

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**ANÁLISIS DEL PERFIL DE CORRIENTES EN LA COSTA DE
MONTEVIDEO**

Mónica Fossati, Daniel Bellón y Ismael Piedra-Cueva

*Universidad de la República, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental. J. Herrera y Reissig 565,
Montevideo, Uruguay. mfossati@fing.edu.uy, dbrey@fing.edu.uy, ismaelp@fing.edu.uy*

RESUMEN:

En este artículo se presenta el análisis de mediciones de corrientes realizadas entre 2003 y 2006 en dos puntos ubicados en la costa de Montevideo. Dos correntómetros acústicos (ADCPs) se utilizaron para realizar las mediciones. Estos instrumentos miden las tres componentes de las velocidades en un rango de profundidades al mismo tiempo. A partir del análisis de las medidas se obtuvo una caracterización del perfil vertical de velocidades. Se realizó un primer análisis exploratorio de las series temporales registradas en las distintas capas. Además, un análisis espectral de las series originales fue realizado con el objetivo de identificar las frecuencias de las principales componentes. El principal análisis estadístico aplicado es el análisis de componentes principales (EOF), utilizado para encontrar un número relativamente pequeño de variables nuevas que contengan la mayor cantidad de información posible del conjunto de datos original sin redundancia. Este análisis se aplicó a las series de corriente medidas en distintas profundidades. Los resultados muestran un modo de variabilidad predominante con una estructura vertical con leve variabilidad entre el fondo y la superficie.

ABSTRACT:

In this article the analysis of current measurements between 2003 and 2006 in two points on Montevideo's coastal zone is presented. Two 1200 kHz broadband Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) were used to make the measurements. These instruments have the capability of measuring the three components of the velocity over a range of depths at the same time. Analyzing the data the main characteristics of the vertical currents profile in the area were obtained. A preliminary analysis of the temporal series was realized. In order of identified main frequencies of the movement a spectral analysis was done. The main statistical analysis applied to the vertical current measured profile was the empirical orthogonal function (EOF) that reduces a data set containing a large number of variables to a data set containing fewer new variables. The obtained results show a predominant variability mode in the vertical profile.

PALABRAS CLAVES:

ADCP, EOF, Río de la Plata

INTRODUCCIÓN

La realización de mediciones de campo para entender la dinámica de cuerpos de agua de gran tamaño se ha incrementado en los últimos años debido principalmente al desarrollo de nuevas tecnologías de medición y al creciente interés en las temáticas ambientales. En el Río de la Plata en los últimos años se han realizado diversos esfuerzos para desarrollar campañas de medición de variables hidroambientales en diversas zonas con el objetivo de mejorar el conocimiento del mismo y para poder tener datos de campo para aplicar en modelos de circulación y de transporte (Freplata, 2004; Moreira et al, 2010). La experiencia de medición de corrientes realizada en el marco del proyecto Freplata fue sumamente exitosa y el análisis de la información de campo recolectada ha permitido avanzar en el conocimiento de la dinámica del Río de la Plata en la zona central (Simionato et al, 2005). Sin embargo, experiencias de medición de corriente cercanas a la costa de Montevideo no se realizaron en esa instancia.

En el marco de un convenio de cooperación técnica entre la Intendencia Municipal de Montevideo (IMM) y el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería iniciado en el 2001 la IMM adquirió dos perfiladores acústicos de corrientes (ADCPs) para medir características del flujo en determinados puntos de interés en la zona costera uruguaya. Las mediciones se realizaron a una distancia de aproximadamente 3500 m de la costa desde diciembre 2003 hasta la actualidad. El trabajo de medición efectuado estuvo orientado fundamentalmente a la obtención de información de base sobre parámetros hidrodinámicos del Río de la Plata en zonas donde actualmente se ubican o se prevé en el futuro ubicar obras hidráulicas. Sin embargo, la información obtenida constituye también una base de datos muy extensa a partir de la cual es posible obtener información de la dinámica del sistema y con la cual es posible también calibrar modelos numéricos aplicados en la zona (Fossati et al, 2008), además de por ejemplo utilizar los registros para inferenciar información de la dinámica de los sedimentos en suspensión (Bellón et al, 2009).

Análisis previos de los datos medidos en la costa uruguaya han sido realizados en el IMFIA (Fossati et al 2009). Se estudiaron por un lado las características generales de las corrientes que muestran los datos, así como también una caracterización de los patrones de flujo vertical. En este trabajo se complementan los estudios realizados, incorporando a los análisis todas las mediciones en la vertical, y aplicando el análisis de componentes principales (EOF) al perfil de corrientes.

OBJETIVO

Identificar a través de un análisis estadístico complejo la estructura vertical de flujo observada en los registros de mediciones de corrientes en diversas profundidades efectuadas en dos ubicaciones particulares en la costa uruguaya del Río de la Plata durante largos periodos de tiempo.

CARACTERÍSTICAS DEL AREA DE ESTUDIO

La ciudad de Montevideo, capital de Uruguay, se ubica en las costas del Río de la Plata en una zona de una dinámica particularmente compleja, dominada por la combinación del efecto del alto caudal fluvial proveniente de los ríos Paraná y Uruguay, de la variación temporal de las componentes de marea astronómica y meteorológica provenientes del Océano Atlántico y por los gradientes de salinidad resultantes de la mezcla de las aguas dulces y saladas, además de la influencia de las variaciones topográficas de la zona y los vientos locales. El Río de la Plata es un gran cuerpo de agua que presenta diversas características en sus tramos. A través de los ríos Paraná y Uruguay proviene más del 97% del ingreso de agua dulce al Río de la Plata, siendo la descarga media aproximadamente $22.000 \text{ m}^3/\text{s}$ con periodos de alta descarga con más de $40.000 \text{ m}^3/\text{s}$. El Río de la Plata es un ambiente micro-mareal en el cual las variaciones de nivel debido a la marea astronómica

son mucho menores a las generadas por el efecto del viento y las ondas provenientes del océano. El ambiente regional es mayormente fluvial, pero la mezcla con las aguas oceánicas genera un cambio gradual del ambiente fluvial en la parte superior del río a un ambiente fluvio marino y marino en la parte exterior del río. Se puede entonces subdividir el Río de la Plata, según las características de las aguas dulces, salobres y oceánicas del río, los sedimentos y algunas propiedades biológicas, en tres zonas: la zona interior, la zona intermedia y la zona exterior (Boschi 1988, CARP 1992). La zona interior corresponde al delta subfluvial, a las nacientes del río y por ende tiene características típicamente fluviales, influenciadas por el avance del delta sobre el río. El Río de la Plata intermedio comprende la zona entre la línea imaginaria Colonia La Plata hasta la zona del Codillo, ubicado cerca de la línea entre Punta Brava en Montevideo y Punta Piedras en la costa argentina. Esta zona es una zona de transición en donde el agua por lo general es dulce con contenido de sedimentos en suspensión. El Banco Ortiz y el Canal Principal son las principales características morfológicas de esta zona. En esta zona se advierte la influencia marina, el oleaje aumenta y el efecto de la marea es mayor. El Río de la Plata exterior comprende el sector estuarino, se extiende desde el Codillo hasta el límite oceánico del río y es una zona de salinidad variable abierta hacia el mar. La penetración de las aguas marinas hacia el interior del río ocurre por el fondo, a partir de lo cual se produce una mayor o menor mezcla de las aguas saladas y dulces, según los vientos y la fuerza de las corrientes. Es la zona más extensa y contiene el Canal Norte, el Banco Inglés, el Banco Arquímedes y la Bahía de Samborombón.

En la Figura 1 se muestran las características morfológicas del área de interés. La zona costera de Montevideo incluye varias playas, puntas rocosas, una gran bahía y canales de navegación. La ciudad está ubicada en la zona expansión de la sección transversal del Río de la Plata en la zona de características estuarinas.

