de esta diferenciación se

encontró una distinción entre las relaciones de T y MPS de ambos grupos con un 85% de confiabilidad. Debido a la baja diferenciación entre los tamaños de sedimentos es de esperar que la diferencia entre las relaciones entre T y MPS para ambos grupos no sea rotunda. Sin embargo este resultado lleva a pensar que la pendiente presenta una dependencia con el tamaño de los sedimentos.

Con el objetivo de analizar hipótesis acerca de los procesos que determinan la distribución granulométrica observada se estudió la influencia de la descarga del río Bermejo, principal aportante de material sólido en suspensión a la cuenca del Plata. Este río presenta un ciclo estacional de la concentración de sedimentos en suspensión muy marcado con un máximo en febrero-marzo (Dogliotti *et al.*, 2016). Como se mencionó previamente, según Simionato *et al.*, 2009 y Moreira *et al.*, 2013, el máximo tardaría de uno a dos meses en llegar al RdP, por lo que la concentración de MPS y T en el estuario debería aumentar en marzo-mayo aproximadamente.

En el conjunto de datos disponible no se observó un incremento en la T y la concentración de MPS en el período esperado (marzo-mayo). Esto se podría deber, por un lado a la falta de resolución temporal de las campañas que imposibilita la visualización del estado del RdP durante los meses de abril y mayo, durante los cuales se podría haber producido el máximo de T y MPS. Por otro lado se podría deber al incremento en la descarga líquida que ingresa en el RdP que implica un año Niño como 2010 que fue el año estudiado. En consecuencia el material sólido podría haberse diluido y los campos de T y concentración de MPS no mostrarían el máximo esperado (Dogliotti *et al.* 2016).

Bajo la hipótesis que la dilución de los sedimentos en suspensión no afectaría la granulometría de los mismos, el máximo en material sólido del río Bermejo, principalmente limos (Brea y Spalletti, 2010), debería resultar en un incremento en el porcentaje de limos en marzo-mayo en el RdP, el cual explicaría los patrones granulométricos encontrados para la CP1 en su fase positiva. Sin embargo, con el conjunto de datos disponibles no se puede determinar esta relación ya que la resolución temporal no permite estudiar los meses de abril y mayo. Para poder evaluar esta hipótesis se debería contar con datos con mayor resolución temporal, en especial en el estuario superior. De esta forma se podría analizar la evolución temporal de los campos espaciales de correlaciones. Esto permitiría estudiar si el RdP presenta una máxima correlación con la CP1 positiva, asociada a limos, dos meses (aproximadamente) posteriores al máximo de concentración de MPS en el Río Bermejo.

Con el objetivo de analizar hipótesis acerca de los procesos que determinan la distribución granulométrica observada se estudió la posibilidad de resuspensión de sedimentos a través de las variables intensidad de viento, altura de ola y turbidez medidas en la boya oceanográfica y la Torre Oyarvide en el período del 26 de octubre de 2010 al 17 de diciembre del 2010, para los que había observaciones disponibles. Se observó una relación cuadrática entre las dos primeras variables, donde el oleaje posee una respuesta considerable para valores de viento mayores a 6 m s^{-1} , mientras que para valores menores a 6 m s^{-1} la respuesta es mucho menor.

Luego se analizaron los espectros de las series temporales de Intensidad del viento medida en la boya oceanográfica, altura de ola y turbidez por medio de la metodología Wavelet Morlet. A partir del mismo se observó una periodicidad con períodos cercanos a 8,5 días en la tres series y un ciclo con período cercano a 4,5 días en las dos primeras. Estas periodicidades están presentes durante gran parte del período muestral. Asimismo se notó la presencia de una onda con período de un día aproximadamente con gran variabilidad temporal en las tres señales. Al centrarse en la varianza global se ve que esta periodicidad es significativa en el caso del viento y el oleaje, mientras que en el caso de la turbidez es marginalmente significativa. Por otro lado se percibió una onda con período cercano a 2,5 días con gran variabilidad temporal en las señales de turbidez y altura de ola.

Para pulir este análisis, se filtraron las series temporales de intensidad de viento, altura de ola y turbidez utilizando un filtro pasa bajas frecuencias y uno pasa altas frecuencias. De este modo se estudiaron las ondas largas, períodos mayores a 3 días, y cortas, períodos menores a 1,5 días, por separado. Se analizaron los periodogramas correspondientes a las series filtradas, donde se observó que en la banda de períodos alrededor de 8,5 días se concentra la mayor energía para las series de ondas largas y de 24 horas para ondas cortas.

