

XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA CARTAGENA DE INDIAS COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008

ANÁLISIS DE LA CIRCULACIÓN EN LA BAHÍA DE MONTEVIDEO

Bach. Pablo Santoro, MSc. Ing. Mónica Fossati y Dr. Ing. Ismael Piedra-Cueva

Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, IMFIA. J. Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay

psantoro@fing.edu.uy, mfossati@fing.edu.uy, ismaelp@fing.edu.uy

RESUMEN:

Se utilizó el modelo numérico en elementos finitos bidimensional integrado en vertical RMA-10 para caracterizar la hidrodinámica en la zona de la Bahía de Montevideo y su recinto portuario. Luego de las etapas de calibración y validación, el mismo es capaz de reproducir correctamente las características del campo de corrientes en la zona de estudio utilizando como forzantes principales el caudal fluvial, la marea real y los vientos. Se caracterizó la velocidad en ciertos puntos de control definidos en zonas estratégicas de la Bahía. El análisis simultáneo de las condiciones de flujo en estos puntos permitió identificar seis celdas de circulación con altas frecuencias de ocurrencia en el período de estudio. Además, se realizó un estudio de la influencia de los principales forzantes del sistema, del caudal fluvial descargado en el Río de la Plata, de las mareas astronómicas y meteorológicas y de los vientos. A partir del mismo se identificaron los tipos de circulación asociados a las distintas fases del ciclo de marea, así como también a los distintos vientos que actúan en la zona. Este tipo de análisis es un insumo para estudios ambientales integrados relacionados con contaminación, transporte de sedimentos, etc, que se realizarán en la Bahía de Montevideo.

ABSTRACT:

The RMA-10 code, a two-dimensional vertically integrated hydrodynamic model, was used to characterize the hydrodynamics in the Montevideo's Harbour and Bay. After calibration and validation, the model can reproduce correctly the characteristics of the currents field generated by flow discharges, the astronomical and meteorological tides and winds. The velocity was characterized in certain points of control defined in strategic zones of the Bay. The simultaneous analysis of flow conditions in these points allowed to identify six cells of circulation with high frequencies of occurrence in the studied period. In addition, an influence study of the main forcings of the system: the flow discharges of the Rio de la Plata, the astronomic and meteorological tides and winds, was carried out. From this study, circulation patterns associated with the different phases of the tidal cycle and associated with different winds directions, were identified. This type of analysis is an input for environmental integrated studies related with pollution, transport of sediments, etc, that will be conducted for Montevideo's Bay.

PALABRAS CLAVES:

Modelación numérica, Bahía de Montevideo, celdas de circulación

INTRODUCCIÓN

La Bahía de Montevideo y sus alrededores es una de las zonas más importantes de la ciudad de Montevideo, ya sea por su importancia histórica en el desarrollo residencial de la ciudad o por ser el lugar donde se ubica el principal puerto del Uruguay junto con una gran cantidad de desarrollos industriales. En los últimos años, el puerto ha aumentado considerablemente su actividad y por ende ha crecido la demanda de espacios para terminales de contenedores. En este marco, varios proyectos comenzaron a gestarse en la zona portuaria y alrededores, por lo que la Administración Nacional de Puertos (ANP) realizó algunos estudios de la Bahía de Montevideo con el objetivo de alcanzar una evaluación ambiental de la misma, para posteriormente analizar distintos escenarios de funcionamiento según los proyectos e ideas que se han desarrollado para la Bahía de Montevideo y zona portuaria.

Este trabajo tiene como objetivo caracterizar la hidrodinámica en la zona de la Bahía de Montevideo y el recinto portuario, comprender la influencia de los diferentes forzantes que actúan sobre el movimiento de las aguas así como la identificar las principales celdas de flujo en la zona. Para la consecución de dicho objetivo fue implementado en la zona de interés el modelo numérico hidrodinámico RMA-10 (King, 1993). Dicha implementación tomó en cuenta la experiencia desarrollada durante varios años en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República Oriental del Uruguay, fruto de diversas tareas de investigación y de modelación del Río de la Plata y su Frente Marítimo. El más desarrollado ha sido precisamente el conjunto de modelos RMA, incluyendo el modelo hidrodinámico bidimensional integrado en vertical RMA-2, el modelo hidrodinámico baroclínico tridimensional RMA-10 y el modelo de transporte de sustancias RMA-11. Aplicaciones de estos modelos hidrodinámicos en su variante bidimensional se han utilizado en diferentes ocasiones, mostrando una excelente capacidad de simulación, para estudiar aspectos específicos de la circulación en el Río de la Plata (Piedra-Cueva & Fossati, 2006); para investigar el comportamiento del campo de salinidades y su variación estacional (Fossati & Piedra-Cueva, 2004); y para realizar el estudio de la pluma de descarga de emisarios en dicho cuerpo de agua (Piedra-Cueva et al, 2002).

MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DEL RÍO DE LA PLATA

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO RMA-10

Para simular en detalle las características hidrodinámicas en la zona de Montevideo es necesario representar correctamente las variaciones topográficas y de la línea de costa en la misma. Sin embargo de acuerdo a los resultados obtenidos en los trabajos de modelación numérica realizados en el IMFIA, para representar correctamente las características de dicha zona particular es necesario también simular el flujo en todo el Río de la Plata y en el Frente Marítimo. De esta forma el dominio de cálculo definido incluye desde la desembocadura de los principales afluentes, los ríos Paraná y Uruguay en su borde Oeste, hasta los 3.000 m de profundidad de la plataforma continental en el Océano Atlántico. En la Figura 1 (Izq.) se presenta la configuración horizontal de la malla en elementos finitos utilizada, la misma fue estructurada sobre la base de un sistema coordenado Este-Oeste y Norte-Sur a partir de los contornos y de los datos batimétricos digitalizados. En dicha figura se observa que la malla está formada por elementos triangulares de tamaño variable según la precisión en el cálculo requerida para las diferentes zonas del dominio de cálculo. En total se tienen 7.462 elementos y 15.526 nodos, presentando tamaños que varían de 10 Km en la frontera oceánica a 50m en el interior de la bahía.

La batimetría del dominio de cálculo se confeccionó a partir de información cartográfica correspondiente a las cartas náuticas del Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA) para el Río Uruguay, el Río de la Plata y la plataforma continental. La Figura 1

(Der.) se presenta un detalle de la batimetría de la Bahía de Montevideo. En la misma se observa claramente la representación en el modelo de las zonas más profundas correspondiente a las distintas partes del Puerto, el canal de La Teja, la zona costera y playas con profundidades menores a 1 m.

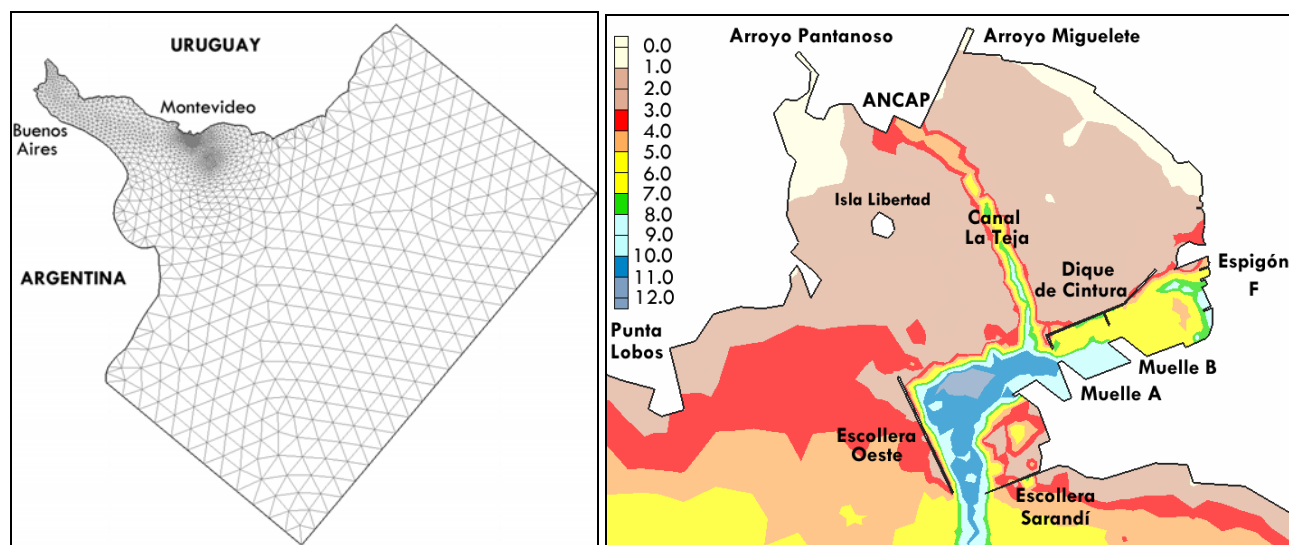


Figura 1.- Malla en elementos finitos utilizada en la modelación (Izq.); batimetría (m) en la zona de la Bahía de Montevideo y recinto portuario (Der.).