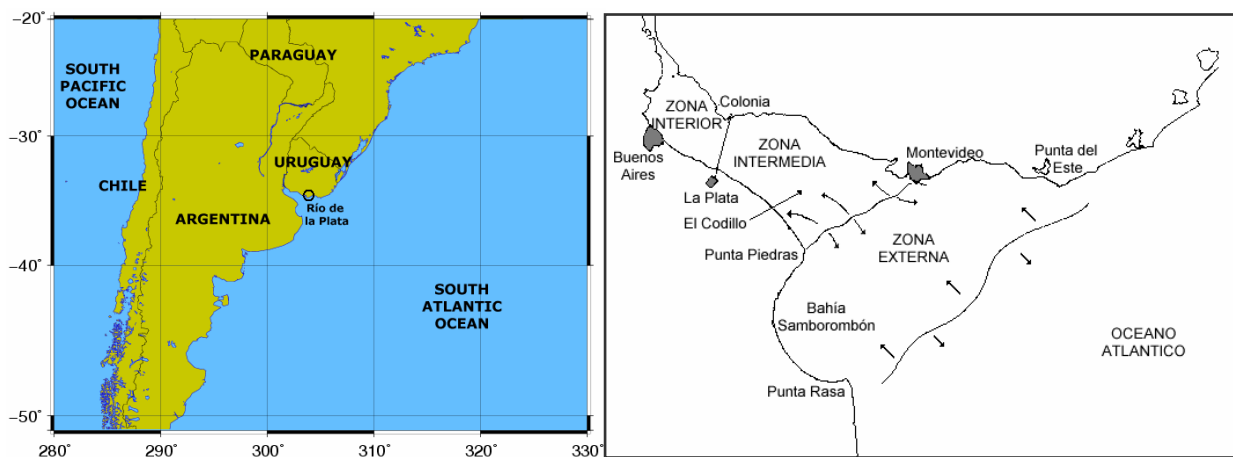


Figura 1.- Ubicación y principales características del Río de la Plata.

CARACTERISTICAS DE LAS MEDICIONES

Para las mediciones se utilizó instrumental de la firma RD Instruments, en su línea Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) de 1200 kHz. Este equipo es un perfilador de corriente acústico que emplea el efecto Doppler para medir la dirección e intensidad de la corriente, con capacidad de medir velocidades a distintas profundidades en forma simultánea. En este caso particular los equipos utilizados permiten obtener el perfil vertical de la corriente, brindando información sobre módulo y dirección y también desglosando según las distintas componentes (Norte, Este y Vertical). Los equipos realizan medidas en intervalos cada treinta minutos, integrando información obtenida cada segundo, en celdas ubicadas a distinta profundidad (bins), durante un lapso de dos minutos.

El correntógrafo ADCP 1 se programó para registrar datos de intensidad y dirección de corrientes con una resolución vertical de 1.35 m mientras que el ADCP2 tiene una resolución vertical de 0.5 metros. Ambos correntómetros se programaron con una resolución temporal de 30 minutos. El bin n°1 del ADCP1 se encuentra a 0.87 m de los lentes del instrumento y el bin n°1 del ADCP2 a 1 m. En ambos casos los lentes se ubicaron a 0.4 m del fondo lo que significa que se tomaron medidas a partir de 1.27 m de profundidad en el ADCP1 y de los 1.4 m en el ADCP2. La cantidad de bins medidos en la vertical en cada correntómetro varía en el tiempo pues depende de la elevación de la superficie libre. En la costa de Montevideo la diferencia promedio entre valores máximos y mínimos mensuales de nivel es de 2 metros aproximadamente. La profundidad media en la zona del ADCP 1 es de 9 m mientras que en la zona del ADCP 2 es de 7 m. La ubicación de los equipos de medición en las costas de Uruguay se presenta en la Figura 2.

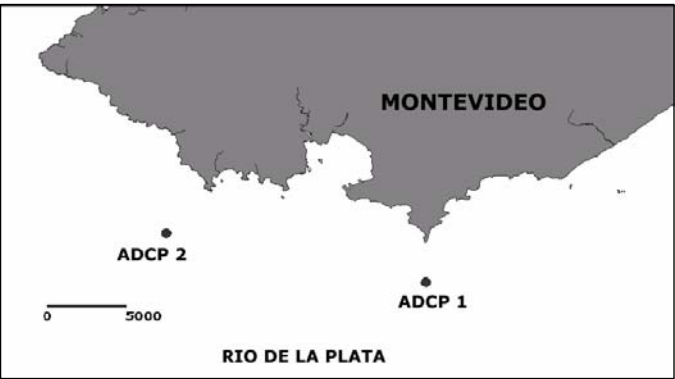


Figura 2.- Ubicación de los dos correntómetros en la costa uruguaya.

Desde el fondeo de los equipos en diciembre 2003 estos han estado registrando datos con algunos cortes por períodos fuera del agua por mantenimiento. Además, por mal funcionamiento el equipo ADCP 2 estuvo sin medir durante casi todo el año 2005, luego volvió a fondearse y registró datos hasta mediados del 2006 donde finalmente se recogió y no fue fondeado nuevamente. El ADCP1 en cambio continúa registrando información hasta el día de hoy. No obstante esto, la operación casi continua de estos equipos resulta el esfuerzo de mayor extensión temporal en la medida de este tipo de variables hidrodinámicas en Uruguay.

En la Figura 3 se marcan los períodos de tiempo donde ha habido registros con cada equipo. Debido a los cortes en las mediciones se cuenta con diversos bloques de medición, definiendo como bloque la serie continua de datos. En la información presentada se presenta para cada bloque el día inicial y el día final (subrayado) del mismo, además de los instantes comprendidos entre los mismos marcados con color. En general el periodo de mantenimiento es corto, siendo en algunos casos menor a un día (en estos casos el día de fin de un bloque coincide con el día de comienzo del siguiente) pero en otros hay cortes de mayor extensión. Se observa en esta tabla que los bloques de tiempo medidos en el ADCP2 son más extensos que en el ADCP1 pero en total la cantidad de datos obtenidos en el segundo es mucho mayor que en el primero. En total se tienen 4 bloques de datos en el ADCP2 y 21 en el ADCP1. La extensión de cada serie de medición es importante para algunos de los análisis estadísticos realizados a los mismos como será mencionado más adelante.

ADCP1	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2003												<u>12</u>
2004	26 / <u>26</u>		4 / <u>22</u>			1 / <u>5</u>				21	<u>9</u>	
2005	19 / <u>28</u>			9 / <u>22</u>		13	<u>20</u>		14	<u>7</u>		12 / <u>12</u>
2006		21	1 / <u>23</u> / 23			2	<u>6</u>		15		<u>20</u>	
2007	9 / <u>9</u>		21	<u>18</u>		28				<u>19</u>		29
2008												<u>30</u>
2009			10	<u>3</u>		13			<u>15</u>		25	
ADCP2	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2004			<u>1</u> / 19 / <u>19</u>					11 / <u>11</u>				25
2005												<u>29</u>
2006						6						

Figura 3.- Períodos durante los cuales se cuenta con mediciones en el ADCP1 y ADCP2.

METODOLOGÍA

Una estrategia recomendada para estudiar datos oceanográficos o climáticos con gran variabilidad temporal y espacial es analizarlos utilizando diversas herramientas estadísticas que permitan conocer sus características y desarrollar hipótesis sobre la dinámica que representan consistentes a todas las visiones encontradas en la aplicación de las mismas (Dommenget, 2002). En este trabajo la principal herramienta estadística aplicada es el análisis de componentes principales (empirical orthogonal function, EOF, analyses) pero complementado con otros análisis estadísticos aplicados a las series de datos obtenidas con el objetivo de caracterizar el perfil de flujo.