Posteriormente con el objetivo de estudiar la covariabilidad en períodos particulares entre pares de series temporales filtradas se implementó un análisis espectral cruzado. Por un lado se analizó la variabilidad de baja frecuencia de las series. En base al conjunto de datos disponible se concluye que existirían dos señales de escala sinóptica (8,5 y 4,5 días) y una de 25 días aproximadamente (escala intraestacional) en la serie de intensidad de viento, que estarían asociadas a una gran energía en la altura de ola. Las periodicidades en la banda interestacional han sido estudiadas tanto en el viento por Nogues Paegle y Mo (1997) como en las corrientes en el RdP por Simionato et al. (2006). La señal de escala sinóptica en el oleaje se ve reflejada (con menor nivel de confianza) estadísticamente en la turbidez.

Por otro lado se analizó el grado de correlación entre diferentes periodicidades presentes entre pares de la variabilidad de alta frecuencia de las series de viento, oleaje y turbidez por medio de un análisis espectral cruzado. En base al conjunto de datos disponible se infiere que existiría una señal con un período cercano a 24 horas en el viento que estaría asociada a una gran energía en la altura de ola. Este ciclo estaría relacionado con el fenómeno de la brisa (Berri et al., 1993) que se sabe impacta a las corrientes en el estuario (Simionato *et al.*, 2005). Además se notó un ciclo con período cercano a 15 horas que posee gran energía tanto en el viento como en el oleaje, y a su vez tanto en oleaje como en turbidez. Si bien esta componente no explica gran varianza, muestra un máximo relativo en los periodogramas de las tres series y es la única onda que presenta energía significativa en las tres señales con un nivel de significancia del 95%. Se observaron periodicidades con significancia al 80% alrededor de 21 horas en el viento y oleaje que podrían estar asociadas a la frecuencia inercial (Simionato et al., 2005).

Se sabe y se conoce el fenómeno en escala sinóptica asociado a tormentas y estas señales no poseen un período exacto. Esta pseudoperiodicidad puede que lo lleve a perder confiabilidad y el método no logre captarlas. Así como también el fenómeno de la brisa fue estudiado en el RdP (Berri et al, 1993) y se analizó su relación con la turbidez. Moreira et al., 2013 analizaron las variables viento, oleaje y turbidez en el RdP con un método adaptativo a pseudoperiodicidades y mostraron la relación entre ellas, observando la escala sinóptica y los fenómenos de marea y brisa. En efecto, se observa una necesidad de un método adaptativo a pseudoperiodicidades.

Una posible línea de acción para mejorar el algoritmo de estimación de la concentración de MPS a partir de observaciones satelitales en el RdP es la caracterización espacial y temporal con gran resolución de la granulometría en el estuario. Si las diferencias encontradas en los tamaños de sedimentos no son lo suficientemente marcadas, se podría utilizar una relación única en todo el RdP. Mientras que si estas diferencias son significativas, se podría regionalizar el estuario y establecer relaciones particulares según la granulometría con mayor robustez.

Bibliografía

Berri, G. J., and M. N. Nuñez (1993), Transformed shoreline-following horizontal coordinates in a mesoscale model: A sea-land-breeze case study, *J. Appl. Meteorol.*, 32(5), 918 – 928.

Boschi, E. E. (1988). El ecosistema estuarial del Río de la Plata. In *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México* (Vol. 15, pp. 159-182).

Brea, J. D. y Spalletti, P. D., 2010. Generación y transporte de sedimentos en la Cuenca Binacional del Río Bermejo.

Clara Tejedor, M. L., 2013. Cambios en la propagación de la onda de marea en la Plataforma Continental y el Río de la Plata, asociados a cambios en el nivel medio del mar y los ciclos de la descarga continental.

Cousseau, M. B., y Cousseau, M. B. (1985). *Los peces del Río de la Plata y de su frente marítimo* (No. DOC 0006).

Dean, R.G. y Dalrymple, R.A., 2001. *Processes with Engineering Applications*.

Devore, J. L., 2008. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Quinta Edición

Departamento de Armas de Mississippi, 1984. *Shore Protection Manual Volume 1*.

Depetris P. J y, Griffins, J.J., 1968. Suspended load in the Río de la Plata drainage basin. *Sedimentology*, 11, 53-60.

Dragani, W. y Romero S., 2004. Impact of a possible local wind change on the wave climate in the upper Río de la Plata.

Dogliotti, A. I., Ruddick, K. y Guerrero, R. 2016. Seasonal and inter-annual turbidity variability in the Río de la Plata from 15 years of MODIS: El Niño dilution effect. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 182: 27-39

Dogliotti, A., Ruddick, K., Nechad, B., Doxaran, D. y and Knaeps, E., 2015. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters, *Remote Sens. Environ.*, 156, 157–168.

D'Onofrio, E. E., Fiore, M. M. E. y Romero, S. I., 1999. Return periods of extreme water levels estimated for some vulnerable areas of Buenos Aires. *Continental Shelf Research*, pp. 1681–1693.