En este caso se ha considerado que las variaciones en el dominio de cálculo de la densidad del agua están dadas únicamente por variaciones de la salinidad, motivo por el cual en la ecuación de estado se han considerado constantes la temperatura y la concentración de sedimento.

Las simulaciones realizadas tuvieron como forzantes los caudales correspondientes a aportes fluviales, la marea real y el viento, todos ellos variables en el tiempo. Los aportes fluviales en el caso del Río de la Plata esencialmente son las descargas de los ríos Paraná y Uruguay. Además por el interés en la modelación de la circulación en la Bahía de Montevideo se debe tener en cuenta el caudal aportado por los arroyos Miguelete y Pantanoso. El ingreso del flujo exterior del Océano Atlántico a través de la frontera oceánica del modelo se especifica a partir de la elevación de la superficie libre. En este caso se consideró en dicha frontera un valor constante de salinidad a lo largo de todo el período de simulación igual a 38 ppm.

Dependiendo de las condiciones que se quieren representar en cada simulación, el nivel impuesto en la frontera oceánica se calcula diferente. Las simulaciones considerando como uno de los forzantes la marea astronómica tienen como condición de borde en la frontera oceánica los niveles que surgen de la superposición las componentes armónicas principales de la marea, M2, O1, Q1, N2 y S2 para el período de tiempo seleccionado. Cuando se considera la marea real como uno de los forzantes se ingresan las series de registros reales de niveles en los nodos correspondientes a las estaciones de Mar del Plata y en La Paloma. A partir de dichos niveles reales se calcula el residuo respecto a los niveles determinados por marea astronómica, luego el mismo se distribuye linealmente a lo largo de toda la frontera oceánica.

En este trabajo el viento se considera uniforme en todo el dominio de cálculo ya que no se cuenta con información de vientos suficiente para representar su variación espacial. Se utilizaron datos de vientos registrados cada tres horas en la estación meteorológica de Punta Brava por el Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA).

El modelo requiere una condición inicial para las variables del sistema, es decir, para la elevación de la superficie libre, para la velocidad y para la salinidad. La condición inicial para la elevación de

la superficie es un valor uniforme en todo el dominio de cálculo igual a 0,91 m, mientras que para el campo de velocidades la condición inicial considerada es el reposo. Para la condición inicial de salinidad se utilizó una condición inicial ficticia y se realizó una simulación previa del sistema lo suficientemente larga como para independizarse de la misma.

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Una vez definida la malla de cálculo, las condiciones de borde, la batimetría del sistema, etc, se realizó la calibración hidrodinámica del modelo. El período de tiempo simulado a los efectos de realizar el proceso de calibración es el comprendido entre agosto de 2003 y marzo de 2004, aunque el ajuste de los parámetros se realizó para el período febrero y marzo de 2004. Los meses anteriores deben simularse para independizarse de la condición inicial establecida, principalmente de la condición impuesta al campo salino. La comparación de los valores medidos y modelados de velocidades de corriente y niveles, a partir de la cual se realiza el ajuste, se realizó solamente durante los meses de febrero y marzo 2004. Realizada la calibración del modelo se validó el mismo, para ello se simuló el mes de abril de 2004. Nuevamente la simulación de dicho período se realizó considerando como forzantes del sistema al caudal fluvial, la marea real y los vientos.

Para la comparación de niveles se utilizaron los registros de las estaciones mareográficas de La Paloma, Montevideo, Colonia y Buenos Aires, definiendo cinco puntos de control en la malla de cálculo representativos de las mismas. La comparación de corrientes se basó en datos de mediciones directas de la velocidad de corriente realizadas en dos puntos frente a la costa de Montevideo. Las mismas se realizaron en colaboración con el Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA) utilizando un perfilador de corriente acústico, el mismo permitió obtener un conjunto de valores de módulo, dirección y componentes Norte, Este y Vertical de la corriente. A modo de ejemplo se presenta en la Figura 2 la comparación de corrientes medidas y modeladas. Los resultados obtenidos muestran que el modelo es capaz de reproducir correctamente las características del campo de corrientes en la zona de estudio, utilizando como forzantes principales el caudal fluvial, la marea real y los vientos.

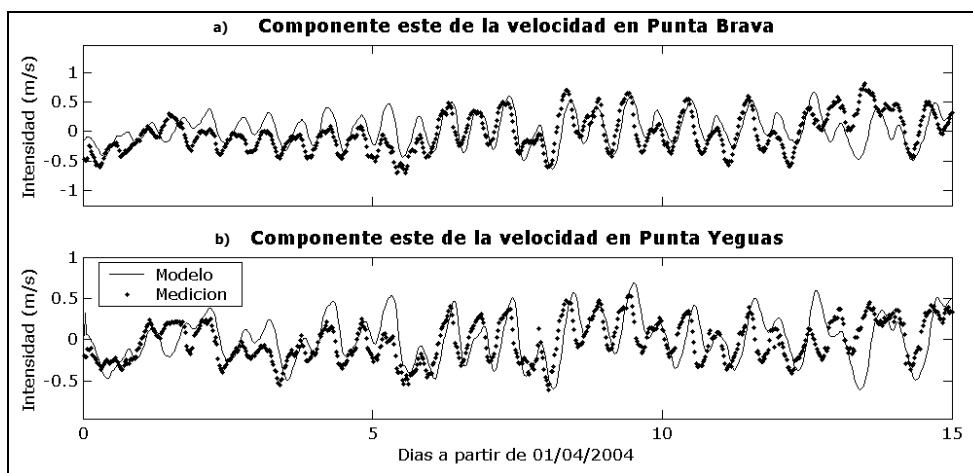


Figura 2.- Comparación de la componente Este de la velocidad medida y modelada en (a) Punta Brava y (b) Punta Yeguas durante los primeros 15 días de abril de 2004.

ESTUDIO DE LA CIRCULACIÓN EN LA BAHÍA DE MONTEVIDEO

Una vez calibrado y validado, el modelo numérico permite obtener información cuasi continua sobre las corrientes integradas en vertical en la Bahía de Montevideo y su recinto portuario. Esta información constituye la base de datos a ser utilizada en los análisis tendientes a caracterizar la circulación general en la Bahía. Los análisis llevados a cabo incluyen una caracterización de la corriente en ciertos puntos estratégicos de la bahía, la identificación de patrones o celdas

preferenciales de circulación en la Bahía y por último la evaluación de la influencia de los distintos forzantes considerados en la modelación.

CORRIENTES EN LA BAHÍA

Tanto este estudio como el de identificación de celdas de circulación se basan en los resultados de la simulación de un período de tres meses (febrero - abril de 2004), el mismo puede considerarse representativo de condiciones medias en la zona ya que los caudales fluviales, vientos y mareas durante ese período presentaron fluctuaciones normales y esperadas para la zona. Para el análisis fueron definidos varios puntos de control ubicados en zonas estratégicas de la Bahía y el recinto portuario, la Figura 3 muestra la ubicación y el nombre asignados a los mismos.