En primer lugar se realizó un análisis exploratorio de las mediciones, identificando los principales parámetros estadísticos de las series, valor medio, desviación estándar, además de una caracterización visual de las características del flujo en las diversas capas. En segundo lugar se realizó un análisis de las series temporales, tanto en el dominio temporal como en el dominio de frecuencias, obteniéndose la función de autocorrelación y espectro de frecuencias de las series trabajadas. En función de las características de cada herramienta algunas son aplicadas a todas las series temporales registradas y otras se aplican a los diversos bloques de datos. Los análisis realizados a todos los datos del ADCP1 comprenden el periodo comprendido entre diciembre 2003 y junio 2006, que constituye un total de 36.866 registros, equivalentes en tiempo a 768 días. Para el ADCP2 se analizaron todos los datos obtenidos, que constituyen 23.188 registros, equivalentes en tiempo a 483 días. Para los análisis que requieren una continuidad temporal de los datos, como el análisis espectral, se utilizó el bloque 13 de los datos medidos en el ADCP1 por ser el de mayor extensión, que corresponde a las mediciones registradas en los 71 días comprendidos entre el 22/3/2006 y el 2/6/2008. Para el ADCP2 se utilizó el bloque 4 de 187 días de extensión.

La principal herramienta estadística aplicada en este trabajo es el análisis de las componentes principales (EOFs) aplicado a las series temporales obtenidas en todo el perfil vertical en ambos puntos de medición. Este análisis se utiliza para encontrar un número relativamente pequeño de variables nuevas que contengan la mayor cantidad de información posible del conjunto de datos original sin redundancia. Estas nuevas variables son combinación lineal de las originales y se eligen (o se calculan) para representar la mayor varianza de los datos originales (Wilks, 2006). Esta herramienta es muy aplicada en investigaciones vinculadas con datos geofísicos pues estos en general tienen grandes correlaciones entre las variables y las componentes principales son una forma de representar sus variaciones de una forma más compacta. De esta forma, los EOFs se utilizan para explorar la estructura de la variabilidad de un conjunto de datos en forma objetiva y analizar relaciones entre variables diferentes (Preisendorfer 1988, Wilks 2006).

En términos generales el análisis de componentes principales puede aplicarse a la matriz de covarianza de las series temporales de la variable definida en distintos puntos o a la matriz de correlación de las mismas. Al aplicar la herramienta sobre la matriz de covarianza se tiene en cuenta la diferencia en la varianza de la variable en los distintos puntos, en este caso, en las series de intensidad medidas a distinta profundidad. Al utilizar la matriz de correlación todas las capas tendrán igual peso y solamente se tiene en cuenta la estructura de los datos. Debido a la gran variabilidad de la varianza en el perfil que presentan las series de corrientes se aplica en este caso el análisis a la matriz de covarianza para considerar esa variabilidad en la estructura vertical que se pretende obtener.

En función de los resultados obtenidos tanto en los análisis exploratorios como en el espectral y en el EOF, se definieron a lo largo de este trabajo otras series temporales a partir de las series originales medidas. Por un lado se define la serie denominada filtrada, que se obtiene de filtrar las componentes de alta frecuencia (por lo que representa las bajas frecuencias) de la serie original aplicando una media móvil de 24hs a la serie original. A partir de la resta de la serie original y de la

serie filtrada se define la que se denomina serie residual, que representa las componentes de alta frecuencia. Por último, se definió la serie de anomalías de cada componente de la corriente en cada capa, calculada como la fluctuación de la componente en cada capa respecto a la componente media en vertical de cada instante. En este caso se busca entonces identificar como varía en el perfil la anomalía de la corriente respecto a un perfil medio, que según otros autores puede vincularse con forzantes (Simionato et al, 2005).

En este artículo se presentan con detalle los resultados obtenidos para el ADCP1 y se resumen los resultados obtenidos para el ADCP2.

RESULTADOS ADCP1

Análisis Exploratorio

En primer lugar se realizó un análisis con boxplots de las medidas de corrientes registradas en las 22 capas verticales durante el período diciembre 2003 a junio 2006. Los boxplots permiten visualizar de forma compacta varias características de los datos, como ser mediana, primer y tercer cuartil, y los valores máximos y mínimos. También se observan los valores extremos inusuales de la serie. En la Figura 4 se presentan los boxplots para el ADCP1. La intensidad está registrada en mm/s y la dirección se mide desde el Norte en sentido horario. Al analizar los resultados para la intensidad de corriente se observa por un lado el aumento de la mediana y de los cuartiles a medida que la capa es más superficial. La mediana en la capa de fondo (bin1) es igual a 197 mm/s mientras que en superficie es el doble 400 mm/s. También se observa que la dispersión de los datos es mayor en las capas intermedias. Respecto a la dirección se observa una variación progresiva de la mediana desde el fondo hacia la superficie, desde 260° (casi hacia el Oeste) hasta un mínimo de 130° en la capa 19 y luego un leve aumento en las capas superficiales hasta 160°. Esto muestra una rotación de la mediana desde el Oeste hacia el Este (pasando por el Sur) a medida que la capa es más superficial y luego una rotación hacia el Sureste en las últimas capas. Es importante aclarar que al analizar la dirección no se tiene en cuenta la intensidad de la corriente y por tanto cualquier medida (de alta o baja intensidad) tendrá igual efecto. Esto significa que no necesariamente la resultante del flujo en las capas se relaciona con las direcciones mencionadas anteriormente.

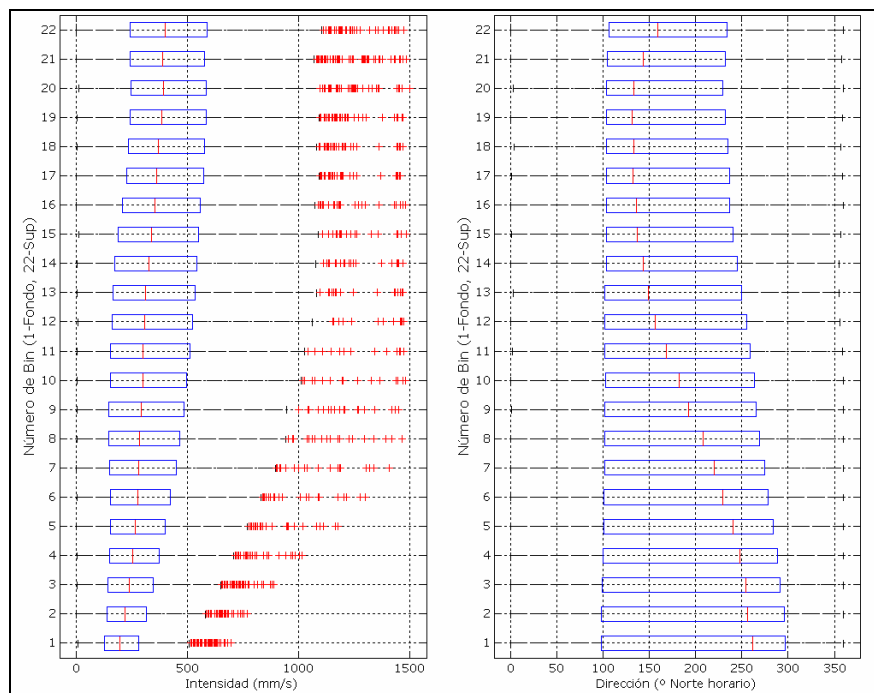


Figura 4.- Diagramas boxplots para la intensidad y la dirección de la corriente medida en las 22 capas (bins) en el ADCP1.

En trabajos anteriores (Fossati et al, 2009) se realizó un análisis de los registros en los 8 cuadrantes principales y se identificaron a las direcciones Este y Oeste como direcciones preferenciales de flujo en todo el perfil pero con distinto porcentaje de frecuencia. En el fondo la dirección Noroeste también se identifica como preferencial, mientras que cerca de la superficie la frecuencia de la corriente Oeste disminuye y aumenta la Suroeste y Sureste. Las intensidades medias y máximas mayores se observan en las direcciones Este y Oeste en todo el perfil, aumentando las mismas hacia la superficie hasta alcanzar valores medios de casi 0.6 m/s en la dirección Este y máximos mayores a 2.0 m/s en las direcciones Este y Sureste.

