

Tesis de Maestría - Junio 2005

Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada

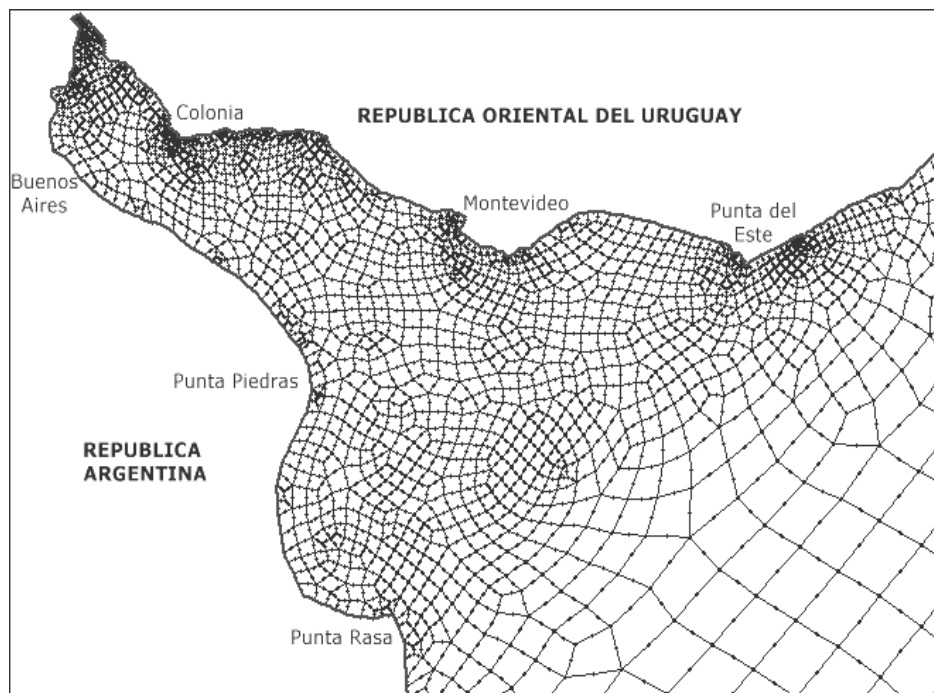
Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental - IMFIA

Facultad de Ingeniería - Universidad de la República

Montevideo - Uruguay

MODELACION BIDIMENSIONAL DEL CAMPO SALINO EN EL RIO DE LA PLATA

MONICA FOSSATI



TUTOR: Dr. Ing. Ismael Piedra-Cueva

INDICE

INTRODUCCION	1
 TEMA 1 – LOS ESTUARIOS Y EL RIO DE LA PLATA	
 Capítulo 1:	
DINAMICA GENERAL DE LOS ESTUARIOS	4
1.1 - Definición y características de los estuarios	4
1.2 - Clasificación de los estuarios	5
1.3 - Condiciones de mezcla y estratificación	7
1.4 - Mezcla en estuarios	9
1.5 - Dinámica transversal	11
1.6 - Influencia del viento	12
1.7 - Modelación numérica	14
1.8 - Ecuaciones de movimiento	15
 Capítulo 2:	
EL RIO DE LA PLATA	21
2.1 - Características físicas	21
2.2 - Batimetría y morfología	24
2.3 - Oceanografía	26
2.4 - Caracterización de la región estuarina del Río de la Plata	27
2.4.1 - Estructura vertical de salinidad	27
2.4.2 - Estructura horizontal	30
 Capítulo 3:	
ANALISIS DE DATOS	34
3.1 - Caudal fluvial	34
3.2 - Registros de corriente en la costa de Montevideo	35
3.2.1 - Información de base	35
3.2.2 - Análisis de registros	37
3.2.3 - Resultados obtenidos	38
3.3 - Registros de salinidad en las playas de Montevideo	42

3.3.1 - Información de base	42
3.3.2 - Resultados obtenidos	43
3.3.3 - Relación salinidad – descarga fluvial	47
3.4 - Perfiles verticales de salinidad en el Río de la Plata	48
3.5 – Vientos	51
3.5.1 - Información de base	51
3.5.2 - Vientos en Punta Brava	52
3.5.3 - Vientos en Pontón Recalada	55
3.5.4 - Comparación vientos Punta Brava – Pontón Recalada	57

TEMA 2 – EL MODELO NUMERICO

Capítulo 4:

MODELO EN ELEMENTOS FINITOS PARA FLUJO ESTRATIFICADO RMA-10 **60**

4.1 - Descripción general del modelo	60
4.2 - Ecuaciones gobernantes para flujo estratificado tridimensional	61
4.2.1 - Sistema original de ecuaciones	61
4.2.2 - Aproximación hidrostática	62
4.2.3 - Ecuación de continuidad	63
4.2.4 - Sistema modificado de ecuaciones	64
4.3 - Transformación geométrica vertical	64
4.4 - Ecuaciones para flujo bidimensional integrado en vertical	66
4.5 - Ecuación de estado	66
4.6 - Fuerzas externas de masa	67
4.7 - Condiciones de borde cinemáticas	67
4.7.1 - Condición en la superficie libre	68
4.7.2 - Condición en el fondo	68
4.7.3 - Condición en los bordes laterales	68
4.8 - Condiciones de borde dinámicas	69
4.8.1 - Tensión del viento	69
4.8.2 - Fricción de fondo	70
4.8.3 - Fricción lateral	70
4.9 - Viscosidad y difusión turbulenta en la dirección vertical	70
4.9.1 - Descripción paramétrica	70
4.9.2 - Formulación RMA	71
4.9.3 - Formulación Mellor Yamada	71
4.9.4 - Formulación Henderson Sellers	72
4.10 - Viscosidad y difusión turbulenta en la dirección horizontal	72

Capítulo 5:**RESOLUCION NUMERICA DEL MODELO RMA-10 73**

5.1 – Introducción	73
5.2 - Método de Galerkin y formulación en elementos finitos	73
5.2.1 - Método de los residuos ponderados	74
5.2.2 - Formulación en elementos finitos	75
5.3 - Tipos de elementos	76
5.3.1 - Elementos tridimensionales	76
5.3.2 - Elementos bidimensionales integrados en vertical	78
5.4 - Método Newton Raphson	79
5.5 - Resolución temporal	80
5.6 - Cuadratura gaussiana	81

Capítulo 6:**IMPLEMENTACION DEL MODELO EN EL RIO DE LA PLATA 82**

6.1 - Malla de cálculo	82
6.2 - Información básica	84
6.2.1 - Batimetría	84
6.2.2 - Niveles	84
6.2.3 - Caudales	85
6.2.4 - Vientos	86
6.3 - Condiciones de borde	86
6.3.1 - Caudal fluvial	86
6.3.2 - Elevación de la superficie libre	87
6.3.3 - Tensión de corte por viento	88
6.4 - Condición inicial	89
6.5 - Simulación de prueba	90
6.6 - Análisis del período de modelación previo	93
6.6.1 - Pruebas realizadas	94
6.6.2 - Resultados obtenidos	95

Capítulo 7:**CALIBRACION DEL CAMPO SALINO 97**

7.1 - Características generales de la calibración	97
7.2 - Definición de los escenarios de calibración	99
7.2.1 - Período de baja salinidad	100
7.2.2 - Período de alta salinidad	101
7.3 - Características de los escenarios	103

7.3.1 - Escenario de baja salinidad	103
7.3.2 - Escenario de alta salinidad	106
7.4 - Resultados obtenidos - Vientos Punta Brava	110
7.4.1 - Escenario de baja salinidad	110
7.4.2 - Escenario de alta salinidad	113
7.5 - Resultados obtenidos - Vientos Pontón Recalada	116
7.5.1 - Escenario de baja salinidad	116
7.5.2 - Escenario de alta salinidad	120
7.6 - Comparación de resultados	123

Capítulo 8:

VERIFICACION DEL MODELO 127

8.1 - Características generales de la verificación	127
8.2 - Características de los períodos de verificación	128
8.2.1 - Período Junio 1997	129
8.2.2 - Período Enero 1999	131
8.3 - Resultados obtenidos – Vientos Punta Brava	133
8.3.1 - Período Junio 1997	134
8.3.2 - Período Enero 1999	136
8.4 - Resultados obtenidos – Vientos Pontón Recalada	137
8.4.1 - Período Junio 1997	137
8.4.2 - Período Enero 1999	139
8.5 - Comparación de resultados	141

TEMA 3 – APLICACIONES DEL MODELO

Capítulo 9:

ESTACIONALIDAD DEL CAMPO SALINO 144

9.1 - Estacionalidad de los forzantes	144
9.2 - Definición de escenarios	145
9.3 - Características de la modelación	147
9.4 - Resultados obtenidos	149
9.4.1 - Vientos Punta Brava	150
9.4.2 - Vientos Pontón Recalada	152
9.5 - Análisis de resultados	154
9.5.1 - Período Cálido – Caudal Fluvial Medio	156
9.5.2 - Período Cálido – Caudal Fluvial Alto	159
9.5.3 - Período Cálido – Caudal Fluvial Bajo	161
9.5.4 - Período Frío – Caudal Fluvial Medio	164

9.5.5 - Período Frío – Caudal Fluvial Alto	166
9.5.6 - Período Frío – Caudal Fluvial Bajo	169
9.5.7 - Análisis general	171
9.6 - Campo de corrientes residuales	173
9.6.1 - Período Cálido	173
9.6.2 - Período Frío	176
 Capítulo 10:	
EFFECTO DE LOS FORZANTES EN EL CAMPO SALINO Y EN LA CIRCULACION DEL RIO DE LA PLATA – IMPORTANCIA DE LA COMPONENTE BAROCLINICA DEL FLUJO	179
10.1 - Consideraciones generales	179
10.2 - Influencia del caudal fluvial y marea astronómica	180
10.2.1 - Características de las simulaciones	180
10.2.2 - Resultados – Caudal Fluvial	181
10.2.3 - Resultados –Marea Astronómica	184
10.3 - Influencia del viento	186
10.3.1 - Características de la modelación	186
10.3.2 - Análisis direccional del viento	188
10.3.3 - Resultados obtenidos – Campo salino	191
10.3.4 - Resultados obtenidos – Campo de corrientes	200
10.3.5 - Conclusiones	208
 CONCLUSION	209
 BIBLIOGRAFIA	212
 ANEXOS	
Anexo 1: DERIVADAS UTILIZADAS EN EL METODO DE NEWTON RAPHSON	
Anexo 2: MODELACION DEL CAMPO SALINO CON UNA MALLA DE ALTA RESOLUCION	
Anexo 3: VERIFICACION DE TRANSECTAS DE SALINIDAD	
Anexo 4: ESTACIONALIDAD DEL CAMPO SALINO II	