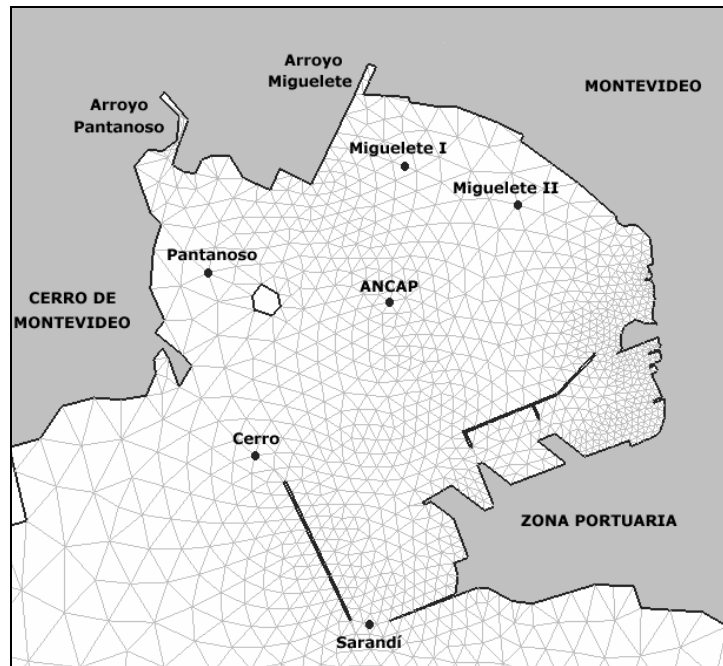


Figura 3.-Ubicación de los puntos de control utilizados para el análisis de la circulación en la Bahía.

Se determinaron ciertos parámetros estadísticos básicos como la intensidad media y máxima de las corrientes en cada punto, el cálculo de la curva de frecuencia de excedencia según la intensidad de la corriente, y las direcciones principales de flujo. A modo de ejemplo se resumen en Las Tablas 1 y 2 resumen los resultados de la distribución direccional del flujo y sus intensidades medias.

Tabla 1.- Distribución direccional del flujo para los puntos de control seleccionados.

Punto de Control	% de Frecuencia de Ocurrencia							
	Norte	Noreste	Este	Sureste	Sur	Suroeste	Oeste	Noroeste
Cerro	15,5	27,5	9,5	3,8	6,0	23,2	8,3	6,2
Sarandí	23,0	1,9	1,1	4,9	41,5	2,6	3,6	21,5
Miguelete I	1,3	19,0	36,3	4,9	4,3	13,5	18,8	1,9
Miguelete II	2,6	1,5	7,6	38,8	7,9	5,6	15,1	21,0
Pantanoso	33,2	4,5	1,8	3,0	45,8	9,6	1,0	1,1
Canal ANCAP	15,2	6,4	10,7	19,0	4,8	2,6	5,9	35,4

Tabla 2.- Intensidades medias por direcciones en los puntos de control seleccionados.

Punto de Control	Intensidad Media (cm/s)							
	Norte	Noreste	Este	Sureste	Sur	Suroeste	Oeste	Noroeste
Cerro	8,1	11,4	6,8	4,3	5,6	9,8	5,6	5,2
Sarandí	12,1	2,6	1,7	4,4	15,9	4,3	6,0	16,6
Miguelete I	0,9	2,9	2,7	1,1	0,9	2,6	4,1	1,0
Miguelete II	1,9	1,9	3,4	4,2	2,6	2,1	4,8	6,0
Pantanoso	3,3	1,1	0,6	1,0	4,7	4,4	0,7	0,7
Canal ANCAP	4,5	2,6	4,1	6,4	3,7	2,4	3,1	8,2

CELDA DE CIRCULACIÓN

Metodología

La identificación de las principales celdas de circulación del flujo en la Bahía de Montevideo se llevo a cabo mediante el análisis simultáneo del flujo en los puntos de control antes presentados. De esta forma se, calculó el porcentaje de tiempo asociado a las distintas combinaciones de flujo entre dichos puntos. A los efectos de clasificar el flujo en cada punto fueron consideradas las direcciones principales identificadas en el punto anterior. La Figura 4 (Izq.) presenta en forma de rosa la distribución direccional del flujo en cada punto de control (Tabla 1), a partir de estas información se define el criterio de clasificación del flujo empleado en cada punto de control, Figura 4 (Der.). A su vez en puntos que presentan intensidades bajas, como por ejemplo Miguelete I, se descartaron para el análisis las intensidades menores a 0,5 cm/s por no ser representativas de una configuración de flujo relevante.

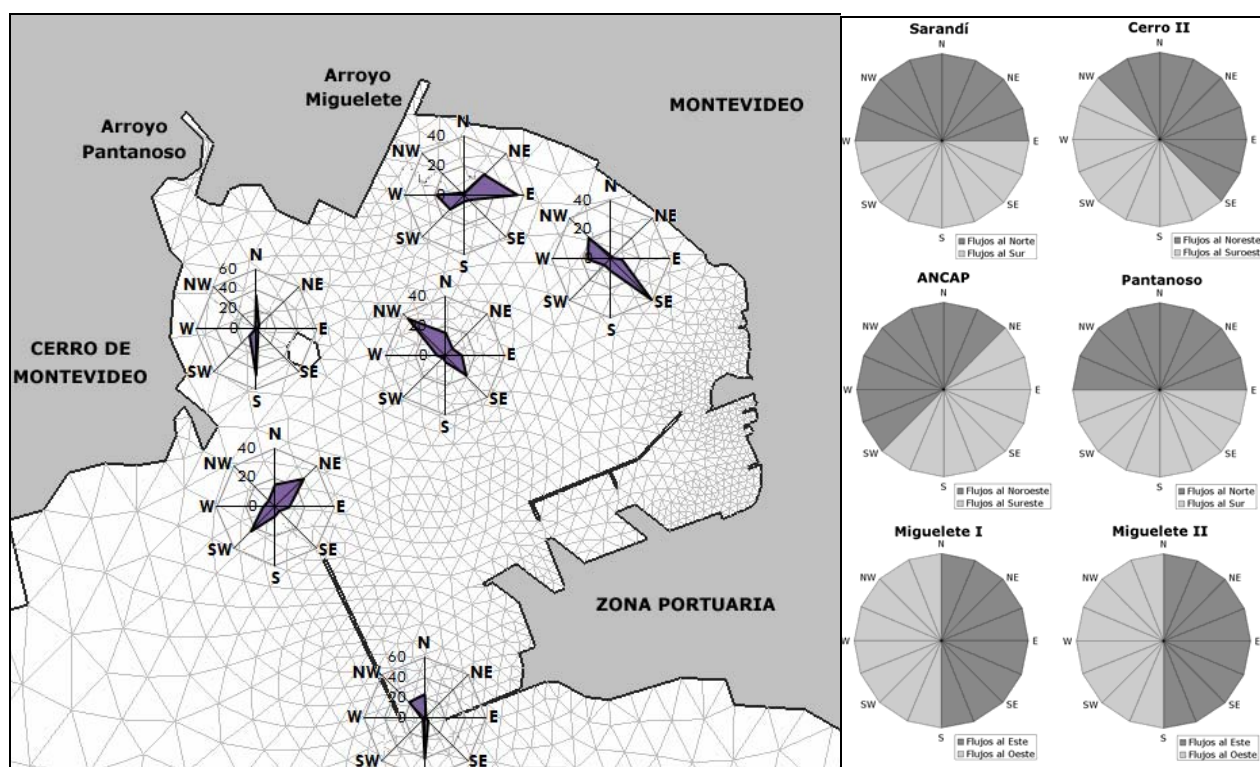


Figura 4.- Distribución direccional del flujo en cada punto de control (Izq.), criterio de clasificación del flujo adoptado en cada punto de control (Der.).

El análisis de simultaneidad del flujo puede dividirse en dos niveles, el primero de ellos considera el flujo únicamente en los puntos de control Cerro y Sarandí. Este primer nivel brinda una idea general de las condiciones de flujo en la frontera de la Bahía y a partir del mismo se identificaron dos configuraciones con alta frecuencia de ocurrencia. Teniendo esto en cuenta, el segundo nivel de análisis se enfoca en las configuraciones de flujo en el interior de la Bahía para lo cual fueron considerados los puntos de control Pantanoso, ANCAP, Miguelete I y Miguelete II.

Resultados

Los resultados correspondientes al primer nivel de simultaneidad muestran dos celdas de circulación que representan el flujo el 80% del tiempo. La primera de ellas se denominó **Tipo A** y representa una condición flujo entrante a la Bahía por la zona del canal de acceso (Punto Sarandí) y saliente por la zona del Cerro (Punto Cerro), teniendo asociada una frecuencia de ocurrencia de

35,4%. La segunda celda de circulación es la del flujo inverso a la anterior, que se denominó **Tipo B** y se presenta el 44,5% del tiempo.