Las corrientes registradas con el equipo ADCP1 presentan gran variabilidad temporal y gran variabilidad en el perfil. A modo de ejemplo se presenta en la Figura 5 la variación temporal de la intensidad y de las componentes Este y Norte de la misma en los 22 bins durante varios días.

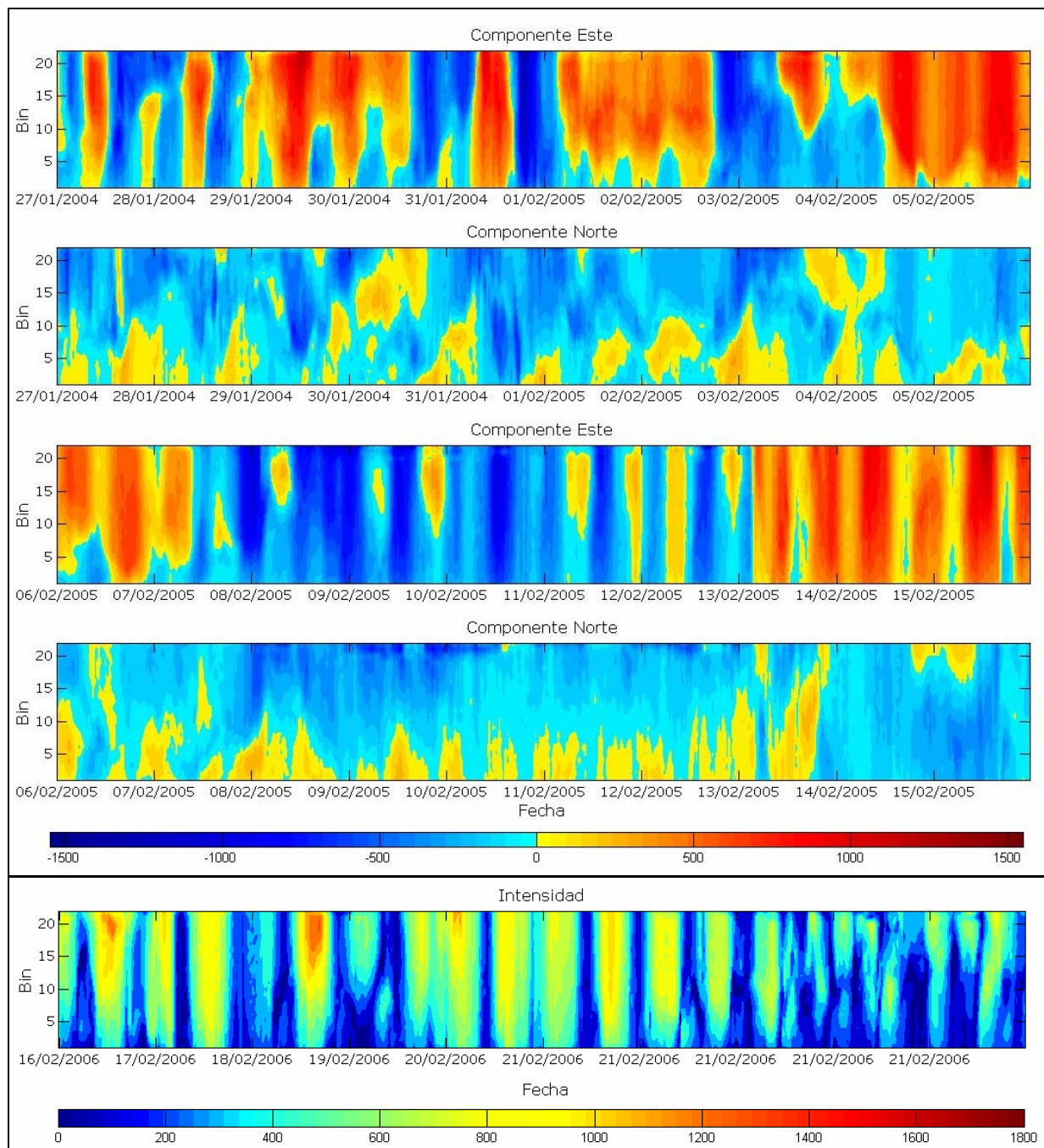


Figura 5.- Series temporales del perfil de intensidad y de las componentes de corriente registradas en el ADCP. Velocidades en mm/s.

Respecto a la intensidad del flujo en la zona se observan valores en general crecientes del fondo a la superficie con fluctuación entre valores bajos de 20 cm/s y valores altos de mas de 1 m/s, con períodos de intensidades similares en el perfil pero también con valores muy distintos en varios días. La visualización de las componentes de flujo permite además analizar como varía el sentido de la corriente en el perfil. Se observa en la Figura 4 que aunque en general el flujo por componente es de igual sentido en todo el perfil hay instantes con flujo opuesto. Esta inversión del sentido del flujo en el perfil en algunos casos tiene corta duración pues se debe a la inversión natural del flujo oscilatorio característico de la zona influenciado por la marea pero también se observan períodos de mayor extensión. Nótese además que la componente Norte de las corrientes es mucho menor a la componente Este.

La variabilidad de las componentes de flujo en el perfil se cuantificó a partir de la varianza de las series temporales de los registros en cada capa. En la Figura 6 se presentan la varianza por cada capa de las componentes Este y Norte del flujo. Se observa la varianza en la componente Este es mucho mayor que la varianza en la componente Norte (un orden superior). La misma crece desde fondo a la superficie alcanzando valores dos veces más grandes a partir de la capa 18 que se mantiene similar hasta la superficie. La componente Norte presenta una variación grande a partir también de la capa 18 desde 2×10^4 (mm/s)² a casi 5×10^4 (mm/s)².

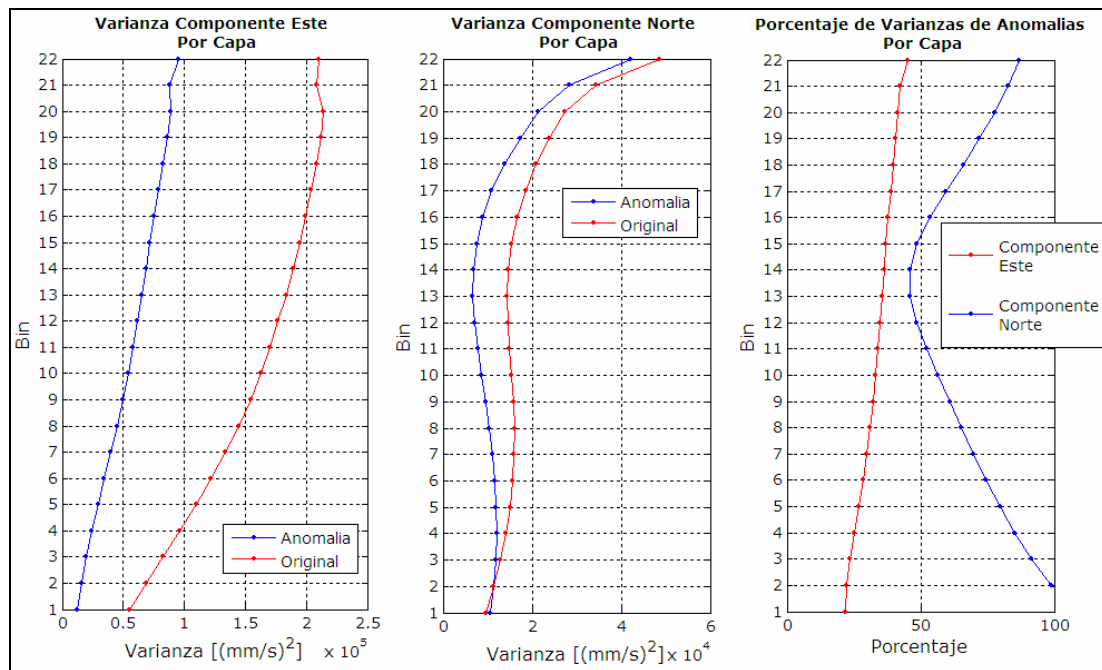


Figura 6.- Variación de la varianza de las series originales y de las anomalías de las componentes Este y Norte en todas las capas para el ADCP1.