Tesis de Maestría - Junio 2005

Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental - IMFIA

Facultad de Ingeniería - Universidad de la República

Montevideo - Uruguay

INTRODUCCION

MODELACION BIDIMENSIONAL

DEL CAMPO SALINO EN EL RIO DE LA PLATA

INTRODUCCION

En el IMFIA se trabaja desde hace varios años en el desarrollo de la modelación de procesos básicos vinculados a la hidrodinámica, transporte de sedimentos y de contaminantes en el Río de la Plata, y sus interacciones. En los estudios anteriores a este trabajo (Guarga et al 1992, CARP 1992, IMFIA 2002 y otros) se consideraba básicamente un fluido homogéneo, es decir, de densidad constante. Sin embargo, la confluencia y posterior mezcla del agua dulce de la descarga fluvial de los ríos Paraná y Uruguay con el agua salada del Océano Atlántico, generan que la densidad de las aguas del Río de la Plata no sea constante, sino que varíe espacialmente y temporalmente, principalmente por el cambio de salinidad. La salinidad y la densidad inciden sobre el patrón de circulación del Río de la Plata a través del gradiente espacial de densidad del agua, afectando además la dinámica de los sedimentos, y diversos factores que influyen en las características biológicas de la zona. Debido a esto, considerar la variación de la salinidad en la modelación del Río de la Plata es importante para la determinación de los patrones de circulación y para cualquier estudio basado en el campo de corrientes determinado por el modelo. Además, es importante la modelación del campo salino del Río de la Plata por la influencia que tiene la circulación gravitacional en los procesos de floculación y decantación de los sedimentos finos existentes en el río. Por otro lado, el campo salino es importante para la investigación pesquera, ecológica y biológica en la zona, ya que la distribución de salinidad influye sobre algunos parámetros biológicos del fito y zooplancton, relacionándose con las distribuciones de bentos y larvas en el río, etc. En función de todo esto, el objetivo principal de ésta tesis es avanzar en el conocimiento de la dinámica del campo salino utilizando como herramienta la modelación numérica. Esto implica trabajar en la modelación numérica del Río de la Plata en lo referente a la representación del campo de salinidades, dado por la interacción de la descarga fluvial de agua dulce proveniente de los ríos Paraná y Uruguay con el agua salada del Océano Atlántico, y de las corrientes inducidas por los gradientes horizontales de densidad.

Debido a la variación de salinidad y la influencia de la marea, el Río de la Plata presenta características particulares y variables a lo largo del mismo. En su nacimiento es claramente un sistema fluvial de agua dulce, mientras que en la zona externa la mezcla con las aguas del océano, el aumento de la sección transversal y la influencia de la dinámica del océano, hacen que el sistema se transforme en marítimo fluvial, con características similares a lo que se denomina un estuario. Debido a esto, el Tema 1 de esta tesis se denomina "Los estuarios y el Río de la Plata" e intenta presentar por un lado los aspectos centrales que caracterizan a un estuario y por otro lado las características particulares del Río de la Plata. El Capítulo 1 de éste tema describe la dinámica de flujo que presentan los estuarios, regiones de transición entre el océano y los ríos que se caracterizan por la posibilidad de movimientos de marea desde el océano, y por gradientes de salinidad y densidad asociados con la mezcla progresiva del agua dulce y del agua salada. La

distribución de salinidad y la circulación dentro de un estuario están influenciados por las mareas, características geométricas, factores meteorológicos, etc. Esto hace que los sistemas estuariales sean muy particulares y muy difíciles de caracterizar de forma genérica. El Capítulo 2 describe las principales características del Río de la Plata, un cuerpo de agua particular, donde las variaciones de la topografía del río, la fuerza de Coriolis, el aumento de la boca del río, los vientos y el aporte fluvial, son las principales variables que influyen en el campo de velocidades y en el campo de salinidades. Por último dentro del Tema 1, en el Capítulo 3 se presentan los resultados obtenidos en una serie de análisis de caudales fluviales, salinidad, corrientes y vientos en el Río de la Plata. El procesamiento de la información de campo disponible y su posterior análisis permite describir algunas características particulares de la zona, aumentando así el conocimiento de las variables que intervienen en la dinámica del Río de la Plata. Este capítulo incluye una descripción de la información disponible y algunos análisis estadísticos, cuyos resultados son utilizados posteriormente en la etapa de modelación.

Un modelo es una representación de un determinado sistema. La modelación numérica calcula determinadas características del mismo utilizando herramientas computacionales basadas en algoritmos matemáticos. En este caso el modelo resuelve las ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo dentro de una geometría particular, la del Río de la Plata. Según se mencionó anteriormente, es importante la utilización de un modelo que represente las variaciones horizontales, verticales y temporales de la salinidad para mejorar el conocimiento de los fenómenos que caracterizan la zona de estudio. Este trabajo constituye una primer etapa en la cual se estudió la variación horizontal de la salinidad a través de la modelación bidimensional integrada en vertical. Esta aproximación bidimensional, si bien es una simplificación del comportamiento del sistema, es una valiosa herramienta que permite comprender el comportamiento de las principales variables del mismo, y constituye un paso previo para otras etapas. Actualmente se está trabajando en otra etapa, en la cual se utiliza un modelo numérico tridimensional baroclínico, de forma de representar la estratificación vertical del campo salino y su influencia en la circulación. Existen varios modelos numéricos capaces de resolver el campo de velocidades y de salinidad en un determinado cuerpo de agua. En este trabajo se utilizó el modelo RMA-10, el cual forma parte de un conjunto de modelos llamados "RMA", que se han utilizado en el IMFIA en las etapas anteriores de modelación del flujo en el Río de la Plata.

Por la importancia que tiene el modelo en este trabajo, el Tema 2 se denomina "El modelo numérico". Este tema incluye varios capítulos, en donde se presenta desde las principales características del modelo hasta su implementación y calibración en el Río de la Plata. El Capítulo 4 describe las ecuaciones utilizadas por el modelo numérico RMA-10 en su descripción del flujo y de la salinidad en sistemas como el del Río de la Plata. El Capítulo 5 describe los métodos de resolución numérica que utiliza el modelo para resolver las variables del sistema. En el Capítulo 6 se presenta la implementación del modelo en el Río de la Plata. Incluye la descripción de la malla, de los datos que se necesitan y fueron utilizados en la modelación, de las condiciones de borde e

iniciales que se impusieron en las simulaciones y un análisis preliminar de la influencia de los principales forzantes en el campo salino. El Capítulo 7 describe la calibración del campo salino, presentando las características de los períodos utilizados en la calibración así como también los resultados obtenidos. Por último en el Capítulo 8 se presentan las características y los resultados obtenidos en la etapa de validación o verificación del modelo.

Uno de los principales objetivos académicos relacionados con la modelación del campo salino en el Río de la Plata es la necesidad de comprender el comportamiento del mismo frente a la acción de diferentes forzantes. El sistema de circulación del agua en el Río de la Plata esta fuertemente condicionado por tres elementos principales que actúan como forzantes: la descarga fluvial de los tributarios, la acción de la marea oceánica y la influencia meteorológica, principalmente a través del efecto del viento. Por otro lado, el análisis de la estacionalidad del campo salino a partir de la estacionalidad de éstos forzantes es importante a la hora de determinar distribuciones horizontales de salinidad representativas de diferentes situaciones. Estos aspectos fueron los analizados con el modelo numérico luego de su implementación y calibración en el Río de la Plata. El Tema 3 se denomina "Aplicaciones del modelo" e incluye los dos últimos capítulos de este trabajo. En el Capítulo 9 se realiza una análisis de la estacionalidad de los principales forzantes que influyen en el campo salino que luego caracterizan un conjunto de simulaciones que buscan identificar los patrones estacionales del campo salino y de la circulación en el Río de la Plata. En el Capítulo 10 se utiliza el modelo para analizar la influencia de los principales forzantes sobre el campo salino. De esta forma se realizan diferentes simulaciones variando el número de forzantes considerados y se analizan los campos de corrientes y de salinidades obtenidos. Se analiza también el efecto de la componente baroclínica del flujo y su importancia en las diferentes situaciones modeladas.

También forman parte de esta tesis cuatro anexos que complementan el trabajo presentado en algunos capítulos. Los primeros tres anexos están vinculados al contenido del Tema 2 y el último está relacionado con el Tema 3.

Tesis de Maestría - Junio 2005

Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental - IMFIA

Facultad de Ingeniería - Universidad de la República

Montevideo - Uruguay

TEMA 1

LOS ESTUARIOS Y EL RIO DE LA PLATA

**MODELACION BIDIMENSIONAL
DEL CAMPO SALINO EN EL RIO DE LA PLATA**

Capítulo 1

DINAMICA GENERAL DE LOS ESTUARIOS

En este capítulo se presenta una síntesis completa de los principales aspectos relacionados con la dinámica general en los estuarios. Esta síntesis incluye desde los conceptos básicos vinculados al tema hasta la formulación de las ecuaciones que representan el flujo en una zona estuarina. La bibliografía de base utilizada para la realización de esta síntesis la constituyen el libro "Estuaries: a physical introduction" de Keith R. Dyer (1997) y el capítulo "Physics of estuarine circulation" de Charles B. Officer de Estuaries and Enclosed Seas (1992). En lo referente a las ecuaciones de movimiento la bibliografía se complementó con el libro "Numerical modeling of ocean dynamics" de Z. Kowalik y T. S. Murty (1993) y el libro "Introduction To Physical Oceanography" de Robert H. Stewart (2003). Se mencionan a lo largo del capítulo otras referencias bibliográficas, las cuales fueron consultadas por su análisis específico de determinados temas.

1.1 - Definición y características de los estuarios

Varios esfuerzos se han realizado para alcanzar una definición consensuada de estuario. La definición clásica es la de Cameron y Pitchard de 1963, quienes definieron un estuario como un cuerpo de agua semi cerrado conectado libremente con el océano abierto y dentro del cual el agua del mar es diluida por el agua dulce proveniente de la descarga continental.