En el caso de la celda Tipo A el segundo nivel de exigencia permitió identificar dos configuraciones relevantes. Por un lado se tiene la que se denominó celda **Tipo A-1** que presenta un flujo hacia el Noroeste por la zona de ANCAP, hacia el Sur en Pantanoso y hacia el Este en Miguelete I, representando la misma un 16,1% del tiempo. Por otra parte se definió la celda **Tipo A-2** como aquella que presenta iguales características a las de la celda tipo A-1 salvo en Miguelete I, siendo la corriente en dicho punto hacia el Oeste. Esta celda tiene asociado una frecuencia de ocurrencia de 12,7%. Para la configuración Tipo A-1 se observó en muchos casos la coexistencia de un vórtice de sentido horario en el fondo de la Bahía y uno de sentido antihorario en la zona del dique de cintura. La amplitud de cada uno de ellos está relacionada a la intensidad del flujo que los genera, en el caso del primero de ellos es el flujo por el Canal la Teja mientras que para el segundo es el flujo entre el dique de cintura y el espigón F. De esta forma, según las condiciones que se tengan en determinado instante predominará uno u otro vórtice y a los efectos de identificar dichas configuraciones se agregó al análisis la condición de flujo en el punto Miguelete II. La configuración en la que el flujo en dicho punto tiene dirección Oeste se denominó Celda **Tipo A-1-a**, la cual presenta una frecuencia de ocurrencia de 10,7%, mientras que la condición de flujo con dirección Este, denominada Celda **Tipo A-1-b**, presenta una frecuencia de ocurrencia de 5.4%. La Figura 5 presenta ejemplos de los campos de corrientes en instantes en que se presenta cada una de las celdas Tipo A descritas anteriormente, mientras que la Figura 6 muestra un esquema de cada una.

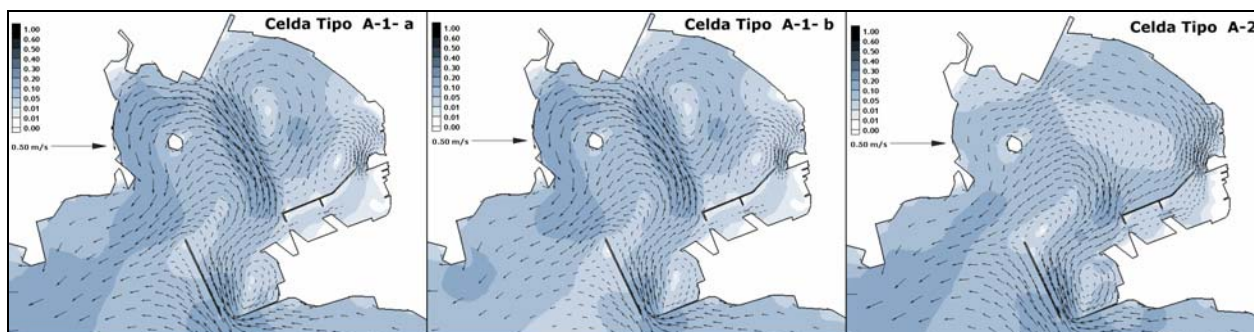


Figura 5.- Campos de corrientes correspondientes a las celdas tipo A.

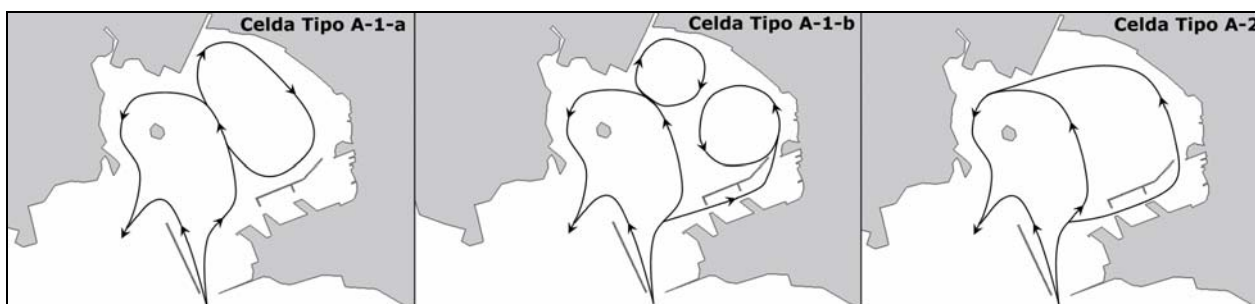


Figura 6.- Esquematización de las celdas Tipo A.

El análisis bajo el segundo nivel de exigencia para la celda Tipo B permitió identificar tres configuraciones relevantes por su frecuencia de ocurrencia. La denominada celda **Tipo B-1** corresponde a una distribución espacial de flujo saliente del fondo de la Bahía por el canal ANCAP, hacia el Norte en Pantanoso y hacia el Este en la zona de Miguelete I, presentándose un 13,8% del tiempo. A su vez la configuración que presenta un flujo saliente por ANCAP, hacia el Norte por Pantanoso, y hacia el Oeste en Miguelete fue definida como Celda **Tipo B-2**, teniendo asociada una frecuencia de ocurrencia del 9%. Por último la llamada celda **Tipo B-3** se caracteriza por un flujo entrante por el canal de ANCAP, hacia el Sur en Pantanoso y hacia el Este en Miguelete, y presenta una frecuencia de ocurrencia de 10%. En la Figura 7 se presentan ejemplos de los campos de

corrientes en instantes correspondientes a celdas Tipo B y en la Figura 8 se muestra un esquema del flujo en las mismas.

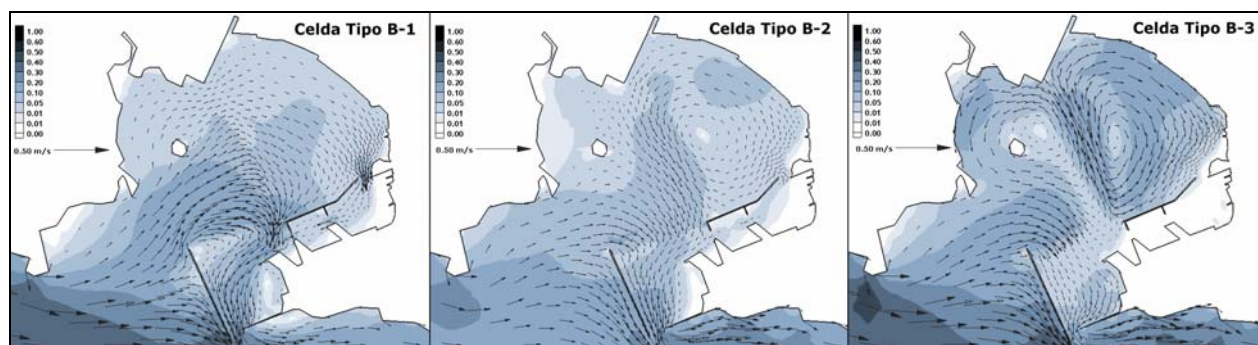


Figura 7.- Campos de corrientes correspondientes a las celdas Tipo B.

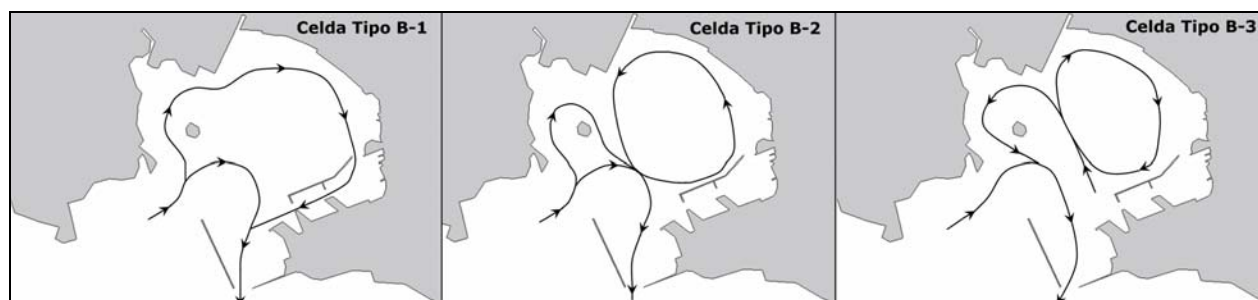


Figura 8.- Esquematzación de las celdas Tipo B.