En la Figura 6 también se presenta la varianza para cada capa (y el porcentaje en relación a la serie original) que representa la serie de anomalías de las componentes Este y Norte. Se observa que el porcentaje de la varianza de la anomalía para la componente Este varía de aproximadamente un 25% en fondo hasta un 50% en superficie, lo que indica la relevancia de dicha componente en la serie original. Para la componente Norte se observan mayores porcentajes muy variables en el perfil.

Análisis Espectral

En la Figura 7 se presenta el espectro obtenido en todo el perfil para el bloque 13 de datos en el ADCP1. Se observa para la componente Este del flujo que en todas las capas ocurre un pico de energía para un período de aproximadamente 12 horas. Esta frecuencia coincide con el

constituyente astronómico denominado M2; la onda astronómica que mayor energía aporta al Río de la Plata. Siguiendo la escala hacia periodos mayores se observa otro pico de energía correspondiente aproximadamente a un período de 24hs. La marea astronómica en la zona también presenta frecuencias asociadas a ese período, son las denominadas componentes diurnas, como la O1 y K1. Se observan también en todas las capas, pero con un aumento de la intensidad hacia la superficie, otros picos de energía en periodos mayores. Se destacan picos asociados a periodos de 130, 170, 213 y 426 horas, que indican oscilaciones en la escala de varios días asociados al efecto atmosférico y de la marea meteorológica que afecta la dinámica de las corrientes de la zona. El espectro que presenta la componente Norte es mas ruidoso que el de la componente Este principalmente en la superficie, con valores mucho menores de densidad espectral.

El análisis espectral muestra claramente que las componentes de alta frecuencia del flujo corresponden a los armónicos principales de marea astronómica que actúan sobre la dinámica de la zona. Sin embargo, también el análisis espectral indica que hay otras componentes importantes de baja frecuencia que aparecen en la señal de corrientes medidas. A partir de esto se realiza una división de la señal, en una componente filtrada y en una componente residual. Con el objetivo de filtrar las componentes astronómicas diurnas y semidiurnas que se observan en el espectro de los registros se aplicó una media móvil de 24hs sobre las dos componentes de la corriente registrada en el período de datos denominado, obteniendo la serie filtrada. A partir de esta serie, se calculo la serie residual a partir de la serie original menos la serie filtrada, representando en esa señal las componentes astronómicas de las corrientes.

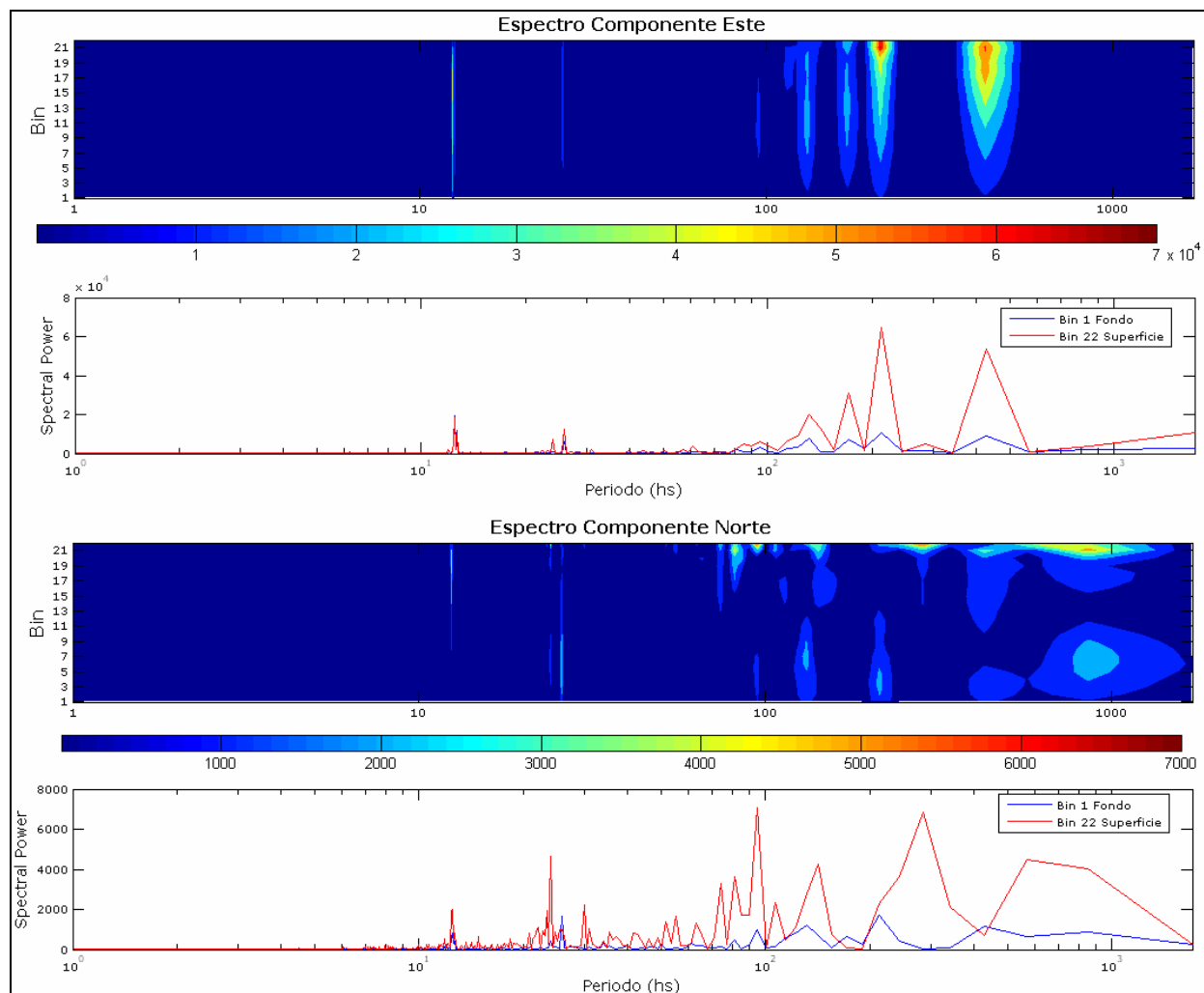


Figura 7.- Espectro de energía de la componente Este y Norte de los datos registrados en el bloque 13 en todas las capas para el ADCP1.

Con el objetivo de determinar la importancia de la componente filtrada y residual en cada capa del perfil se calculó el porcentaje de la varianza de la serie original que representan las series de alta y de baja frecuencia (Figura 8). Los resultados muestran que la mayor varianza en la componente Este (componente principal del flujo para el ADCP1) está representada por la componente filtrada, es decir, de baja frecuencia, con mas de un 50% de porcentaje en todas las capas alcanzando un 60% en las capas superficiales. En la componente Norte el mayor porcentaje de varianza es representado por las componentes residuales, es decir, astronómicas, pero el porcentaje presenta una mayor variabilidad en el perfil.