El término estuario se ha extendido para incluir no solo las descargas de los ríos, sino para incluir también bahías, golfos, y cuerpos de salinidad variable como las lagunas costeras que tienen una conexión con el mar no permanente. Así, otra definición utilizada es que un estuario es un cuerpo de agua costero semi-cerrado que tiene una conexión libre con el mar abierto al menos en forma intermitente, y dentro del cual la salinidad es considerablemente diferente a la salinidad del océano abierto adyacente.

Sin embargo, ninguna de las dos definiciones anteriores considera el efecto que tiene la marea sobre un estuario, por lo que otra definición utilizada es que un estuario es un cuerpo de agua costero semi cerrado que tiene conexión libre con el océano abierto, que se extiende hasta el límite efectivo de influencia de la marea, y dentro del cual el agua de mar es diluida por el agua dulce proveniente de la descarga continental.

En definitiva los estuarios son regiones de transición entre el océano y los ríos. Se caracterizan por la posibilidad de movimientos de marea forzados desde el océano, y por gradientes de salinidad y densidad asociados con la mezcla progresiva del agua dulce y del agua salada. El flujo de agua dulce, las mareas, la topografía de fondo y las variables climáticas como el

viento, son las variables dominantes en la determinación del flujo, circulación y distribución de salinidad dentro de un estuario.

La circulación en un estuario puede simplificarse de la siguiente manera: el transporte hacia el mar del agua dulce adicionada constantemente por la descarga fluvial se va mezclando progresivamente con el agua salada a medida que descarga en el océano, lo que genera a su vez un flujo de agua salada hacia el continente para mantener el balance de sal. El transporte de las aguas salobres ocurre por procesos de advección y difusión, con la mayoría de la energía proveniente de las oscilaciones de la marea. La interacción de estos procesos y propiedades dentro de los confines de la geomorfología del estuario, es decir, el caudal fluvial, las corrientes de marea, los procesos de advección y difusión, son los que determinan la distribución de salinidad a lo largo del estuario.

1.2 - Clasificación de los estuarios

Existen muchas maneras de clasificar un estuario, ya sea tomando en cuenta el régimen de mareas, la topografía, la morfología o la estructura de la salinidad. La clasificación más utilizada se basa en la distribución de salinidad y en el tipo de circulación asociado a la misma. De esta forma se definen los estuarios de cuña salina, los estuarios altamente estratificados, los estuarios parcialmente estratificados y los estuarios mezclados verticalmente. Es importante aclarar que en general un estuario podrá pertenecer a más de un tipo. Podrá por ejemplo tener características de bien mezclado en una zona del mismo y ser un estuario altamente estratificado en otra zona; ser un estuario mezclado en una estación del año y estratificado en otras o incluso presentar dicha variabilidad según la fase de la marea.

Los estuarios de tipo cuña salina se caracterizan por tener un volumen de descarga fluvial mucho mayor al volumen de marea y en general la relación ancho profundidad del estuario es relativamente baja. El agua dulce descarga a través de una capa delgada por encima de una capa profunda de agua salada y la interfase entre las capas de diferente salinidad denominada haloclina es muy aguda. A lo largo del estuario la salinidad es casi constante en las capas de fondo y superficie. Debido a la tensión en la haloclina se forman ondas que desestabilizan la interfase y generan el ingreso de agua salada de la capa profunda en la capa de agua dulce superior. Este flujo vertical se denomina 'entrainment' (arrastre), el cual a su vez genera un ingreso compensatorio de agua salada desde el mar para preservar la continuidad del flujo. En este tipo de estuarios el perfil vertical muestra una gran estratificación por densidad, observándose dos capas de distinta salinidad en la dirección vertical (con salinidad igual a cero en la superficie y salinidad oceánica en el fondo) y un fuerte gradiente de salinidad en la interfase. El rango de mareas en este tipo de estuarios es generalmente micromareal, es decir, menor a 2 m. En la Figura 1.1(a) se observa un esquema de los perfiles verticales de velocidad y salinidad característicos de los estuarios tipo cuña salina.

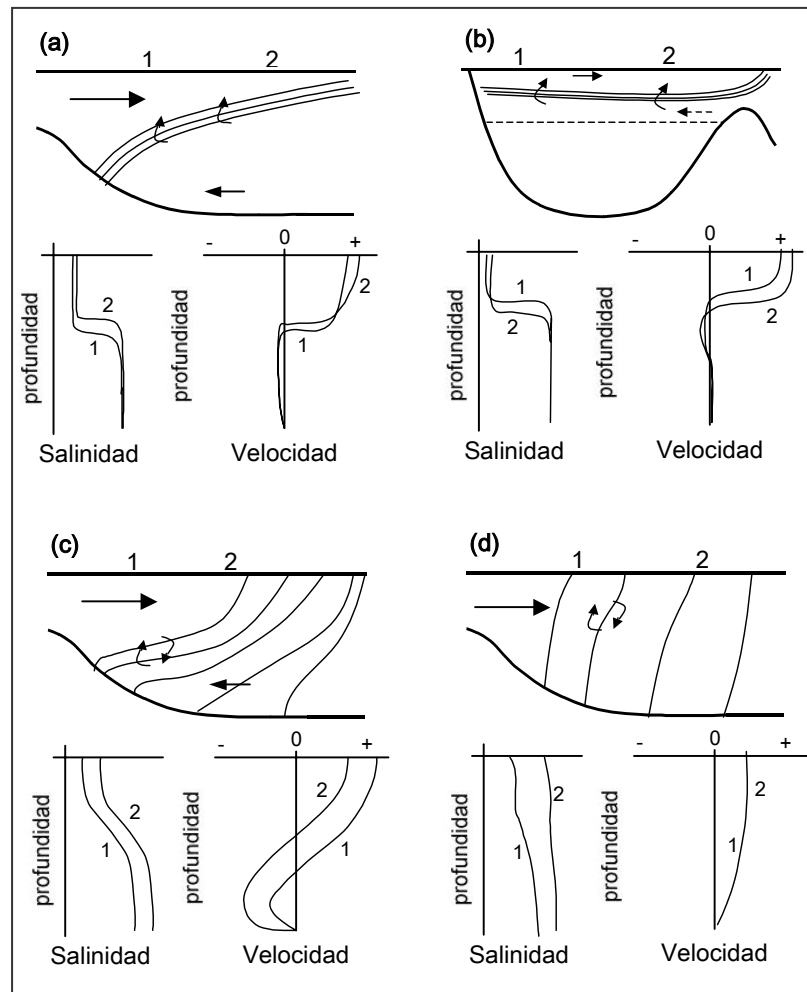


Figura 1.1: Distribución de salinidad y velocidad a lo largo de un estuario (a) tipo cuña salina, (b) altamente estratificado, (c) parcialmente mezclado y (d) mezclado verticalmente. Reproducido de Dyer (1997).

Los estuarios altamente estratificados en muchas formas son similares a los de tipo cuña salina pero con una capa inferior salina muy profunda. Nuevamente el único proceso de mezcla es el arrastre, 'entrainment', el cual genera un aumento de salinidad en la capa superior, mientras que en la capa inferior la salinidad permanece inalterada considerando que el volumen de la misma es mucho mayor al volumen descargado por el río. Los fiordos son un ejemplo de este tipo de estuarios, los cuales son generalmente muy profundos y tienen una gran reserva de agua salada debajo de la capa superior. En la Figura 1.1(b) se observa un esquema de los perfiles verticales de velocidad y salinidad característicos de los estuarios altamente estratificados.

Los estuarios parcialmente mezclados o ligeramente estratificados se caracterizan por tener un volumen de descarga fluvial menor al volumen de marea. La energía que interviene en el movimiento de marea es grande y es disipada principalmente por las fuerzas de fricción de fondo, produciendo turbulencia. Los vórtices turbulentos generan la mezcla vertical de las aguas dulces y saladas, ya sea por el ascenso de agua salada o el descenso de agua dulce. Como consecuencia, la salinidad de superficie aumenta y el flujo que ingresa por el fondo hacia dentro del estuario

también aumenta. La mezcla entre ambas capas afecta los gradientes longitudinales de densidad generando circulación vertical gravitacional. Este fenómeno caracteriza el patrón de circulación en este tipo de estuarios y se refiere al flujo inducido por densidad, en donde la capa salina inferior tiende a fluir por debajo de la capa menos densa superior que fluye en dirección opuesta y hacia el océano, con una mezcla entre ambas capas. Debido al intercambio de agua dulce y agua salada entre las capas, la variación de salinidad vertical es gradual y la salinidad en superficie aumenta de forma constante hacia aguas abajo del estuario. En la Figura 1.1(c) se observa un esquema de los perfiles verticales de velocidad y salinidad característicos de los estuarios parcialmente mezclados.

Los estuarios mezclados verticalmente se caracterizan por una descarga fluvial insignificante respecto al caudal de marea. En estos casos la turbulencia producida por las tensiones en el fondo es suficientemente grande como para mezclar la columna de agua completamente, eliminando toda estratificación vertical. Como resultado, los perfiles verticales de salinidad son casi constantes y presentan un incremento de salinidad hacia aguas abajo del estuario en la dirección longitudinal. En la Figura 1.1(d) se observa un esquema de los perfiles verticales de velocidad y salinidad característicos de los estuarios mezclados verticalmente.

1.3 - Condiciones de mezcla y estratificación

De los cuatro tipos de estuarios definidos en 1.2, los estuarios mezclados y los estuarios ligeramente estratificados representan a la mayoría. Cuando el movimiento de la marea dentro del estuario es significativo, se genera un continuo cambio en la estratificación según el rango de marea y es difícil separar las condiciones de mezcla parcial y las condiciones de mezcla total. Debido a esto es muy probable que ambas condiciones se generen dentro de un mismo estuario en diferentes zonas o a lo largo del tiempo.