En síntesis fueron identificadas seis celdas de circulación características que explican en total la circulación que ocurre en la mayor parte de la Bahía de Montevideo el 62% del tiempo. La Tabla 3 resume las características de cada una de ellas y sus respectivas frecuencias de ocurrencia.

Tabla 3.- Celdas de circulación identificadas, condiciones de flujo en cada punto y frecuencia de ocurrencia.

Celda	Dirección del flujo						Frecuencia
	Cerro	Sarandí	ANCAP	Pantanosos	Miquelete I	Miquelete II	
A-1-a	SW	N	NW	S	E	E	10,7%
A-1-b	SW	N	NW	S	E	W	5,4%
A-2	SW	N	NW	S	W	-	12,7%
B-1	NE	S	SE	N	E	-	13,8%
B-2	NE	S	SE	N	W	-	9%
B-3	NE	S	NW	S	E	-	10%

INFLUENCIA DE LOS FORZANTES

Metodología

El objetivo en este análisis es estudiar la influencia que tienen los diferentes forzantes que actúan en el sistema sobre la circulación de agua en la Bahía. En el sistema estuarino del Río de la Plata los principales forzantes que determinan el flujo son el caudal fluvial proveniente de los tributarios, las ondas de marea astronómica y meteorológica que ingresan por la frontera oceánica, y los vientos que actúan localmente. La complejidad en la interacción de estos factores y procesos en el Río de la Plata, y en la Bahía de Montevideo, hacen que sea importante la realización de un análisis de este tipo. El modelo numérico implementado en este trabajo es una herramienta de estudio que permite variar las condiciones del sistema y los forzantes que intervienen en el mismo para poder analizar separadamente el efecto que tiene cada uno de los forzantes. Aunque éste es un sistema no lineal, de todas formas se pueden deducir algunos aspectos interesantes cuando se modela la zona de interés eliminando determinados forzantes.

Utilizando el modelo se estudio la influencia sobre la circulación en la Bahía de Montevideo de tres forzantes: el caudal descargado por el Río de la Plata, las mareas que provienen del Océano y los vientos que soplan localmente. En el primer análisis se simularon tres escenarios distintos, correspondientes a diferentes caudales descargados por los ríos Paraná y Uruguay al Río de la Plata, representando situaciones de caudal fluvial alto, medio y bajo. En estos casos se consideró también el aporte de los arroyos Miguelete y Pantanoso que descargan directamente en la Bahía de Montevideo, analizando también la influencia de éstos sobre la circulación general. En el segundo análisis se realizó un estudio de la circulación en la Bahía de Montevideo y en el recinto portuario generada por la marea astronómica. Sin embargo, las variaciones del nivel del río que produce la marea astronómica son menores a las grandes perturbaciones que pueden generar la acción de los vientos y las ondas de plataforma, y por eso se analizó también el efecto de la marea meteorológica. Por último, se analizó la influencia de los vientos característicos de la zona sobre las corrientes en la Bahía de Montevideo. En la Tabla 4 se presentan las características de las distintas simulaciones realizadas. Las simulaciones denominadas C-8, M-1, M-2 y V-9 están marcadas en la Tabla porque corresponden a simulaciones realizadas con forzantes reales, es decir, con valores de caudales, mareas y vientos medidos durante el periodo de tiempo febrero, marzo y abril de 2004.

Tabla 4.- Características de las simulaciones realizadas para estudiar la influencia de los forzantes.

CASO	FORZANTE ANALIZADO	DESCARGA RIO PLATA	DESCARGA ARROYOS	MAREA ASTRONOMICA	MAREA METEOROLOGICA	VIENTOS
C-1	Caudal Fluvial	Caudal Bajo	SI	NO	NO	NO
C-2		Caudal Medio				
C-3		Caudal Alto				
C-4		Caudal Bajo	NO			
C-5		Caudal Medio				
C-6		Caudal Alto				
C-7		NO	SI			
C-8	Caudal Real					
M-1	Marea Astronomica	Caudal Real	SI	SI	NO	NO
M-2	Marea Meteorologica				SI	
V-1	Vientos	Caudal Medio	SI	NO	NO	Norte
V-2						Noreste
V-3						Este
V-4						Sureste
V-5						Sur
V-6						Surroeste
V-7						Oeste
V-8						Noroeste
V-9					SI	SI

Los valores de caudales medios y extremos característicos del Río de la Plata fueron determinados por el Instituto Nacional de Agua Argentino (INA) para el Proyecto Freplata (Menéndez & Jaime, 2002) y se presentan en la Tabla 5. A través del río Paraná (divido en sus dos brazos Paraná Las Palmas y Paraná Guazú) y el río Uruguay proviene más del 97% del ingreso de agua dulce al Río de la Plata, siendo la descarga media aproximadamente 22.000 m³/s. La descarga de los arroyos Pantanoso y Miguelete es mucho menor pero se incluye en varias simulaciones ya que afecta directamente al flujo en la zona de interés. El aporte de estos arroyos se representó a través de sus caudales medios, siendo éstos 0,54 m³/s y 1,59 m³/s respectivamente. En todos los escenarios analizados los aportes mencionados se consideraron constantes, así como también el nivel de la superficie libre en la frontera oceánica. A los efectos de filtrar fluctuaciones numéricas y poder comparar los resultados obtenidos en las simulaciones C-1 a C-7, se promediaron los resultados durante un día de la simulación.

La marea astronómica ingresa desde el Océano Atlántico y afecta a todo el Río de la Plata con un régimen de mareas semidiurno con desigualdades diurnas. Las variaciones del nivel del río que produce la marea astronómica son menores a las grandes perturbaciones que pueden generar la acción de los vientos y las ondas de plataforma, y por eso en los casos M-2 y V-9 se incluye el

efecto de la marea meteorológica además del de la marea astronómica.

Tabla 5.- Caudales de descarga del Río de la Plata.

Caudal fluvial (m ³ /s)	Paraná las Palmas	Paraná Guazú	Uruguay	Total
Medio	4050	13600	4650	22300
Alto	6800	22800	10400	40000
Bajo	3000	10200	1800	15000

Para representar el efecto de todos los vientos se realizó una modelación para cada una de las ocho direcciones principales del mismo: Norte, Noreste, Este, Sureste, Sur, Suroeste, Oeste y Noroeste. De esta forma se analizó la influencia del viento característico de cada dirección principal sobre el Río de la Plata y la Bahía de Montevideo. La intensidad media correspondiente a cada dirección fue determinada a partir de un análisis de los vientos medidos en Punta Brava entre los años 1995 y 2000 durante estudios previos realizados en el IMFIA. Estos valores de intensidad media se presentan en la Tabla 6, y son los que se ingresan en cada modelación como intensidad del viento constante en el tiempo y uniforme en el dominio de cálculo.

Tabla 6.- Intensidad media del viento para las ocho direcciones consideradas.

Dirección	Velocidad media (m/s)
Norte	5,4
Noreste	6,0
Este	6,8
Sureste	6,7
Sur	7,0
Suroeste	7,6
Oeste	5,9
Noroeste	5,3

Resultados Caudal Fluvial

La descarga de los arroyos Miguelete y Pantanoso genera en la Bahía de Montevideo una circulación del Tipo A-1-a, con intensidades entre 1 y 5 cm/s en la mayor parte de la Bahía (Caso C-7). La circulación obtenida agregando a la descarga de los arroyos la condición de caudal fluvial del Río de la Plata bajo es muy similar a la obtenida sin este aporte, lo que significa que caudales bajos del Río de la Plata casi no afectan el flujo en la Bahía de Montevideo. En el caso de un escenario con aporte fluvial medio, el ingreso de agua a la Bahía disminuye observándose intensidades casi nulas en gran parte de la misma. Aún así el patrón de circulación que se identifica se corresponde con una celda Tipo B-3, mostrando el vórtice en el fondo de la bahía intensidades menores a 1 cm/s. Por último cuando el aporte fluvial es mayor, correspondiente a una situación de caudal extremo alto, se observa una rotación del flujo en las bocas de la Bahía respecto a la situación de caudal fluvial bajo, esto es, una celda del Tipo B-3. En este caso se siguen manteniendo intensidades máximas de entre 5 y 10 cm/s en la zona exterior de la Bahía e intensidades entre 1 y 5 cm/s en el fondo. En definitiva estos resultados muestran que la influencia de la descarga de los arroyos sobre la circulación en la Bahía de Montevideo es importante, y que para condiciones de caudales del Río de la Plata medios a altos ésta circulación se modifica y puede invertirse, pasando de Tipo A-1-a a tipo B-3. En la Figura 9 se presentan algunas de las circulaciones obtenidas en la Bahía de Montevideo y en el recinto portuario para distintas condiciones de caudal fluvial.