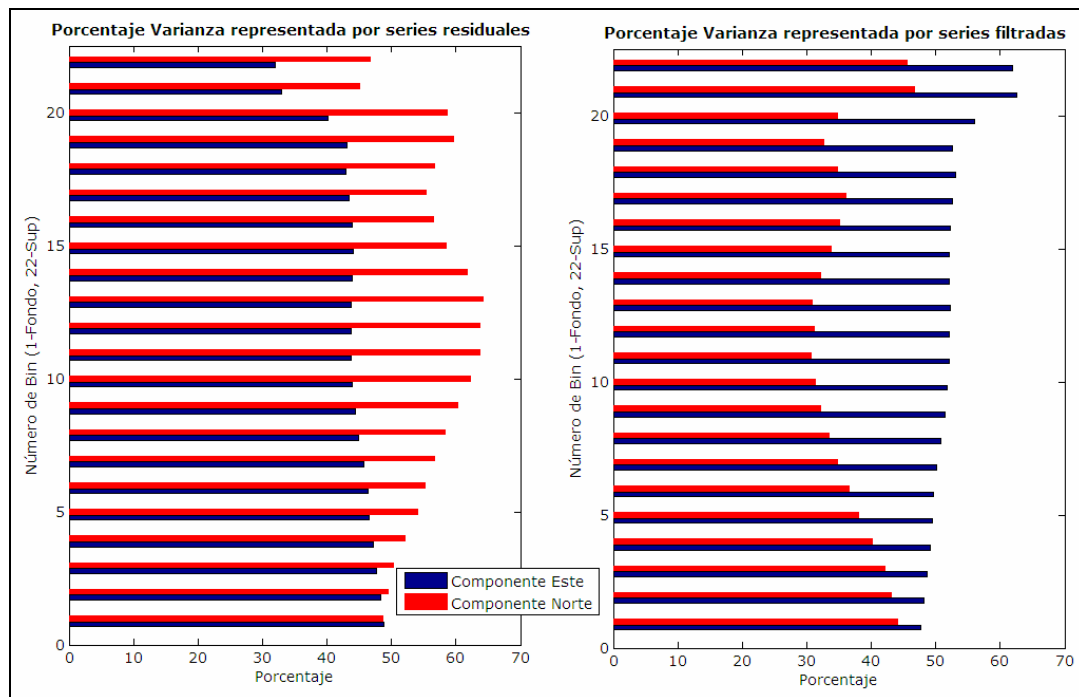


Figura 8.- Porcentaje de la varianza de la serie original representada por las series residuales y filtradas para el ADCP1 en todas las capas.

Autocorrelación

Se calculó la función de autocorrelación de cada serie registrada en cada capa para el bloque 13 para determinar la dependencia existente entre las series. La función de autocorrelación se calculó tanto para las series originales como para las series filtradas y residuales de las componentes Este y Norte de la corriente en todas las capas verticales. Los correlogramas obtenidos muestran que la serie original presenta una periodicidad característica del flujo periódico generado por la marea astronómica, mientras que la serie filtrada muestra una autocorrelación decreciente que indica que la serie tiene una determinada persistencia durante varias horas. En tanto, la serie residual presenta también una periodicidad marcada pero una persistencia mucho menor en tiempo que la serie original. En general los resultados obtenidos en todas las capas son similares en la componente Este pero varían para la componente Norte. Este análisis nos indica por un lado que los grados de libertad de los datos de corriente serán menores al número de datos utilizados en los análisis. Además, podemos determinar el tiempo asociado a una autocorrelación nula y afirmar que la serie tiene una persistencia igual a ese número de horas (Figura 9).

Las series filtradas muestran un tiempo de persistencia de aproximadamente 45 hs en el fondo para la componente Este que aumenta en las capas superficiales a 55hs. En la componente Norte hay una variación en la vertical con una disminución del mismo en las capas superficiales. La serie residual muestra tiempos bajos de persistencia, de 4 hs en ambas componentes, que no varían en el perfil.

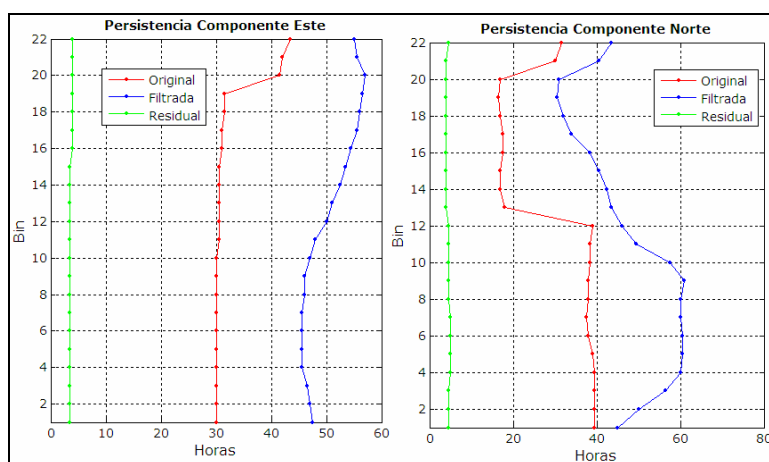


Figura 9.- Tiempo de persistencia de las componentes Este y Norte en todas las capas para ADCP1.

Análisis Componentes Principales

El análisis EOF se aplicó en primer lugar a la serie original de las componentes registradas utilizando todos los datos registrados entre diciembre 2003 y junio 2006. Además, para el período definido por el bloque 13 ya presentado se aplicó también el análisis para las series filtradas y residuales. De esta forma se busca identificar si hay relaciones diferentes en el perfil para las componentes de baja y alta frecuencia identificadas en la serie. Es importante aclarar que en realidad el análisis se aplica a las fluctuaciones de las componentes respecto a la media pero en estos casos las medias de las series temporales de las componentes son casi nulas y ambas series son muy similares. Además, se aplicó el análisis de componentes principales a la serie de anomalías de componentes en cada capa, definiendo esta anomalía como la fluctuación de la componente en cada capa respecto a la componente media en vertical de cada instante.

Al aplicar el análisis de componentes principales a la matriz de covarianza de las anomalías de la serie de componente Este en cada capa en el ADCP1 se obtienen los 22 modos principales y la varianza explicada por cada uno de los modos principales. En la Figura 10 se presenta la estructura vertical que representan los tres EOFs principales obtenidos.

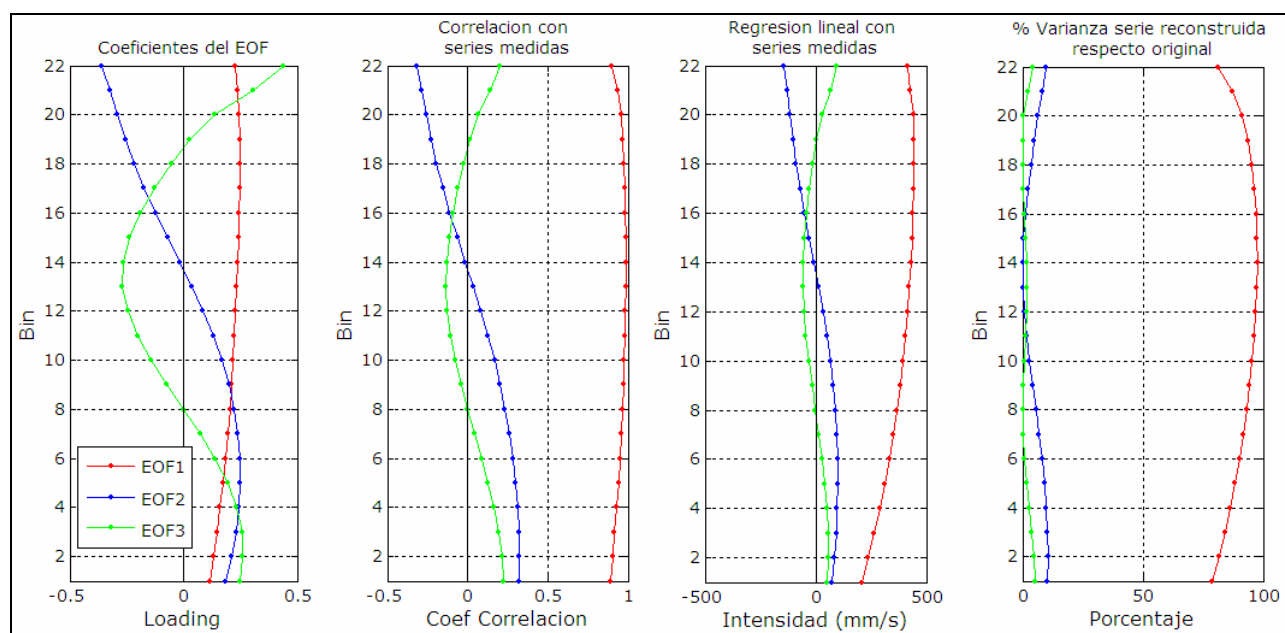


Figura 10.- Componentes principales de la componente Este registrada en función de la profundidad para el ADCP1.