Las variaciones horizontales de la densidad, que en los estuarios son típicamente causadas por diferencias de salinidad entre el agua salada de la frontera exterior y el agua dulce de la frontera interior, constituyen una fuerza horizontal importante. Esta diferencia de densidades genera un gradiente de presiones horizontal a lo largo del eje del estuario generando el flujo baroclínico. Por otro lado, los cambios horizontales en la elevación de la superficie de agua también producen un gradiente de presiones horizontal, generando la componente barotrópica del flujo. La componente barotrópica y la componente baroclínica componen los gradientes longitudinales de presión que impulsan la circulación vertical gravitacional. La componente barotrópica genera gradientes de presiones constantes con la profundidad, mientras que la componente baroclínica genera gradientes horizontales de presión iguales a cero en superficie aumentando hacia el fondo. En ausencia de otras fuerzas, el gradiente de presiones baroclínico hace circular el flujo hacia regiones de menor densidad, típicamente en dirección hacia el continente. Por continuidad se genera entonces una pendiente de la superficie libre del agua que impulsa un flujo de retorno, típicamente en dirección hacia el mar en la capa superficial. El flujo baroclínico hacia el continente

en profundidad y el flujo de retorno barotrópico hacia el mar en la superficie, producen el perfil de velocidades característico de la circulación gravitacional, presentado en la Figura 1.1(c).

Por otro lado, los gradientes barotrópicos y baroclínicos se oponen y refuerzan alternadamente a lo largo del ciclo de marea. En la Figura 1.2 se presenta un esquema del balance de ambas fuerzas en la marea alta, en la marea baja y en un promedio en la marea. Durante la marea baja los dos campos de presiones se oponen, la fuerza barotrópica tiene dirección saliente al estuario mientras que la fuerza baroclínica es entrante (Figura 1.2(a)). Cerca de la superficie el campo barotrópico supera al baroclínico en relación a la profundidad media y cerca del fondo ocurre lo inverso. Hay entonces una fuerza relativa saliente al estuario cerca de la superficie y entrante cerca del fondo. Durante la marea alta ambas fuerzas actúan en dirección hacia dentro del estuario y la fuerza relativa respecto a la profundidad media es hacia dentro en el fondo y hacia fuera en la superficie (Figura 1.2(b)). Considerando el promedio en un ciclo de marea ocurre lo siguiente: en la capa superior las superficies de igual presión se inclinan hacia fuera del estuario manteniendo el flujo residual hacia el mar y cerca del fondo las superficies de igual presión se inclinan hacia dentro del estuario manteniendo un flujo residual hacia el continente (Figura 1.2(c)). Cerca de la profundidad media las superficies son horizontales y los gradientes de presión son cero.

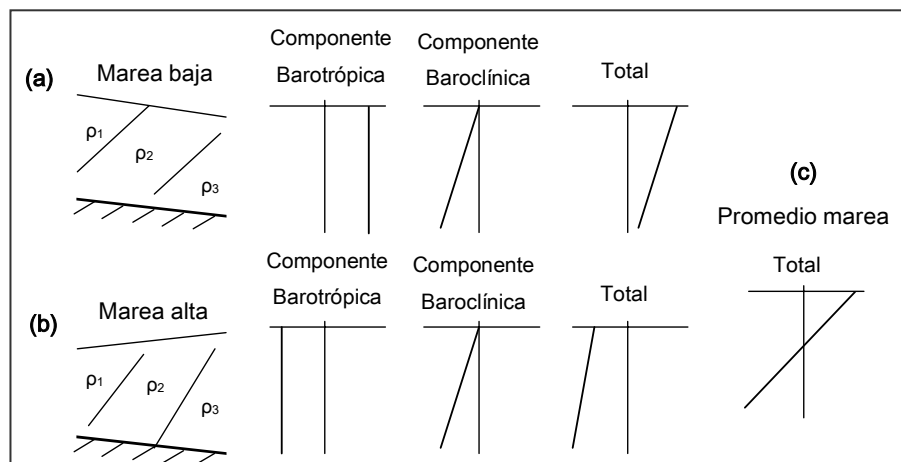


Figura 1.2: Esquema del balance de fuerzas barotrópicas y baroclínicas durante (a) la marea alta, (b) la marea baja y (c) promediando en la marea. Reproducido de Dyer (1997).

Además, la estratificación en estuarios parcialmente mezclados durante el ciclo de marea varía considerablemente. Las aguas en la superficie viajan más rápido y lo hacen con una mayor trayectoria de movimiento que las aguas cercanas al fondo. Debido a esto, durante la marea baja la marea genera que el agua dulce de la capa superior se desplace sobre el agua salada de la capa inferior, por lo que aumenta la estratificación al haber una mayor disminución de la salinidad en la capa superficial que en la capa de fondo. Durante la marea alta, el movimiento diferencial de las capas tiende a disminuir la estratificación generada durante la marea baja.

Como se ha mencionado anteriormente, entre los estuarios de tipo parcialmente mezclado o levemente estratificado y los estuarios bien mezclados, no hay fronteras bien definidas. En ambos tipos de estuarios actúan los mismos procesos pero lo que cambia es el grado de intensidad en cada uno. En los estuarios parcialmente mezclados, la estratificación vertical por salinidad es suficientemente intensa como para limitar la penetración de la turbulencia de fondo dentro del cuerpo de agua. La circulación estará determinada entonces en función de la interacción entre la fuerza barotrópica de la marea y el gradiente de densidades horizontal estacionario. El resultado es que en los estuarios parcialmente mezclados se observa el perfil de flujo residual producido por la circulación vertical gravitacional. Aunque hay diferencias entre las oscilaciones de marea en superficie y en fondo, la forma del perfil de salinidades permanece similar a lo largo de la marea advectándose hacia delante y hacia atrás. A medida que se da una mezcla mayor, como sucede en estuarios bien mezclados, la circulación gravitacional decrece en importancia y dominan las fuerzas barotrópicas generadas por la marea. La mezcla vertical es más intensa y la turbulencia inducida por el fondo alcanza la totalidad de la columna de agua y la superficie. Hay una diferencia menor entre la salinidad de fondo y de superficie, y la advección debido a la marea es el proceso que domina. Como consecuencia, la circulación gravitacional y las corrientes generadas por marea son ambas importantes en cualquier estuario, pero su relativa importancia varía según el tipo de estuario, el caudal fuvial y el rango de marea.

Kurup et al. (1998) estudiaron el River Swan, un estuario de tipo micromareal, con un rango de marea menor a 2 m. En este tipo de estuarios los procesos físicos dominantes como la mezcla son generados por el viento, oleaje y el ingreso de caudal fluvial. Una característica común de estos estuarios micromareales es la falta de turbulencia fuerte lo cual genera que la columna de agua permanezca en general estratificada por densidad casi permanentemente o durante largos períodos. Luego del trabajo efectuado concluyeron que este tipo de estuarios puede exhibir un ciclo anual de salinidad por la baja amplitud de la marea. A su vez se mostró una fuerte correlación entre el caudal de entrada y la ubicación de la cuña salina, lo cual sugiere que la entrada de caudal fluvial es el principal mecanismo que influye en la dinámica de la cuña salina en este estuario micromareal.

1.4 - Mezcla en estuarios

Hemos visto que en la dinámica estuarina, la competencia entre la estratificación y la mezcla vertical es muy importante. Las condiciones de turbulencia del flujo determinan la mezcla y por lo tanto el transporte de las propiedades en los estuarios. La turbulencia es generada cerca de la superficie por el viento y por las olas que rompen, así como también por el intercambio de calor entre el océano y la atmósfera. Cerca del fondo la turbulencia es causada por la fricción de fondo y afecta la dinámica de los sedimentos. Los movimientos turbulentos en flujos estratificados mezclan parcelas de fluido de diferentes zonas aumentando la mezcla molecular causada por la difusión molecular.

Cuando el flujo es estratificado el gradiente de densidades se opone al intercambio de turbulencia y es necesaria una fuerza de corte extra para generar la mezcla. El número de Richardson Ri caracteriza los flujos estratificados, comparando las fuerzas estabilizadoras de la estratificación por densidad y las fuerzas desestabilizadoras de corte, y se define como:

$$Ri = -\frac{g}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} \bigg/ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (1.1)$$

donde u es la velocidad, ρ es la densidad, z es la coordenada vertical y g es la aceleración de la gravedad. Para $Ri > 0$ la estratificación es estable, mientras que para $Ri < 0$ la estratificación es inestable. Cuando la estratificación excede un cierto valor la turbulencia en la interfase es amortiguada, la mezcla es limitada y el flujo es esencialmente laminar, incluso si el flujo es turbulento en las capas homogéneas superior e inferior. Existen muchos estudios teóricos y de laboratorio de los mecanismos de formación de inestabilidades en la interfase, y se ha encontrado que la transición de flujo laminar a turbulento bajo condiciones de flujo uniforme ocurre generalmente para $Ri = 0,25$. Para un cálculo más sencillo, se define el número de Richardson de capas:

$$Ri_L = \frac{(\Delta \rho / \rho) \cdot g \cdot D}{u^2} \quad (1.2)$$

siendo D la profundidad de la capa superior que fluye a velocidad u relativa a la capa inferior, $\Delta \rho$ es la diferencia de densidad entre la capa de fondo y la capa de superficie y ρ es la densidad en la capa de fondo.

La mezcla del agua dulce y el agua salada en los estuarios se da por la combinación de la turbulencia generada por corte en el fondo del estuario, en la superficie y en la haloclina, es decir, por el gradiente vertical de velocidades que se da en dichas zonas. La mezcla en la superficie y la mezcla en el fondo son mezclas inducidas por los bordes. Cerca de la superficie, la turbulencia es generada por el viento, por las olas rompientes y por transferencia de calor con la atmósfera. La turbulencia cerca del fondo es causada por la fricción de fondo principalmente producida por las corrientes. En algunas situaciones de aguas poco profundas, la capa de mezcla de superficie se extiende hasta el fondo y la capa de mezcla de fondo hasta la superficie, aunque en general existe una capa interna estratificada entre ambas capas.