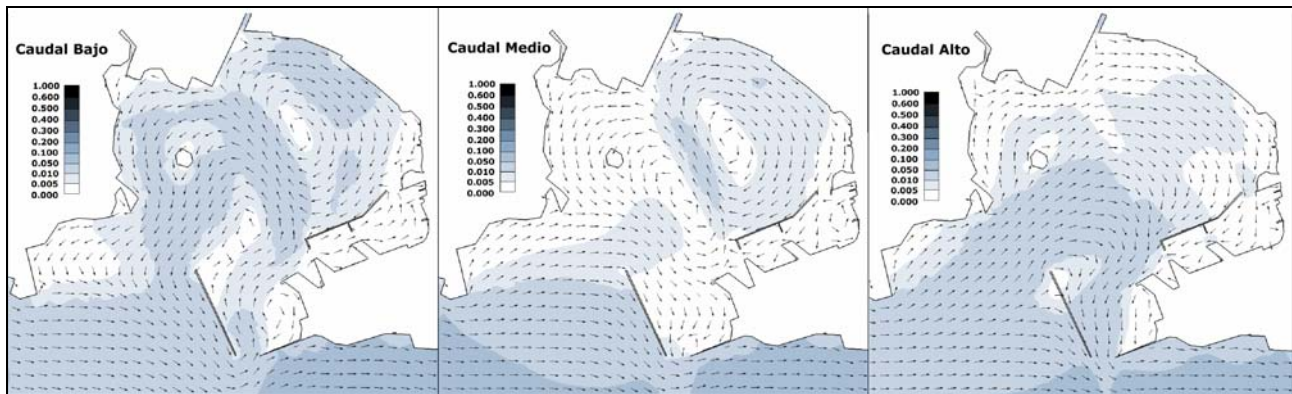


Figura 9.- Campos de corrientes obtenidos considerando un valor de caudal fluvial bajo, medio y alto, como único forzante del sistema.

Resultados Marea Astronómica

A partir de la simulación M-1 se determinó la circulación que se genera en la Bahía durante las principales etapas del ciclo de marea. En la Figura 10 se muestra la variación temporal de la elevación de la superficie libre en la costa de Montevideo correspondiente al mes de febrero de 2004, obtenida con el modelo utilizando como únicos forzantes el caudal fluvial y la marea astronómica. El ciclo de la componente principal de marea tiene una duración aproximada de 12,5 hs; pero considerando las demás componentes el ciclo completo tiene una duración de 25 hs aproximadamente. A partir de las fluctuaciones del nivel astronómico calculado en Montevideo se seleccionó un ciclo completo de la marea y se analizaron las circulaciones generadas en la Bahía durante determinados instantes del mismo (Figura 10). En la Figura 11 se presentan los campos de corriente en la Bahía de Montevideo obtenidos con el modelo durante las diferentes etapas del ciclo de marea. A partir de esos campos de corriente es posible comprender como es el movimiento de las aguas en la Bahía generado por las fluctuaciones astronómicas.

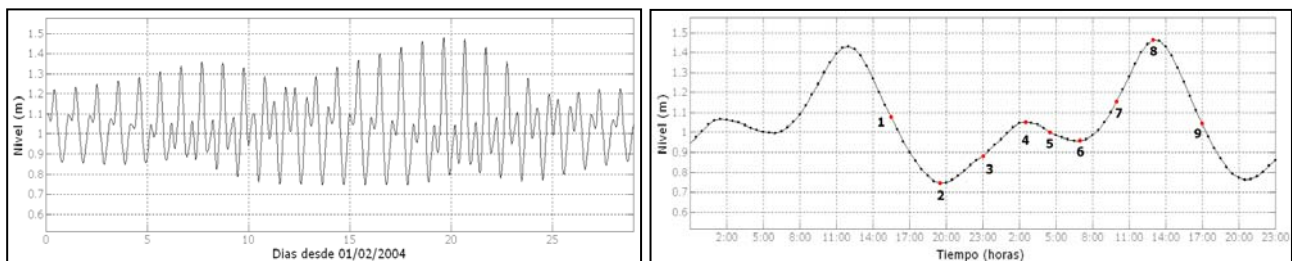


Figura 10.- Variación temporal de la elevación de la superficie libre en Montevideo generada por la marea astronómica durante febrero de 2004 (izquierda); Ciclo de nivel astronómico con los diferentes instantes seleccionados (derecha).

Instante 1: Inicio del ciclo considerado. Marea decreciente. Flujo corresponde a celda Tipo B-1.

Instante 2: Marea baja, aproximadamente 4 horas después del inicio del ciclo. Flujo similar al instante 1, Tipo B-1, con una circulación marcada en sentido horario y con velocidades en general menores a las del instante 1, casi nulas en la zona del fondo de la Bahía y en la zona de las dársenas.

Instante 3: Marea creciente. Flujo se invirtió respecto al instante 2. Corrientes muy bajas en la zona costera de la Bahía y en el recinto portuario. Flujo se corresponde con una celda del Tipo A.

Instante 4: Nivel máximo intermedio, aproximadamente 11 horas después del inicio del ciclo. Flujo Tipo B-1, lo que significa que hubo una inversión del flujo entre el instante 3 y el instante 4.

Instante 5: Descenso del nivel de marea. Se mantienen los principales flujos en la Bahía (celda Tipo B-1) pero con mayores intensidades en la zona exterior de la Bahía.

Instante 6: Mínimo intermedio de nivel. El flujo se invierte en relación al instante 5 y es Tipo A-1.

Instante 7: Etapa de marea creciente. Flujo continua siendo del Tipo A, con ingreso por la boca menor de la Bahía con mayores intensidades que en el instante anterior.

Instante 8: Nivel de marea alta. Intensidades bajas debido a los menores gradientes de nivel. Inversión de flujo respecto al instante 7, siendo ahora el flujo Tipo B-3.

Instante 9: Fin del ciclo, a las 25,5 hs aproximadamente del inicio, y es el comienzo de uno nuevo, por lo que representa la misma situación que el instante 1. Se observan corrientes altas debido a los máximos gradientes de nivel durante la bajante, con un flujo Tipo B.