Se obtuvo para este caso un modo principal que explica el 92,5% de la varianza de los datos. El segundo modo tiene asociado un porcentaje igual a 4,5% y el tercero 1,3%. Como se mencionó anteriormente el EOF1 representa la mayoría de la varianza de los datos. La estructura muestra un modo con poca variación en la dirección vertical. En la Figura 3 también se representan los 3 modos principales utilizando correlación y regresión lineal con los datos. Se observa que el modo principal tiene una correlación grande con la serie, alcanzando valores cercanos a 1 en las capas intermedias y casi 0.9 en profundidad y superficie. En el último gráfico se representa el porcentaje de varianza que explica cada modo en cada capa. Se observa claramente que el modo 1 (EOF1) representa altos porcentajes de la varianza de la serie en todo el perfil, con valores mayores en las capas intermedias. Se observa también que el modo 2 presenta una representación mayor en las capas de fondo y superficie que en la zona intermedia aunque con bajos porcentajes en general.

Como los EOFs calculados son ortogonales hay que tener cuidado con la interpretación física de los modos. En este caso sin embargo el primer modo representa el 92% de la varianza y puede interpretarse directamente. Estos resultados muestran que la variación de la componente Este en profundidad tiene un modo predominante con flujo en la misma dirección y con poca variación, aumentando en intensidad desde el fondo hacia la superficie. En relación a la estructura de flujo que representa el modo 2, esta no puede interpretarse directamente de los gráficos presentados, sino que se deberían de rotar los EOFs calculados.

Respecto a la componente Norte los resultados obtenidos muestran que no hay un modo claramente predominante como ocurre para la componente Este. Se identificaron en este caso tres modos principales, el EOF1 que explica el 45,5% de la varianza, el EOF2 que explica el 30% y el EOF3 con 11,5%; entre los tres completan el 87% de la varianza de la serie. Además de estos 3 EOFs seleccionados se observan dos modos más con porcentajes mayores al 2%. El EOF1 muestra una estructura vertical con carga opuesta entre fondo y superficie y la varianza explicada varía entre capa y capa. El EOF1 representa mayor varianza en la superficie mientras que el EOF2 explica porcentajes considerables en las capas intermedias. Como se mencionó anteriormente, como los EOFs calculados son ortogonales hay que tener cuidado con su interpretación física de los modos. Sin embargo es posible analizar el primer modo que representa el 45% de la varianza de la componente Norte en todo el perfil vertical. Estos resultados muestran que la variación de la componente Norte en profundidad tiene un modo predominante con flujo que varía de sentido en la dirección vertical, hacia el Sur en fondo y hacia el Norte en superficie, con mayor intensidad en superficie. Si se combina esta fluctuación con la componente Este (predominante) con su principal modo de variabilidad se obtiene la variación direccional que se observa entre la superficie y el fondo, no opuesta pero si con algunos grados de variación en la dirección principal (Fossati et al, 2009).

La estructura obtenida con el análisis EOF para la serie residual y filtrada es muy similar a la obtenida para la serie original, con un modo principal que representa más del 90% de la varianza y con leve variación en la vertical. Esto indica que la variación en vertical identificada con el análisis es independiente de la frecuencia de las componentes que conforman la serie medida de corrientes.

Por último se aplicó el análisis EOF a la serie de anomalías de las componentes del flujo de corriente definida como la fluctuación respecto a la media en el perfil en cada instante. En este caso también se identificaron tres modos principales que representan en conjunto más del 95% de la varianza de la serie de anomalías. El EOF1 que explica el 79,5% de la varianza, el EOF2 que explica el 12,5% y el EOF3 con 3,5%. En la Figura 11 se presenta la estructura vertical que representan los tres EOFs principales obtenidos. Se observa que el modo principal muestra una variación en el perfil pero de igual sentido, con mayor correlación y representatividad de la varianza en las capas intermedias y superiores de flujo. En las capas de fondo el modo EOF2 muestra mayor representatividad. Respecto a la anomalía de la componente Norte los resultados obtenidos

muestran un modo predominante que explica el 63% de la varianza, y dos modos principales más, el EOF2 que explica el 18,5% y el EOF3 con 8%; entre los tres completan casi el 90% de la varianza de la serie. De forma similar a lo obtenido para la serie original en la componente Norte también para la anomalía de esta componente el modo principal muestra una inversión en el sentido entre la superficie y el fondo, con una porcentaje de representatividad alto en las capas de fondo y superficiales, pero no en las intermedias.

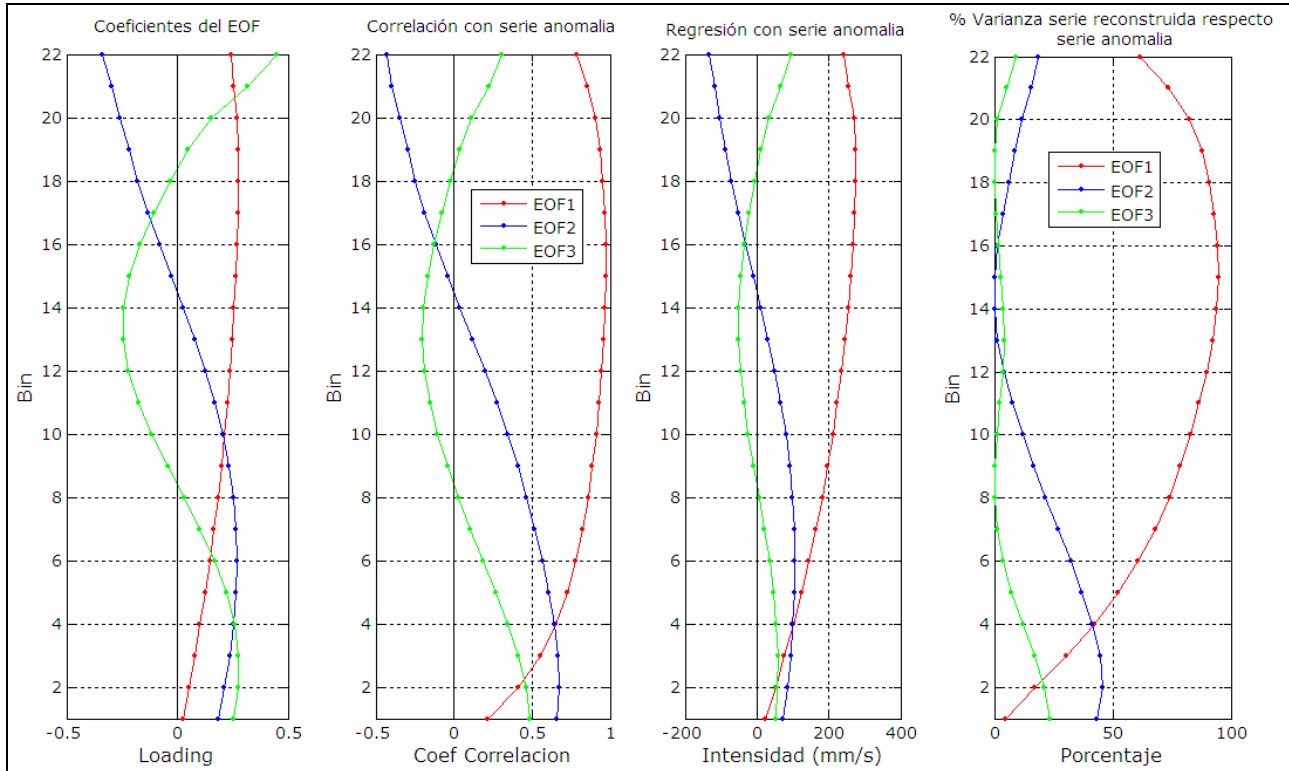


Figura 11.- Componentes principales de la anomalía de la componente Este en función de la profundidad para el ADCP1.