La turbulencia por corte en la haloclina provoca lo que se denomina mezcla interna, la cual se genera en la interfase existente entre dos capas de fluido con diferentes densidades y es inhibida por la estratificación local. Esta turbulencia en general se genera por la aparición de inestabilidades en la interfase. Se incluyen en este tipo de mezcla el 'entrainment', la difusión turbulenta y las ondas internas. El 'entrainment' ocurre para $Ri > 0,25$ y es un proceso que genera un ingreso de agua salada de la capa inferior en la capa superior. Este proceso es generado por la inestabilidad de Holmboe, dada por el crecimiento y rotura de pequeñas ondas Holmboe entre las

capas. El 'entrainment' es un proceso en un solo sentido en el cual una capa menos turbulenta ingresa en una capa más turbulenta. Para $Ri < 0,25$ se genera lo que se denomina la difusión turbulenta; la turbulencia existente en la interfase genera un intercambio de agua en ambos sentidos entre las capas produciendo la mezcla. Esta turbulencia es generada por la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz, la cual requiere que ambas capas sean turbulentas. La importancia relativa de cada uno de estos procesos radica en el grado de turbulencia existente en la capa salina inferior. Si la turbulencia es similar en ambas capas, se da mínimamente el proceso de 'entrainment' y la mezcla ocurre por difusión turbulenta. Si en cambio la capa inferior está casi estática, entonces no ocurre difusión turbulenta entre las capas y la mezcla existe por 'entrainment'. Por lo tanto en estuarios altamente estratificados domina la mezcla por 'entrainment' y en estuarios parcialmente estratificados domina la difusión turbulenta. Por otro lado también es posible la mezcla entre las capas por la presencia de ondas internas en la interfase, las cuales tienen escalas de longitud de metros y pueden aparecer respondiendo a perturbaciones sobre la interfase. Las ondas internas generan la mezcla entre las capas cuando ellas rompen después del encuentro de condiciones críticas como por ejemplo variaciones topográficas.

1.5 - Dinámica transversal

El flujo en un estuario no es constante en una sección transversal del mismo, sino que es afectado por obstáculos y cambios en la profundidad que generan variaciones laterales y longitudinales del flujo. En los estuarios con curvas el flujo bordea a las mismas y experimenta una fuerza centrífuga hacia fuera de la curva. Además del efecto que tienen las curvas se suma el efecto de los cambios en las secciones transversales a lo largo del estuario. Cuando el agua que fluye en el estuario se encuentra con zonas de baja profundidad aumenta su velocidad y se desvía a zonas con profundidades mayores.

En estuarios anchos el efecto de la rotación de la tierra se vuelve importante. Interviene entonces la fuerza de Coriolis, la cual en el hemisferio Sur genera que el flujo saliente de agua dulce se incremente por la zona izquierda mirando hacia aguas abajo y que el ingreso de agua oceánica ocurra por el lado opuesto. En estuarios grandes y anchos se vuelven importantes también otros factores como los efectos laterales, la geometría del estuario y los efectos atmosféricos como la tensión del viento. En estuarios angostos bien mezclados, la fricción producida por las paredes laterales se vuelve importante en la detención del flujo. En los estuarios anchos la influencia de los cortes laterales es menor, pero a su vez en estos se pueden desarrollar circulaciones horizontales que se manifiestan en diferencias en el flujo medio y salinidad dentro de una sección. En consecuencia, es posible que exista un flujo neto hacia aguas arriba en un lado del estuario y un flujo neto hacia aguas abajo en el otro lado.

Por otro lado, se ha observado que en bahías bajas y amplias, la corriente de densidad se puede manifestar como un flujo dirigido hacia aguas arriba en las secciones más profundas del

estuario, compensado por un flujo de retorno hacia el mar en las secciones más bajas. En los estuarios con canales marcados, en los bordes de los mismos el agua se encuentra bien mezclada aunque exista estratificación en el canal. Se ha observado por otra parte, que en estuarios anchos con canales profundos y zonas bajas al borde de los mismos, se genera una advección diferencial. Las corrientes debidas al ciclo de la marea en combinación con las corrientes por densidad producen un aumento de las corrientes en el canal principal durante la marea alta y un aumento de las corrientes en los bancos durante la marea baja (Uncles, 2002). Este es el efecto del denominado 'tidal straining' en el plano horizontal cuyo esquema se presenta en la Figura 1.3. El 'tidal straining' del campo salino se refiere al desplazamiento de las líneas de isosalinidad por el efecto de las corrientes de marea. En la Figura 1.3 se observa como en ausencia de mezcla, la advección hacia aguas abajo durante la marea baja genera variaciones laterales de salinidad que junto con la posterior advección hacia aguas arriba durante la marea alta no genera una situación de isosalinidad uniforme como la situación inicial, sino que existe un efecto residual en el campo salino luego de un ciclo de marea (Uncles, 2002).

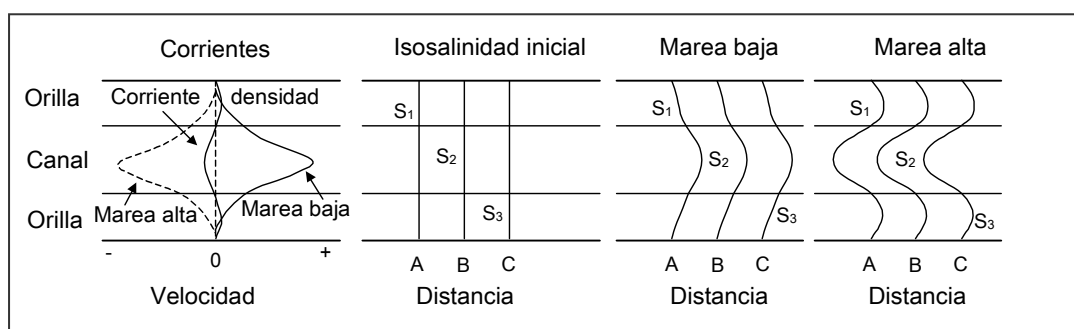


Figura 1.3: Esquema del efecto de las corrientes de marea en el plano horizontal en un estuario uniforme lateralmente y verticalmente. Reproducido de Uncles (2002).

En relación a esto, en el estuario James se identificó que debido a la variación lateral de la profundidad, en las regiones poco profundas a cada lado del canal principal ocurre esencialmente una circulación neta saliente al estuario en todo el perfil. Otros estudios de efectos laterales en la circulación en estuarios han mostrado que en los de tipo altamente estratificados, la contribución lateral en el balance de sal es pequeña y que en estuarios parcialmente mezclados los términos de flujo transversal y vertical medio son de igual magnitud. Los efectos laterales son entonces importantes en este último caso para mantener el balance de sal.

1.6 - Influencia del viento

Otro factor que interviene en la dinámica de los estuarios afectando los patrones de flujo es el efecto atmosférico, principalmente el viento. La afectación del viento es local y durante períodos más cortos que las escalas temporales de otros forzantes como el caudal fluvial y las mareas. Debido a la variabilidad de los vientos en cada estuario, la determinación de la influencia del viento se ha realizado en la mayoría de los casos a través de análisis de mediciones de corrientes y su

relacionamiento con los registros de viento cercanos. Cuando se realizan medidas de velocidades en períodos cortos de tiempo dentro de un estuario, del orden de un ciclo de marea o dos, los perfiles de velocidad medios clásicos pueden no observarse, en general debido al efecto del viento.

Weisberg (1976) realizó mediciones de corriente en el estuario del Río Providence y las relacionó con el viento registrado en la misma época. Los resultados mostraron claramente que las fluctuaciones de las corrientes en escalas de tiempo entre las correspondientes a oscilaciones de marea y gradiente longitudinal de salinidad, eran grandes y la mayoría inducidas por el viento. A partir de las medidas de corriente observaron que el flujo cercano al fondo se relacionaba con el patrón de circulación generado por los gradientes de densidad y que existía una correlación inversa entre esas mediciones y el viento. Esto se debe a una relación de continuidad: el agua superficial advectada hacia el continente por un viento entrante al estuario debe retornar al mar por la capa más profunda y viceversa.

Elliot (1978) realizó un importante estudio de la influencia del viento, a partir de una serie de mediciones de corrientes de un año de duración en el estuario Potomac y de su vinculación con el viento registrado. Luego de un análisis de los datos determinó que la circulación clásica estuarina, flujo en superficie saliente al estuario y corriente de fondo entrante, se registró solamente un 43% del tiempo con una duración media de 2,5 días. Se observó que en los casos que el viento soplaba también en dirección saliente al estuario, el flujo superficial se fortalecía y también el flujo de retorno. Por otro lado el patrón de flujo invertido, es decir, corriente superficial entrante al estuario generada por el viento entrante al estuario y el flujo en el fondo saliente al mismo, ocurrió un 20% del tiempo con una duración de 1,6 días. Finalmente el tercer tipo de circulación de mayor frecuencia, igual en frecuencia y duración que el flujo invertido, fue el acumulamiento de agua en el estuario, es decir flujo entrante al mismo en todo el plano vertical. Además, se observó que el efecto del viento puede afectar los niveles de superficie del estuario. La tensión del viento en dirección saliente al estuario puede generar una reducción del nivel medio, mientras que por otro lado una tensión del viento opuesta a la salida del estuario puede generar un aumento del nivel de agua dentro del estuario.

Por otro lado, en estuarios poco profundos la turbulencia inducida por la tensión del viento sobre la superficie genera procesos de mezcla vertical y una disminución de la estratificación. Geyer (1997) analizó la influencia del viento en la dinámica de dos estuarios poco profundos y demostró la fuerte influencia del viento sobre la estructura salina, circulación y sobre la tasa de intercambio entre el agua dulce y el agua salada a través de la boca del estuario. Estos estuarios mostraron una particular respuesta a las variaciones del forzante viento y aunque no solamente el viento determinaba la circulación, éste alteraba totalmente la estructura salina en ambos estuarios. Los vientos entrantes al estuario inhibían la circulación estuarina incrementando el gradiente de salinidad a lo largo del estuario y reduciendo la tasa de intercambio de las aguas. Los vientos salientes en cambio aumentaban la descarga superficial, sacando hacia fuera del estuario el agua

dulce y reduciendo el gradiente de salinidad a lo largo del estuario. En definitiva Geyer concluye que es posible que en estuarios poco profundos la influencia del viento domine sobre la circulación vertical gravitacional y controle la estructura salina dentro del estuario.