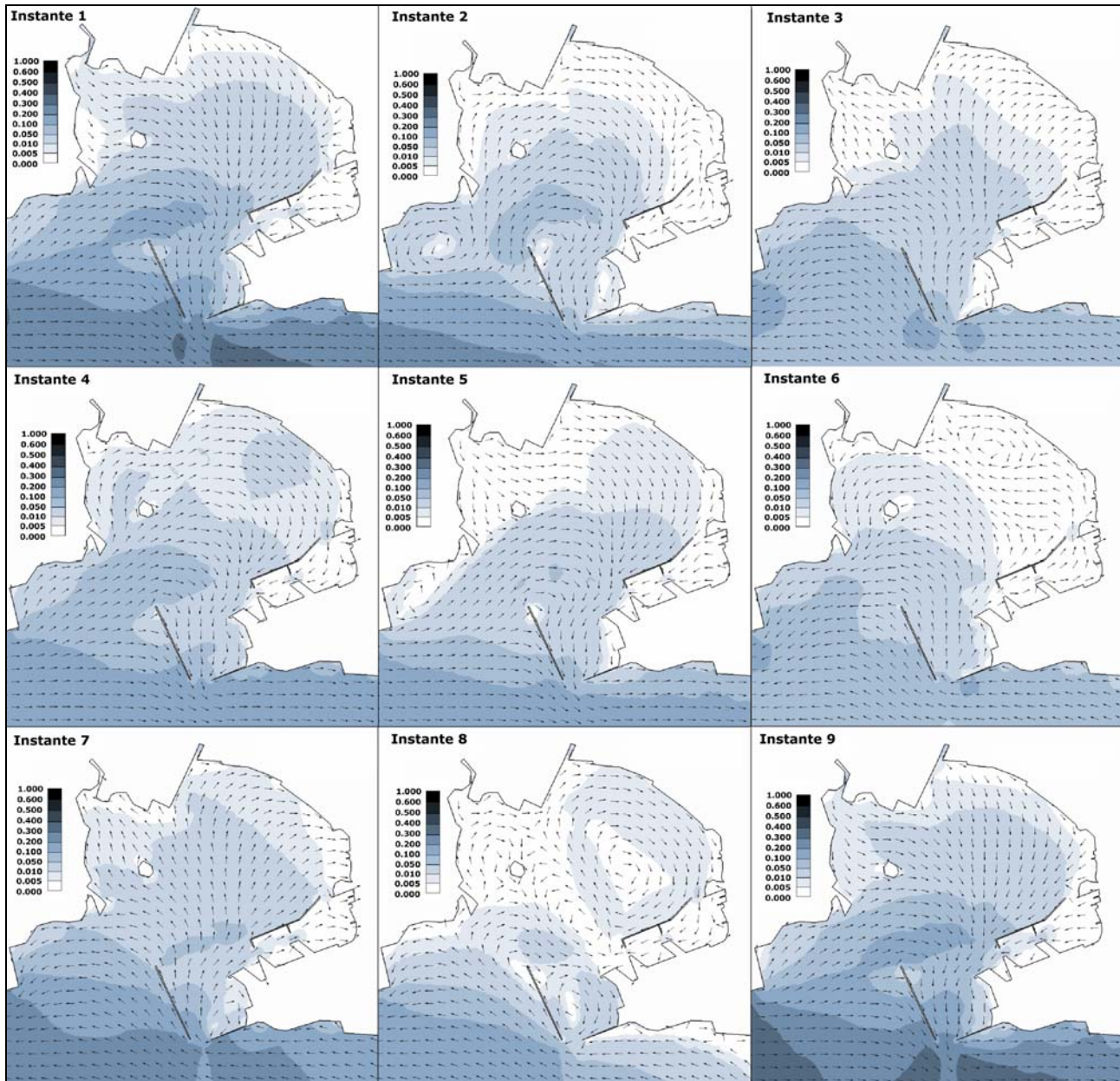


Figura 11.- Variación temporal de la circulación en la Bahía de Montevideo durante el ciclo de marea. Instantes del 1 al 9. Intensidades en m/s.

En el ciclo de marea completo ocurren entonces cuatro rotaciones del flujo en la zona de ingreso a la Bahía. En general cuando la marea crece el flujo ingresa a la bahía por el canal de acceso y cuando se da la bajante el flujo ingresa por el Cerro. Las mayores intensidades ocurren con los mayores gradientes de nivel, y las menores cuando se alcanzan los máximos de nivel. Este ciclo además tiene una fluctuación bimensual, determinada por la marea viva y muerta, correspondientes a mareas altas mínimas y máximas, respectivamente. Esto genera que las corrientes sean mayores a medida que ocurre la marea viva, y menores cuando se da la marea muerta.

Resultados Vientos

Los resultados de cada una de las 8 modelaciones muestran que las distribuciones de velocidades iniciales se ven afectadas por los distintos vientos. El campo de velocidades empieza a variar en función del viento durante las primeras horas de cada simulación y luego alcanza un estado casi estacionario a medida que aumenta la duración del viento, a partir aproximadamente de las 20 horas, dependiendo de la dirección y de la intensidad. Esta distribución de velocidades que se alcanza cuando cierto viento sopla sobre la costa de Montevideo durante un cierto intervalo de tiempo es la que muestra el efecto de cada uno de los vientos sobre el campo de corrientes. Para poder observar y analizar el efecto de cada viento, se compara el campo de corrientes obtenido luego de 48 horas de cada simulación con el campo de corrientes inicial, correspondiente a la situación de caudal fluvial medio constante presentado en la Figura 9. En la Figura 12 se presentan los campos de corrientes obtenidos cuando sobre el Río de la Plata actúan los vientos antes presentados. Se observa que los vientos del *Sureste* generan una circulación de Tipo A, mientras que los vientos del *Sur*, *Suroeste* y *Oeste* generan en cambio un flujo entrante a la Bahía por el Cerro y saliente a la misma por Sarandí, es decir, un flujo Tipo B. Los vientos *Noroeste*, *Norte*, *Noreste* y *Este*, invierten el flujo en las bocas de la Bahía respecto a la condición inicial, generando un flujo entrante por la escollera Sarandí y saliente por la boca del Cerro, Tipo A.

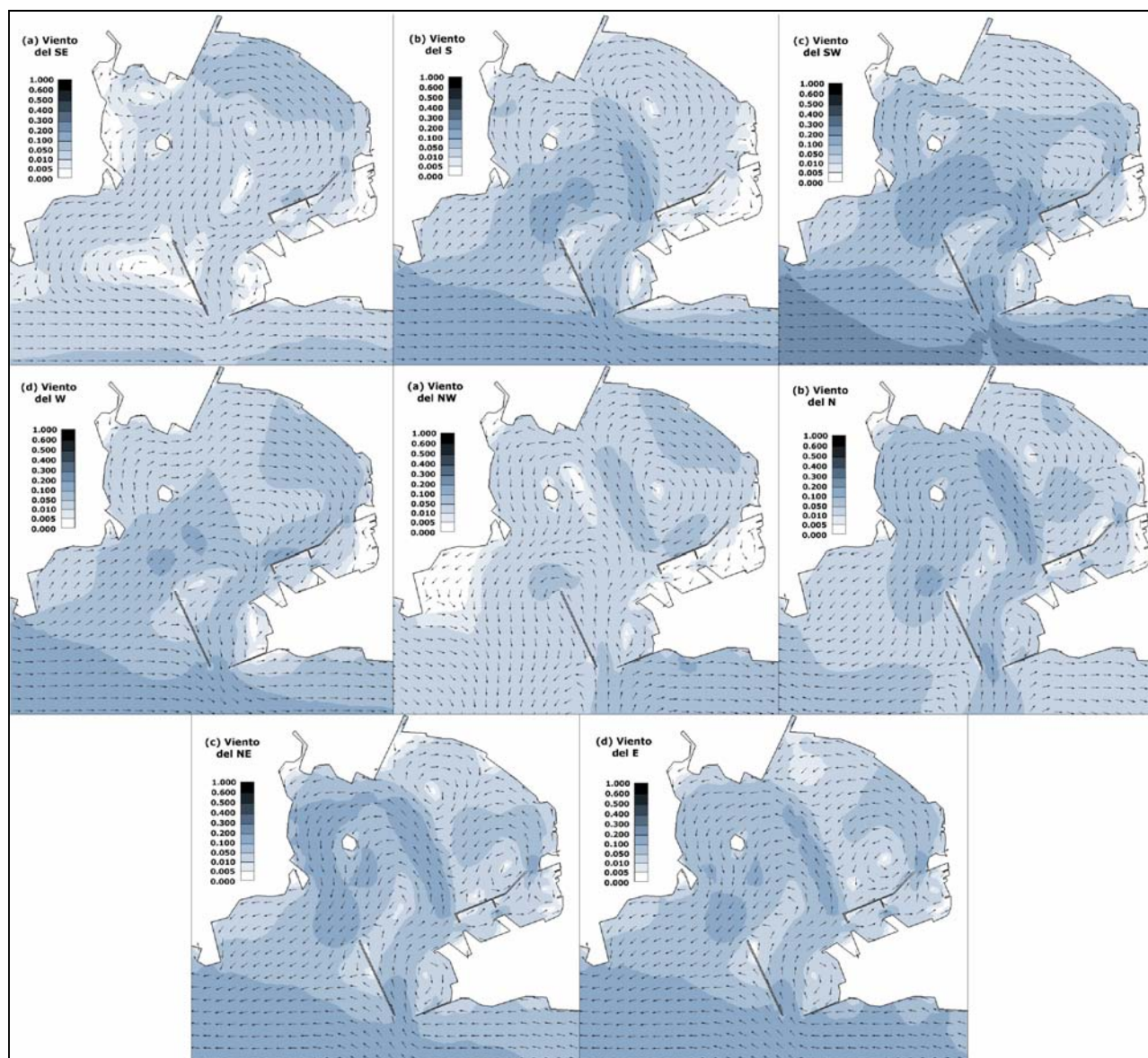


Figura 12.- Campos de corrientes obtenidos para las ocho direcciones de viento consideradas.
Intensidades cm/s.