DISCUSION

Los resultados obtenidos para el ADCP2 muestran en general un comportamiento similar al obtenido para el ADCP1, a pesar de contar con una discretización vertical en los datos menor. En general las intensidades registradas en esta zona son menores a las obtenidas con el ADCP1, pero la variación vertical obtenida es muy similar. Una diferencia importante es que en el ADCP2 ambas componentes de flujo son relevantes, con varianzas del mismo orden, siendo la dirección preferencial de flujo las direcciones Sureste y Noroeste. El análisis espectral también muestra que tanto las componentes de alta y baja frecuencia son importantes pero el porcentaje de varianza que representa la serie residual es un 60% en la componente Este y un 70% en la componente Norte, aumentando desde el fondo hacia la superficie. Esto muestra una gran relevancia de la componente astronómica en esta zona.

El análisis EOF a la componente Este muestra también que hay un modo predominante que representa el 92% de la varianza del perfil vertical con poca variación en la vertical con altos porcentajes de representatividad de la serie reconstruida en cada capa. Respecto a la componente Norte el modo principal explica el 78% de la varianza y el siguiente el 14%. El comportamiento del primero muestra poca variabilidad en el perfil sin inversión del sentido del flujo con gran representación de la varianza de la serie original en todo el perfil, mientras que el segundo muestra una inversión de flujo entre la superficie y el fondo pero con bajo porcentaje de representatividad. Respecto a la serie de anomalía de la componente Este obtenida en el ADCP2 la misma representa

una varianza entre el 40 y 60% de la serie original aumentando desde el fondo hacia la superficie (valor mayor al obtenido para el ADCP2) mientras que la anomalía obtenida para la componente Norte el porcentaje es menor al 20% en la mayoría de las capas. El análisis de componentes principales aplicado a las series de anomalías (es decir, a las fluctuaciones respecto a la corriente media vertical) muestra nuevamente un modo principal que explica el 87% de la varianza con poca variación en la vertical.

Estos resultados presentados en extenso para el ADCP1 y en síntesis para el ADCP2 indican principalmente que las corrientes en las distintas capas de la vertical son diferentes entre el fondo, la región intermedia y la superficie, pero su principal modo de variabilidad es un flujo con igual sentido de la corriente en todo el perfil. Ese modo explica los mayores porcentajes de la varianza mostradas en las series pero también existe un segundo modo de variabilidad que estaría indicando una inversión de flujo entre la superficie y el fondo. Estos resultados coinciden con análisis previos simples realizados a estas series de datos (Fossati et al, 2009) donde se indica que un flujo inverso ocurre en la zona entre un 18 y un 22% del tiempo.

Es importante mencionar que es muy cuidadosa la interpretación física de los modos principales obtenidos con el análisis EOF debido a la condición de ortogonalidad de las direcciones principales calculadas que impone el análisis (Richman 1985; Domménget 2002; Wilks, 2006). Aunque la orientación del primer modo principal esta determinada por la dirección de mayor variabilidad de la serie analizada, las subsecuentes direcciones serán ortogonales a las previas independientemente del sentido físico que estén indicando. Debido a esto, para interpretar como modos de variabilidad todos los modos obtenidos es deseable rotar los ejes principales obtenidos a un nuevo sistema menos afectado por el comportamiento artificial que impone la condición de ortogonalidad (Wilks, 2006). De todas formas, la rotación de los mismos no es simple y hay que tener en cuenta ciertas particularidades de los datos que se toman en cuenta.

Actualmente se ha comenzado a trabajar en la rotación de los modos principales obtenidos en este trabajo y por lo tanto aún no se tienen resultados definitivos para presentar en este trabajo. Sin embargo, como los modos principales obtenidos en la mayoría de los análisis EOF realizados explican un gran porcentaje de la varianza de la serie es posible interpretar el comportamiento físico de los primeros modos obtenidos.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el análisis de medidas de corriente en distintas profundidades en dos puntos cercanos a la costa uruguaya sobre Montevideo. Los datos consisten en mediciones cada 30 minutos de la dirección e intensidad de corriente en 22 capas distribuidas en la vertical (ADCP1) y 10 capas para el ADCP2.

En primer lugar a través de un análisis exploratorio se determinaron las principales características de las medidas de corriente en función de la profundidad. En segundo lugar se aplicó el análisis de componentes principales. Entre los resultados obtenidos se destaca que para la componente Este (componente principal de flujo) del ADCP1 se encontró un modo principal que representa el 92% de la varianza. Esto significa que esta serie está vinculada entre fondo y superficie y el modo más habitual lo representa un flujo de igual sentido en toda la vertical con aumento de intensidad del fondo a la superficie. Respecto al ADCP2 los resultados obtenidos también muestran una gran correlación entre las componentes de flujo en las distintas capas de la vertical, habiéndose identificado modos principales que representan el 92% y el 78% de la varianza para la componente Este y Norte, respectivamente.

Los resultados obtenidos muestran un flujo de igual sentido en todo el perfil principalmente, aunque hay eventos con inversión de flujo que deberán ser analizados con más detalle en trabajos futuros. Además, sería interesante investigar la variación de estos parámetros estadísticos entre los distintos bloques de datos que han sido registrados durante diferentes periodos climáticos con el objetivo de identificar variaciones estacionales del comportamiento del perfil de flujo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bellón D. y Piedra-Cueva, I. (2009). Estimating suspended solids concentrations from Acoustic Doppler Current Profiler measurements on the coast of Montevideo, Uruguay. *Proceedings of the 6th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM 2009)*. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

Boschi, E.E., 1988. El ecosistema estuarial del Río de la Plata (Argentina y Uruguay). *An. Inst. Cienc. Mar Limnol., Univ. Nac. Autón., México*, 15(2): pp. 159-182.

CARP. (1992). Comisión Administradora del Río de la Plata, CARP – IMFIA. Corrientes y sedimentos en el Río de la Plata. Comisión Administradora del Río de la Plata.

Dommenget, D. Latif, M. (2002). A Cautionary Note on the Interpretation of EOFs. *Journal of climate*, Volume 15, Issue 2 (January 2002).

Fossati M, Fernandez, M., Piedra-Cueva I. (2008). Modelacion hidrodinamica tridimensional del Rio de la Plata utilizando modelos encajados. *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidraulica*. Cartagena, Colombia.

Fossati M, Bellón D, Lorenzo E, Piedra-Cueva I. (2009). Currents measurements in the coast of Montevideo, Uruguay. *Proceedings of the 6th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM 2009)*. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

FREPLATA. 2004. “Análisis Diagnóstico Transfronterizo del Río de la Plata y su Frente Marítimo”. Documento Técnico. Proyecto Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo. Proyecto PNUD/GEF/RLA/99/G31

Moreira, D., De los Campos, T., Capeluto Ware, A., Guerrero, R., Repecaud, M., Le Bihan, C., Balestrini, C., Firpo, A. y Fossati, M. (2010). Estudio del transporte de sedimentos en el Río de la Plata: campañas oceanográficas. Resumen aceptado para publicacion en el *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidraulica*, Punta del Este, Uruguay.

Preisendorfer R. (1998). Principal component analysis in meteorology and oceanography. Elsevier Science, 425 pp.

Richman, M. (1985). Rotation of principal components. *J. Climatology*, vol 6, pp 293-335.

Simionato, C. G., V. Meccia, W. Dragani, and M. Nunez. (2005). Barotropic tide and baroclinic waves observations in the Rio de la Plata Estuary. *J. Geophys. Res.*, vol 110.

Wilks. (2006). Statistical methods in the atmospheric sciences. Second Edition Department of Earth and Atmospheric Sciences. Cornell University.