1.7 - Modelación numérica

Debido a la variedad de factores que intervienen en la dinámica estuarina, como ser la geometría del estuario, la descarga continental, los movimientos de marea, el efecto del viento, la fuerza de Coriolis, rugosidad de fondo, etc., se ha desarrollado a través de los años la modelación numérica de los mismos. Los modelos se han transformado en una herramienta imprescindible en el estudio de cualquier sistema estuarino, ya sea para analizar el campo de corrientes, la estructura salina o la dinámica de los sedimentos. Sin embargo, los resultados de un determinado modelo numérico serán tan buenos como lo sean los datos utilizados para realizar su calibración y verificación. Un buen trabajo de modelación de un sistema, deberá entonces estar respaldado por un buen conjunto de datos, que permita comprobar que las situaciones planteadas en el modelo sean acordes con la realidad. A su vez el modelo es cuantitativo y se puede utilizar entonces para explorar relaciones de causa-efecto y para determinar valores de las variables físicas que son demasiado costosas o difíciles de medir directamente, como por ejemplo situaciones correspondientes a condiciones extremas.

Es importante observar que un estuario es mucho más complejo de estudiar que cualquier sistema de agua dulce, como ser ríos o lagos, pues son afectados por factores marinos y terrestres, así como también por procesos únicos de ese ambiente como ser la corriente inducida por densidad. En general los ríos se modelan considerando un sistema de densidad constante, y los lago profundos pueden presentar variaciones verticales de densidad por la absorción diferencial de calor. Pero a diferencia de los lagos estratificados verticalmente, en un estuario el gradiente principal de densidad es horizontal desde el mar hacia la tierra, lo cual produce aceleraciones horizontales que producen circulaciones internas autónomas. Otra diferencia importante es la variación de las características de un estuario con el tiempo. Las fuertes variaciones temporales de los caudales de ingreso o de los factores meteorológicos, o simplemente la existencia de la marea, aseguran la existencia de un estado no estacionario dentro del mismo.

Todas estas características pueden agruparse en un modelo numérico completo tridimensional, que trabaje acoplado con la densidad y que resuelva las ecuaciones matemáticas que gobiernan el movimiento dentro del estuario. El sistema de circulación dentro de un estuario está gobernado por las ecuaciones dinámicas de movimiento junto con una ecuación de continuidad de masa y una ecuación de continuidad de sal. Las fuerzas que intervienen en el balance dinámico son por un lado los gradientes de elevación de la superficie libre y los gradientes internos de densidad que generan diferencias horizontales de presión. Por otro lado intervienen la

fuerza de Coriolis por la rotación de la tierra, la tensión del viento en la superficie, las fuerzas de fricción existentes en el fondo del estuario, las tensiones turbulentas y la viscosidad molecular.

1.8 - Ecuaciones de movimiento

Las ecuaciones matemáticas que gobiernan el movimiento de un fluido en un estuario son las ecuaciones de Navier Stokes, la ecuación de conservación de la masa y la ecuación de continuidad de sal. Las ecuaciones se derivan en un sistema de coordenadas cartesianas x, y, z , siendo u, v y w las componentes del campo de velocidades a lo largo de los tres ejes respectivamente.

Considerando al fluido incompresible, la ecuación de continuidad expresa la conservación del volumen:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1.3)$$

Las ecuaciones de movimiento de Navier Stokes derivan de la conservación de la cantidad de movimiento o segunda ley de Newton, que relaciona las variaciones de la cantidad de movimiento de una masa de fluido por la aplicación de una fuerza:

$$\frac{D(m.v)}{Dt} = F \quad (1.4)$$

$$\frac{D(v)}{Dt} = \frac{F}{m} = F_m \quad (1.5)$$

donde F es la fuerza, m es la masa, v es el campo de velocidades y la notación D/Dt significa derivada total pues se calcula la fuerza sobre una partícula. Se puede asumir que la masa es constante y entonces se calcula la fuerza por unidad de masa F_m . Cuatro fuerzas son importantes en la dinámica oceánica: los gradientes de presión, la fuerza de Coriolis, la gravedad y la fricción. La fricción puede deberse a tensiones externas aplicadas en determinadas superficies del fluido o deberse a la tensión generada por la viscosidad molecular del propio fluido. Sin considerar las fuerzas externas que se deben agregar en cada caso particular, para un fluido viscoso incompresible la ecuación de Navier Stokes es entonces de la forma:

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - 2\Omega \wedge v + \nu \nabla^2 v + g \quad (1.6)$$

siendo g la gravedad, ρ la densidad, p la presión, ν la viscosidad cinemática molecular del fluido, típicamente 10^{-6} m²/s para el agua a 20°C y Ω la aceleración angular de la tierra igual a $7,292 \times 10^{-5}$ radianes/seg. Desarrollando la derivada total y el laplaciano en la ecuación 1.6 se obtienen las tres componentes de la ecuación de Navier Stokes:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + 2\Omega v \sin \varphi \quad (1.7a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - 2\Omega u \sin \varphi \quad (1.7b)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + 2\Omega u \cos \varphi - g \quad (1.7c)$$

siendo φ la latitud y asumiendo que $w \ll v$ se despreció el término $2\Omega \cos \varphi$ frente al término $2\Omega \sin \varphi$ en la ecuación 1.7a.

Utilizando la aproximación de Reynolds, las propiedades del flujo se dividen en la componente media (U, V, W, P) y en la componente fluctuante (u', v', w', p'):

$$u = U + u' \quad v = V + v' \quad w = W + w' \quad p = P + p' \quad (1.8)$$

donde el valor medio U se calcula a partir de un promedio espacial o temporal:

$$U = \langle u \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad U = \langle u \rangle = \frac{1}{X} \int_0^X u(x) dx \quad (1.9)$$

y por lo tanto el promedio de las componentes fluctuantes es cero:

$$\langle u' \rangle = \langle v' \rangle = \langle w' \rangle = \langle p' \rangle = 0 \quad (1.10)$$

Sustituyendo las expresiones 1.8 en la ecuación de continuidad de volumen 1.3 se obtiene la ecuación 1.11. Calculando el valor medio de la ecuación 1.11 se obtiene la ecuación de continuidad para el flujo medio 1.12a, y restando ésta a la ecuación 1.11 se obtiene la ecuación de continuidad para las componentes fluctuantes 1.12b:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0 \quad (1.11)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1.12a)$$

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0 \quad (1.12b)$$

De los términos no lineales de la ecuación de cantidad de movimiento ($u \partial u / \partial x$, etc) surgen las tensiones turbulentas. Sustituyendo las expresiones 1.8 en los términos no lineales de las ecuaciones 1.7, estos pueden escribirse de la forma:

$$\left\langle (U + u') \frac{\partial(U + u')}{\partial x} \right\rangle = \left\langle U \frac{\partial U}{\partial x} \right\rangle + \left\langle U \frac{\partial u'}{\partial x} \right\rangle + \left\langle u' \frac{\partial U}{\partial x} \right\rangle + \left\langle u' \frac{\partial u'}{\partial x} \right\rangle = \left\langle U \frac{\partial U}{\partial x} \right\rangle + \left\langle u' \frac{\partial u'}{\partial x} \right\rangle \quad (1.13)$$

imponiendo que el segundo y tercer término son cero, pues por la definición de U se cumple que $\langle u' \rangle = 0$.

Teniendo en cuenta esta simplificación, el valor medio de la ecuación de cantidad de movimiento en la componente x (1.7a) queda de la forma:

$$\frac{DU}{Dt} + \left\langle u' \frac{\partial u'}{\partial x} \right\rangle + \left\langle v' \frac{\partial u'}{\partial x} \right\rangle + \left\langle w' \frac{\partial u'}{\partial x} \right\rangle = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) + 2\Omega V \sin \varphi \quad (1.14)$$

Utilizando las expresiones para las derivadas de un producto presentadas en 1.15 y la ecuación 1.12b de continuidad de la componente fluctuante de la velocidad, es posible reescribir los tres últimos sumandos del miembro izquierdo de la ecuación 1.14 y obtener la ecuación 1.16.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u'^2}{\partial x} &= 2u' \frac{\partial u'}{\partial x} = u' \frac{\partial u'}{\partial x} + u' \frac{\partial u'}{\partial x} \\ \frac{\partial u'v'}{\partial y} &= u' \frac{\partial v'}{\partial y} + v' \frac{\partial u'}{\partial y} \\ \frac{\partial u'w'}{\partial z} &= u' \frac{\partial w'}{\partial z} + w' \frac{\partial u'}{\partial z} \end{aligned} \quad (1.15)$$

$$\begin{aligned} \left\langle u' \frac{\partial u'}{\partial x} + v' \frac{\partial u'}{\partial y} + w' \frac{\partial u'}{\partial z} \right\rangle &= \left\langle \frac{\partial u'^2}{\partial x} - u' \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial u'v'}{\partial y} - u' \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial u'w'}{\partial z} - u' \frac{\partial w'}{\partial z} \right\rangle \\ &= \left\langle \frac{\partial u'^2}{\partial x} + \frac{\partial u'v'}{\partial y} + \frac{\partial u'w'}{\partial z} - u' \left(\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} \right) \right\rangle = \frac{\partial \langle u'u' \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle u'v' \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle u'w' \rangle}{\partial z} \end{aligned} \quad (1.16)$$

Sustituyendo la expresión 1.16 en la ecuación 1.14 se obtiene la ecuación de Navier Stokes en la dirección x para un flujo turbulento incompresible:

$$\frac{DU}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + 2\Omega V \sin \varphi + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \frac{\partial U}{\partial x} - \langle u'u' \rangle \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu \frac{\partial U}{\partial y} - \langle u'v' \rangle \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu \frac{\partial U}{\partial z} - \langle u'w' \rangle \right] \quad (1.17)$$

De esta forma, aparece un término adicional de componentes F_x , F_y y F_z , para cada dirección x , y , z respectivamente, al promediar las ecuaciones de cantidad de movimiento:

$$F_x = -\frac{\partial}{\partial x} \langle u'u' \rangle - \frac{\partial}{\partial y} \langle u'v' \rangle - \frac{\partial}{\partial z} \langle u'w' \rangle \quad (1.18a)$$

$$F_y = -\frac{\partial}{\partial x} \langle v'u' \rangle - \frac{\partial}{\partial y} \langle v'v' \rangle - \frac{\partial}{\partial z} \langle v'w' \rangle \quad (1.18b)$$

$$F_z = -\frac{\partial}{\partial x}\langle w'u' \rangle - \frac{\partial}{\partial y}\langle w'v' \rangle - \frac{\partial}{\partial z}\langle w'w' \rangle \quad (1.18c)$$