D'Onofrio, E. E., Oreiro, F., y Fiore, M. M. E., 2012. Simplified empirical astronomical tide model—an application for the Río de la Plata estuary. *Computers & Geosciences*, 44, 196-202.

Escobar, G., Vargas, W., y Bischoff, S., 2004. Wind tides in the Río de la Plata estuary: meteorological conditions. *International Journal of Climatology*, 24 (9), 1159-1169.

Fossati, M., 2013. Dinámica global de sedimentos finos en el Río de la Plata.

Framiñan, M. B., Etala, M. P., Acha, E. M., Guerrero, R. A., Lasta, C. A., y Brown, O. B., 1999. Physical characteristics and processes of the Río de la Plata estuary. In *Estuaries of South America* (pp. 161-194). Springer Berlin Heidelberg.

Fossati, M., y Piedra-Cueva, I., 2013. A 3D hydrodynamic numerical model of the Río de la Plata and Montevideo's coastal zone. *Applied Mathematical Modelling*, 37(3), 1310-1332.

Gagliardini, D. A., Karszenbaum, H., Legeckis, R. y Klemas, V., 1984. Application of Landsat MSS, NOAA/TIROS AVHRR, and Nimbus CZCS to study the La Plata river and its interaction with the ocean. *Remote sensing of environment*, 15(1), 21-36.

Gohin, F., 2011. Annual cycles of chlorophyll-a, non-algal suspended particulate matter, and turbidity observed from space and in-situ in coastal waters. *Ocean Science* 7,705–732.

Honeyman, B. D., Balistreri, L. S., y Murray, J. W., 1988. Oceanic trace metal scavenging: the importance of particle concentration. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 35(2), 227-246.

Jaime, P., Menéndez, A., Uriburu Quirno, M. y Torchio, J., 2002. Análisis del régimen hidrológico de los ríos Paraná y Uruguay. Informe LHA 05-216-02. Instituto Nacional del Agua, Buenos Aires, Argentina.

Jannasch, H. W., Honeyman, B. D., y Balistreri, L. S., 1988. Kinetics of trace element uptake by marine particles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(2), 567-577.

Jaureguizar, A. J., Bava, J., Carozza, C. R., y Lasta, C. A., 2003. Distribution of whitemouth croaker *Micropogonias furnieri* in relation to environmental factors at the Río de la Plata estuary, South America. *Marine Ecology Progress Series*, 255, 271-282.

Kleinbaum, D. y Kupper, L., 1978. *Applied regression analysis and other multivariable methods*.

López Laborde, J., 1987. Distribución de sedimentos superficiales de fondo en el Río de la Plata Exterior y Plataforma adyacente. *Investigación en Oceanología*, 1.

Menéndez, A. N., 1994. Simulación numérica de la sedimentación en canales de navegación. *Información Tecnológica–Revista Latinoamericana*, 5(4), 71-77.

Minetti, J. L., Vargas, W. M., 1990. Comportamiento del borde anticiclónico subtropical en Sudamerica Parte II. *Revista de Geofísica* 33,177–190.

Moreira, D., Simionato, C. G., Gohin, F., Cayocca, F. y Luz Clara Tejedor, M., 2013. Suspended matter mean distribution and seasonal cycle in the Río de La Plata estuary and the

adjacent shelf from ocean color satellite (MODIS) and in-situ observations. *Continental Shelf Research*.

Moreira D, Claudia G. Simionato, Walter Dragani, Florence Cayocca, and Moira Luz Clara Tejedor (2016) Characterization of Bottom Sediments in the Río de la Plata Estuary. *Journal of Coastal Research: Volume 32, Issue 6: pp. 1473 – 1494.*

Nagy, G. J., Martinez, C. M., Caffera, R. M., Pedraloza, G., Forbes, E. A., Perdomo, A. C. y Laborde, J. L., 1997. The hydrological and climatic setting of the Río de la Plata. In: *The Río de la Plata, An Environmental Review, An Eco Plata Project Background Report*. Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, pp. 17–68.

Nogues-Paegle, J., and K.-C. Mo (1997), Alternating wet and dry conditions over South America during summer, *Mon. Weather Rev.*, 125, 279–291.

O'Connor, W. P., 1991. A numerical model of tides and storm surges in the Río de la Plata Estuary. *Continental Shelf Research*, 11(12), 1491-1508.

Ottman, F. y Urien, C. M., 1965. La melange des eaux douces et marines dans le Río de la Plata. *Cahiers Oceanographiques* 17, 213–234.

Ottman, F y Urien, C. M., 1966. Sur quelques problemes sedimentologiques dans le Río de la Plata. *Revue de Géographie Physique et Géologie Dynamique* 8, 209–224.