Resultados Flujos Residuales

En la Figura 13 se presentan los campos de corrientes residuales obtenidos al promediar el flujo calculado por el modelo durante el periodo de tiempo febrero – abril de 2004 para los casos M-1, M-2 y V-9. El flujo residual obtenido para el caso C-8 es muy similar al obtenido para el escenario de caudal fluvial bajo ya que durante la mayor parte del período de tiempo febrero – abril 2004 la descarga del Río de la Plata fue baja, con un valor medio de $13.800 \text{ m}^3/\text{s}$, siendo del Tipo A-1, con corrientes residuales de entre 1 y 5 cm/s en la mayor parte de la Bahía. La circulación residual en la Bahía obtenida al considerar como forzantes el caudal fluvial y la marea astronómica se corresponde con una celda de flujo Tipo B-3, con intensidades menores a 1 cm/s en la mayor parte de la Bahía y valores entre 1 y 5 cm/s en la zona del Canal ANCAP. Entre los campos de corrientes residuales obtenidos para los casos C-8 y M-1 hay algunas diferencias que se pueden relacionar con el efecto de la marea astronómica sobre la distribución de velocidades en la Bahía de Montevideo. Por un lado hay una disminución del flujo en toda la Bahía en las corrientes residuales con marea astronómica, aunque se mantienen las direcciones de flujo en la zona interior de la Bahía. En las bocas de entrada a la misma se observan intensidades casi nulas con marea astronómica mientras que la situación residual considerando solamente caudal fluvial presentaba un flujo saliente por la boca del Cerro. En función de estas variaciones del campo de corrientes residual es posible afirmar que la circulación periódica generada por marea astronómica produce un efecto neto de circulación en toda la Bahía, con un ingreso por la boca mayor y una descarga por el Canal de Acceso, con un celda de circulación interior de sentido horario, que se opone a la celda de circulación generada por efecto del caudal fluvial, y que en definitiva genera un circulación residual de menores intensidades. La circulación residual obtenida al considerar como forzantes el caudal fluvial y las mareas astronómicas y meteorológicas es del Tipo B-3, con un flujo que ingresa a la Bahía de Montevideo por la boca entre la escollera Oeste y la costa, y que sale por la escollera Sarandí. Dentro de la Bahía existe una circulación residual en sentido horario con mayores intensidades en la zona del Canal La Teja. Al comparar este campo con el obtenido para el caso M-1 se observa algunas diferencias. Estas diferencias muestran que aumenta el flujo residual que ingresa y que sale de la Bahía cuando se incluye la marea meteorológica, lo que indica que la misma genera un mayor ingreso de agua por la boca del Cerro (y la consecuente descarga por la Escollera) que la onda astronómica. En el interior de la Bahía las corrientes residuales son muy similares, por lo que no se observa una influencia neta de la marea meteorológica en el movimiento de las aguas interiores. Es importante aclarar que aunque la marea meteorológica no genere grandes modificaciones en el campo residual en la Bahía de Montevideo, esto no implica que su efecto sobre el sistema sea pequeño. Al contrario, las ondas de marea meteorológica generan mayores corrientes y mayores fluctuaciones instantáneas del nivel del Río de la Plata que las generadas por la marea astronómica.

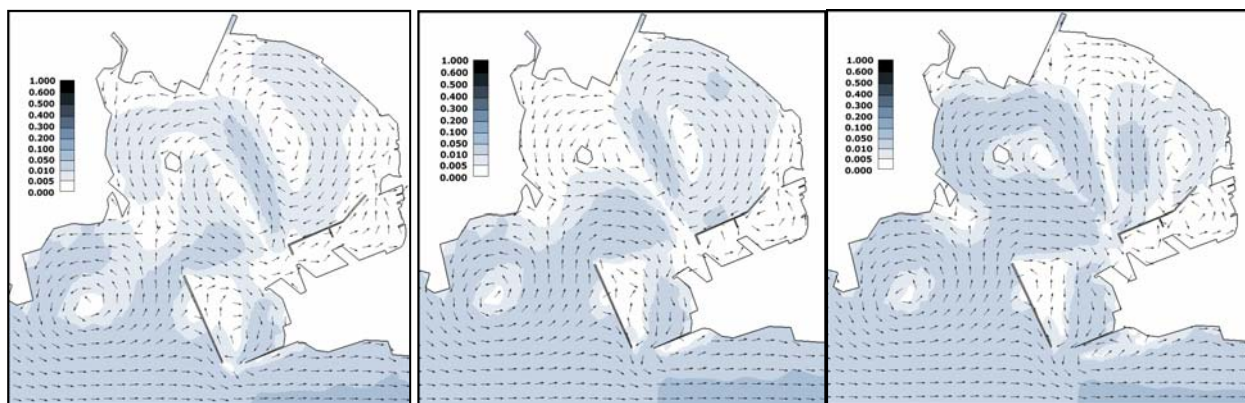


Figura 13.- Circulación residual en la Bahía de Montevideo generada por caudal fluvial y marea astronómica (Izq.), generada por caudal fluvial, marea astronómica y marea meteorológica (Centro) y generada por caudal fluvial, marea astronómica, marea meteorológica y vientos (Der.). Intensidades cm/s.

La corriente residual obtenida en la Bahía de Montevideo a partir de la promediación de la corriente

calculada por el modelo durante el período febrero – abril de 2004 considerando todos los forzantes muestra un flujo del Tipo B, con ingreso de flujo por Cerro y salida por el Canal de Acceso, pero que no se corresponde con ninguna de las celdas de circulación Tipo B definidas. Se observa además un flujo con intensidad entre 1 y 5 cm/s en el canal ANCAP hacia el Noroeste y en la zona de Pantanoso hacia el Sur. En el fondo de la Bahía las corrientes residuales son casi nulas en la zona de Miguelete I y hacia el Sur en el este del Canal ANCAP. Al comparar este campo residual con el obtenido a partir de la simulación del mismo período pero sin considerar el efecto del viento se observa que aunque los flujos de entrada y salida de la Bahía se mantienen, la circulación dentro de la misma es muy diferente, lo que demuestra la gran afectación del viento sobre el flujo en la Bahía.

CONCLUSIONES

Se ha caracterizado la circulación general en la Bahía de Montevideo y su recinto portuario. Los estudios realizados se basaron en los resultados del modelo hidrodinámico bidimensional integrado en vertical RMA-10 calibrado y validado específicamente para la zona de estudio.

La caracterización realizada incluyó el estudio de las velocidades en distintos puntos de control ubicados en zonas estratégicas de la Bahía, se obtuvieron parámetros estadísticos como intensidades medias y máximas así como la distribución direccional del flujo la cual permitió identificar direcciones de flujo preferenciales.

A partir de un análisis de simultaneidad en las condiciones de flujo en los puntos de control escogidos fueron identificadas seis celdas de circulación características del flujo en la Bahía de Montevideo. Estas celdas de circulación explican en total la circulación que ocurre en la mayor parte de la Bahía de Montevideo el 62% del tiempo.

El estudio de la influencia de los distintos forzantes considerados sobre la hidrodinámica de la zona de estudio mostró por un lado que el caudal fluvial bajo de descarga del Río de la Plata no influye prácticamente sobre la circulación de la Bahía, mientras que descargas extremas modifican el patrón de flujos generado por las descargas fluviales locales. Por otra parte se identificaron las distintas celdas de circulación asociadas al ciclo de marea. Por último los vientos tienen una gran influencia sobre las distribuciones de corrientes dependiendo la intensidad de las variaciones generadas de la intensidad y de la duración de los mismos, pero siendo su efecto inmediato y en general domina sobre el efecto de otros forzantes. .

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fossati, M. y Piedra-Cueva.** (2004). “Modelación numérica del frente salino en el Río de la Plata“. *XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, San Pablo, Brasil.
- King, Ian P.** (1993). *RMA-10 A finite element model for three-dimensional density stratified flow*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis.
- Menéndez, A.N. y Jaime, P.** (2002). *Análisis del régimen hidrológico del los ríos Paraná y Uruguay*. Informe LHA 05-216-02.
- Piedra-Cueva, I., Lorenzo, E. y Fossati, M.** (2002). “Modelación numérica del futuro emisario Punta Lobos (Montevideo)“. *Memorias del XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Cuba.
- Piedra-Cueva, I. y Fossati, M.** (2006). “Residual currents and corridor of flow in the Rio de la Plata“. *Applied Mathematical Modelling*.