Estos términos adicionales son fuerzas por unidad de masa debidas a la turbulencia y son iguales al gradiente del tensor de tensiones de Reynolds o tensor turbulento sobre la densidad. El tensor de tensiones turbulento T_T es simétrico y está formado por las tensiones adicionales que aparecen en el flujo medio debidas al flujo turbulento:

$$T_T = \begin{pmatrix} -\rho\langle u'u' \rangle & -\rho\langle u'v' \rangle & -\rho\langle u'w' \rangle \\ -\rho\langle v'u' \rangle & -\rho\langle v'v' \rangle & -\rho\langle v'w' \rangle \\ -\rho\langle w'u' \rangle & -\rho\langle w'v' \rangle & -\rho\langle w'w' \rangle \end{pmatrix} \quad (1.19)$$

El tensor de tensiones agrega seis incógnitas a las tres componentes del flujo y la presión y ninguna ecuación adicional, por lo que el problema queda indeterminado. Analíticamente no es posible obtener ecuaciones para las tensiones turbulentas y se dice que el problema no tiene cierre. A través de mediciones de laboratorio o en sitio de u' , v' y w' es posible determinar las tensiones de Reynolds localmente aunque estos valores son difíciles de generalizar. Una de las ideas más utilizadas para estimar las tensiones de Reynolds es asumir que el intercambio turbulento sigue una ley de difusión similar a la difusión molecular pero con una constante diferente. De esta forma las tensiones turbulentas se suponen proporcionales a los gradientes de velocidad del flujo medio, con N_{xx} , N_{xy} , etc., los coeficientes de viscosidad turbulenta:

$$\begin{aligned} -\rho\langle u'u' \rangle &= \rho N_{xx} \frac{\partial U}{\partial x}; & -\rho\langle u'v' \rangle &= \rho N_{xy} \frac{\partial U}{\partial y}; & -\rho\langle u'w' \rangle &= \rho N_{xz} \frac{\partial U}{\partial z} \\ -\rho\langle v'u' \rangle &= \rho N_{yx} \frac{\partial V}{\partial x}; & -\rho\langle v'v' \rangle &= \rho N_{yy} \frac{\partial V}{\partial y}; & -\rho\langle v'w' \rangle &= \rho N_{yz} \frac{\partial V}{\partial z} \\ -\rho\langle w'u' \rangle &= \rho N_{zx} \frac{\partial W}{\partial x}; & -\rho\langle w'v' \rangle &= \rho N_{zy} \frac{\partial W}{\partial y}; & -\rho\langle w'w' \rangle &= \rho N_{zz} \frac{\partial W}{\partial z} \end{aligned} \quad (1.20)$$

Los coeficientes de viscosidad turbulenta tienen la misma dimensión que la viscosidad molecular, longitud al cuadrado sobre tiempo. Considerando que las dimensiones horizontales en un cuerpo de agua tipo estuario son mucho mayores que la dimensión vertical, los valores de los coeficientes de viscosidad turbulenta son diferentes para las direcciones horizontales y vertical. Por otro lado, los términos de viscosidad molecular son mucho menores a los términos de viscosidad turbulenta, por lo que los primeros en general se desprecian.

Por último, la ecuación de continuidad de sal se obtiene realizando un balance de sal a un determinado volumen de control y considerando la sal como una propiedad conservativa. Considerando los procesos de advección y difusión molecular de sal y sin considerar una fuente de aporte de sal, se obtiene la ecuación de continuidad de sal:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial(us)}{\partial x} + \frac{\partial(vs)}{\partial y} + \frac{\partial(ws)}{\partial z} = \varepsilon \left(\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} \right) \quad (1.21)$$

siendo s la salinidad y ε el coeficiente de difusión molecular. Considerando nuevamente las componente medias (U, V, W, S) y turbulentas (u', v', w', s') de la velocidad y salinidad, respectivamente, calculando el valor medio, utilizando que el valor medio de las componentes fluctuantes es igual a cero y despreciando la difusión molecular se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{\partial(US)}{\partial x} - \frac{\partial(VS)}{\partial y} - \frac{\partial(WS)}{\partial z} - \frac{\partial\langle u's' \rangle}{\partial x} - \frac{\partial\langle v's' \rangle}{\partial y} - \frac{\partial\langle w's' \rangle}{\partial z} \quad (1.22)$$

En la ecuación de continuidad de sal 1.22 los primeros tres términos del miembro derecho corresponden a la advección de sal, el flujo de sal causado por el flujo medio y los últimos tres términos corresponden a la difusión turbulenta, el flujo de sal generado por la turbulencia, el cual es mucho mayor que el generado por la difusión molecular. Los términos de difusión turbulenta en general se reescriben en una forma análoga a la difusión molecular, es decir, una constante por el gradiente de salinidad:

$$-\langle u's' \rangle = K_x \frac{\partial S}{\partial x}; \quad -\langle v's' \rangle = K_y \frac{\partial S}{\partial y}; \quad -\langle w's' \rangle = K_z \frac{\partial S}{\partial z} \quad (1.23)$$

siendo K_x, K_y, K_z los coeficientes de difusividad turbulenta en las direcciones x, y, z respectivamente, los cuales tienen dimensiones de longitud al cuadrado sobre tiempo. Sustituyendo las expresiones 1.23 en la ecuación 1.22 se obtiene la ecuación general de continuidad de sal:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{\partial(US)}{\partial x} - \frac{\partial(VS)}{\partial y} - \frac{\partial(WS)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (1.24)$$

Esta ecuación se denomina ecuación de Fick y es la forma clásica de la ecuación de continuidad de sal. Desarrollando las derivadas del producto en los términos advectivos y utilizando la ecuación de continuidad del flujo medio 1.12a, es posible modificar la ecuación anterior y obtener la ecuación 1.25 de continuidad de sal para un fluido incompresible turbulento tridimensional.

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -U \frac{\partial S}{\partial x} - V \frac{\partial S}{\partial y} - W \frac{\partial S}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (1.25)$$

En definitiva despreciando la viscosidad molecular y la difusión molecular el flujo tridimensional se describe mediante las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1.26a)$$

$$\frac{DU}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + 2\Omega V \sin \varphi + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_{xx} \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_{xy} \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_{xz} \frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad (1.26b)$$

$$\frac{DV}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - 2\Omega U \sin \varphi + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_{yx} \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_{yy} \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_{yz} \frac{\partial V}{\partial z} \right) \quad (1.26c)$$

$$\frac{DW}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + 2\Omega U \cos \varphi - g + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_{zx} \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_{zy} \frac{\partial W}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_{zz} \frac{\partial W}{\partial z} \right) \quad (1.26d)$$

$$\frac{DS}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (1.26e)$$

Este sistema se complementa con una ecuación de estado que relaciona la densidad con la salinidad y la temperatura. En caso que la temperatura varíe significativamente, se considera la variación de la densidad con la temperatura y es necesaria la ecuación de difusión de temperatura para cerrar el sistema. En el caso de que sean importantes, deben considerarse también las fuerzas externas en las ecuaciones de cantidad de movimiento.

Es posible obtener una simplificación del sistema anterior aplicando la aproximación hidrostática. Debido a que la extensión horizontal del océano y estuarios es mucho mayor que la extensión vertical de los mismos, la componente vertical del movimiento es mucho más débil que la velocidad horizontal. Las velocidades verticales típicas en el océano son del orden de 10^{-2} cm/s, mientras que las velocidades horizontales son hasta 1000 veces más grandes. De esta forma el flujo es predominantemente horizontal y la aceleración vertical es chica en comparación con la aceleración de la gravedad. En la ecuación 1.26d es posible entonces despreciar los términos que contienen las derivadas de w frente al término de g . Además, el término $2\Omega U \cos \varphi$ puede despreciarse por ser mucho más pequeño que la gravedad. Teniendo todo esto en cuenta, la ecuación de momento vertical puede reducirse a la ley hidrostática. La suposición hidrostática simplifica la ecuación 1.26d a la forma:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - g = 0 \quad (1.27)$$

Se tiene entonces un sistema de seis ecuaciones y seis incógnitas, que para determinadas condiciones de borde e iniciales y coeficientes de viscosidad y difusividad, está determinado y tiene una única solución.

Capítulo 2

EL RIO DE LA PLATA

En el Río de la Plata, el aporte de agua dulce de la cuenca hidrográfica, las mareas del océano y los vientos, son los factores que rigen el movimiento y la mezcla de las aguas dulces y saladas. Los sedimentos en suspensión existentes, son un factor importante en la formación del sustrato, en la turbiedad del agua y en la producción primaria. El ecosistema del Río de la Plata presenta características particulares diferentes a otros ecosistemas similares de otras regiones. En este capítulo, se describen las principales características físicas del Río de la Plata y se realiza una descripción de la distribución de salinidad en la zona estuarina del mismo. La bibliografía consultada comprende los informes del Programa ECOPLATA: "Programa de apoyo a la gestión integrada de la zona costera uruguaya del Río de la Plata" y diferentes trabajos y estudios que se han realizado en la zona y que se mencionan en el texto. La información sobre el Río de la Plata es muy variada y cualitativa, con algunos aspectos actualmente en estudio y para los cuales no existe una información única y definitiva.

2.1 - Características físicas

El Río de la Plata está ubicado sobre la costa Este de América del Sur entre los 34° 00' - 36° 10' de latitud Sur y 55° 00' - 58° 10' de longitud Oeste (Figura 2.1), y vierte en el Océano Atlántico la segunda cuenca de aporte más importante de Sudamérica (3.170.000 Km²) luego de la cuenca amazónica. Sus límites fueron fijados en el Tratado del Río de la Plata en 1973 por los países limítrofes, la República Oriental del Uruguay y la República Argentina. El límite interior está determinado por el paralelo que pasa por Punta Gorda en la costa uruguaya y por la desembocadura de los ríos Paraná y Uruguay en la costa argentina. El límite exterior con el océano está determinado por una línea recta que une Punta del Este en la costa uruguaya con Punta Rasa en la costa argentina. La superficie total del Río de la Plata se estima en aproximadamente 30.000 Km², la longitud aproximada es 280 Km a lo largo del eje y tiene una sección transversal que aumenta hacia el Sureste desde 2 Km en Punta Gorda, 32 Km entre Colonia y La Plata, 100 Km entre Montevideo y Punta Piedras y 220 Km entre Punta del Este y Punta Rasa.