Parker, G., Cavalloto, J. L., Marcolini, S. y Violante, R., 1986a. Los registros acústicos en la diferenciación de sedimentos subacuáticos actuales (Río de la Plata). 1er Reunión de Sedimentología Argentina, 32–44.

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). 1er Reunión de Sedimentología Argentina, 38–41.

Perillo, G. M. E., Piccolo, M. C., Parodi, E., y Freije, R. H., 2001. The Bahía Blanca Estuary, Argentina. In *Coastal marine ecosystems of Latin America* (pp. 205-217). Springer Berlin Heidelberg.

Petus, C., Chust, G., Gohin, F., Doxaran, D., Froidefond, J.M. y Sagarminaga, Y., 2010. Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery. *Continental Shelf Research* 30, 379–392.

Piccolo, M. C., y Perillo, G. M., 1999. The Argentina estuaries: a review. In *Estuaries of South America* (pp. 101-132). Springer Berlin Heidelberg.

Sarubbi, A., y Menéndez, A. N., 2007. Un modelo numérico para representar el avance del Frente del Delta del río Paraná a escala secular. *Mecánica Computacional*, 26, 2203-2216.

Seluchi, M. E. y Saulo, A. C., 1996. Possible mechanisms yielding an explosive coastal cyclogenesis over South America: experiments using a limited area model. *Australian Meteorological Magazine*, 47 (4) (1996), pp. 309–320.

Sepúlveda, H. H., Valle-Levinson, A., y Framiñan, M. B., 2004. Observations of subtidal and tidal flow in the Río de la Plata Estuary. *Continental Shelf Research*, 24(4), 509-525.

Simionato, C. G., Dragani, W. C., Nuñez, M. N., Engel y M., 2004 a. A set of 3-D nested models for tidal propagation from the Argentinean Continental Shelf to the Río de la Plata estuary: Part I, M2. *Journal of Coastal Research* 20(3), 893–912.

Simionato, C. G., Dragani, W. C., Meccia, V. L. y Nuñez, M. N., 2004 b. A numerical study of the barotropic circulation of the Río de la Plata Estuary: sensitivity to bathymetry, Earth rotation and low frequency wind variability. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 61, 261–273.

Simionato, C. G., Meccia, V., Dragani, W., y Nuñez, M. 2005. Barotropic tide and baroclinic waves observations in the Río de la Plata Estuary. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110 (C6).

Simionato, C. G., Meccia, V. L., Dragani, W. C. y Nuñez, M. N., 2006. On the use of the NCEP/NCAR surface winds for modeling barotropic circulation in the Río de la Plata Estuary. *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 or intra - seasonal scales: 2. Currents' vertical structure and its implications for the salt wedge structure. *Journal of Geophysical Research* 112, C07005, <http://dx.doi.org/10.1029/2006JC003815>.

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 and their mixing time scales. *Geoacta* 34, 87–116.

Simionato, C. G., Moreira, D., Piedra Cueva, I., Fossati, M., Guerrero, R., de los Campos, T., Balestrini, C., Cayocca, F., Gohin, F. y Repecaud, M., 2011a. Proyecto FREPLATA – FFEM Modelado Numérico y Mediciones in-situ y Remotas de las Transferencias de Sedimentos Finos a través del Río de la Plata. Parte A: Adquisición de Datos. *Frente Marítimo* 1015 - 323322,109–136.

Simionato, C. G., Moreira, D., Re, M. y Fossati, M., 2011 b. Estudio de la dinámica hidro-sedimentológica del Río de la Plata: observación y modelación numérica de los sedimentos finos. 109pp. Publicado por Proyecto FREPLATA, CTMFM- CARP, ISBN978-92-990052-9-3.

Snedden, G. A., Cable, J. E., Swarzenski, C. y Swenson, E., 2007. Sediment discharge into a subsiding Louisiana delta ice estuary through a Mississippi River diversion. *Estuarine*,

Coastal and Shelf Science 0272-771471, 181–193, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2006.06.035>

Tossini, L., y Tossini, L. (1959). Sistema hidrográfico y cuenca del Río de la Plata: Contribución al estudio de su régimen hidrológico (No. ANA soc-cie).

Urien, C. M., 1966. Distribución de los sedimentos en el Río de la Plata Superior (No. DOC 0290).

Urien, C. M., 1967. Los sedimentos modernos del Río de la Plata Exterior. Boletín Servicio de Hidrografía Naval, 2.

Urien, C. M., 1972. Río de la Plata estuary environments. Geological Society of America Memoirs, 133, 213-234.

Vera, C. S., Vigliarolo, P. K., y Berbery, E. H. (2002). Cold season synoptic-scale waves over subtropical South America. *Monthly Weather Review*, 130(3), 684-699.

Wilks D., 2006. Statistical Method in the Atmospheric Science.