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 m³/s. Otros ríos menores y arroyos aportan también su caudal a lo largo de ambas márgenes del río. El agua dulce se mezcla con las aguas oceánicas generando una zona del Río de la Plata de aguas salobres, la cual se percibe a partir de la franja que une Punta Brava en Montevideo con Punta Piedras en la costa argentina. Esta zona se extiende hasta aproximadamente Punta Rasa y Punta del Este y contiene aguas salobres de variable salinidad según las mareas, vientos y aportes de agua dulce de la cuenca. La

superficie de esta zona externa de aguas salobres se estima en unos 18.000 km² y evidencia características muy particulares desde el punto de vista biológico (Boschi 1988). Las costas del Río de la Plata son muy diferentes, en la costa Norte predominan las playas arenosas, con barras, cordones litorales y dunas, mientras que la costa Sur es una región baja y está formada por un conjunto de pantanos, lagunas, planicies de marea e inundación y antiguos cordones de playa. Hacia el Cabo San Antonio existen zonas de dunas activas y cordones de dunas que alternan con pantanos.



Figura 2.1: Ubicación del Río de la Plata.

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). En la Figura 2.2 se muestran las tres regiones en las cuales se divide el Río de la Plata.

El Río de la Plata interior comprende la zona entre el límite fluvial hasta la línea Colonia La Plata aproximadamente. Esta zona 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. Esta zona está formada en su mayor parte por bajos fondos, denominados Playa Honda, de profundidades entre 1 y 4 m y se caracteriza por tener un sustrato constituido por arena fina, limo y arcilla. A lo largo de las costas de Uruguay se acumula la mayor cantidad de arena, aunque también existen zonas con rocas. Sobre la costa argentina se observan playas de limo y arcilla, donde prácticamente no hay arena. En esta parte del río el material transportado está compuesto principalmente por limos y arcilla. Este material comienza a depositarse en el primer ensanchamiento del río sobrepasando la línea La Plata Colonia y como no existe influencia del agua salada, la deposición se debe a efectos dinámicos. La influencia del océano se percibe básicamente por las mareas que afectan a todo el río. Los organismos que viven en este sector son típicamente dulceacuícolas.

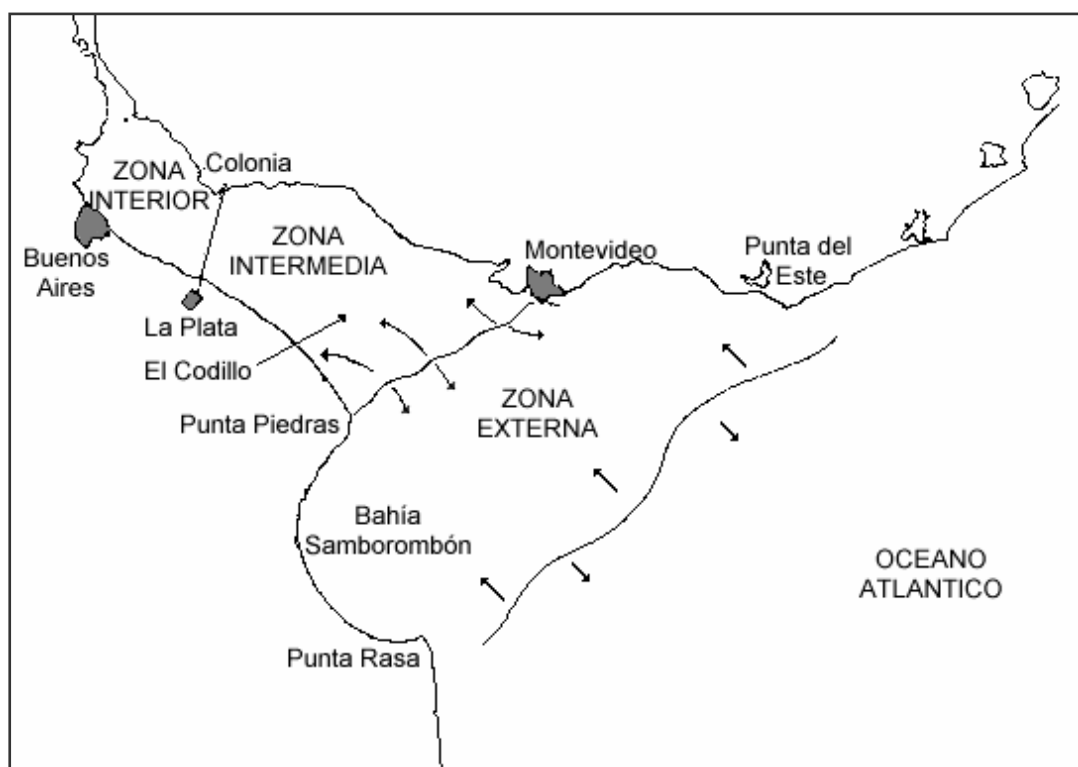


Figura 2.2: División en zonas del Río de la Plata. La zona interior de agua dulce, la zona intermedia de agua dulce con influencia marina en el sector externo y la zona exterior de aguas salobres. Modificado de Boschi (1988).

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. El Banco Ortiz está separado de la costa uruguaya por el Canal Norte y es un bajo muy grande de solo 3 m de profundidad. En esta zona se advierte la influencia marina, el oleaje aumenta y el efecto de la marea es mayor. Se observa la presencia de algunas especies de peces marinos que incursionan en las aguas de baja salinidad.

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.

Desde el punto sedimentológico, en el Río de la Plata superior e intermedio se encuentran confinados los sedimentos finos como arcillas limosas, limos arcillosos y limos. Por otro lado, las arenas cubren la mayor parte del Río de la Plata exterior y la plataforma continental adyacente.

2.2 - Batimetría y morfología

El Río de la Plata es poco profundo y aumenta su profundidad y su ancho desde su límite fluvial hacia su descarga en el océano. La batimetría de todo el Río de la Plata se observa en la Figura 2.3, en la cual se muestran las isóbatas a intervalos de 1m en las zonas interior e intermedia y cada 2 m en la zona exterior.

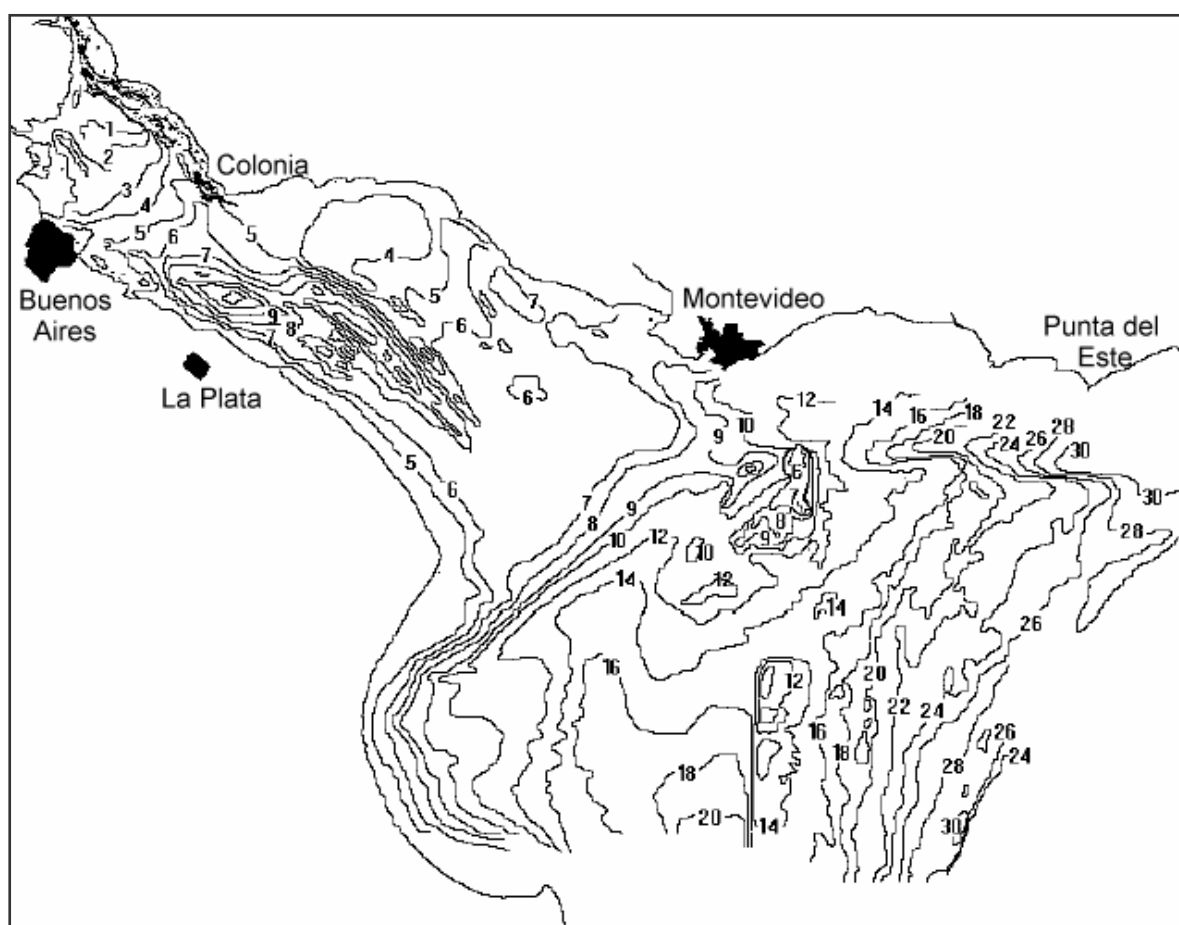


Figura 2.3: Batimetría del Río de la Plata. Modificado de Ecoplata (1997).

La profundidad media en la zona interior del Río de la Plata es 2,5 m. En la región intermedia las profundidades son mayores, aunque son menores a 10 m; siendo por ejemplo 5 m en la zona cercana a Montevideo. En la zona exterior las profundidades varían entre 10 y 20 m. La plataforma continental se caracteriza por una pendiente suave hasta los 100 m de profundidad y luego se acentúa la pendiente hasta el borde del talud a 3000 m de profundidad.

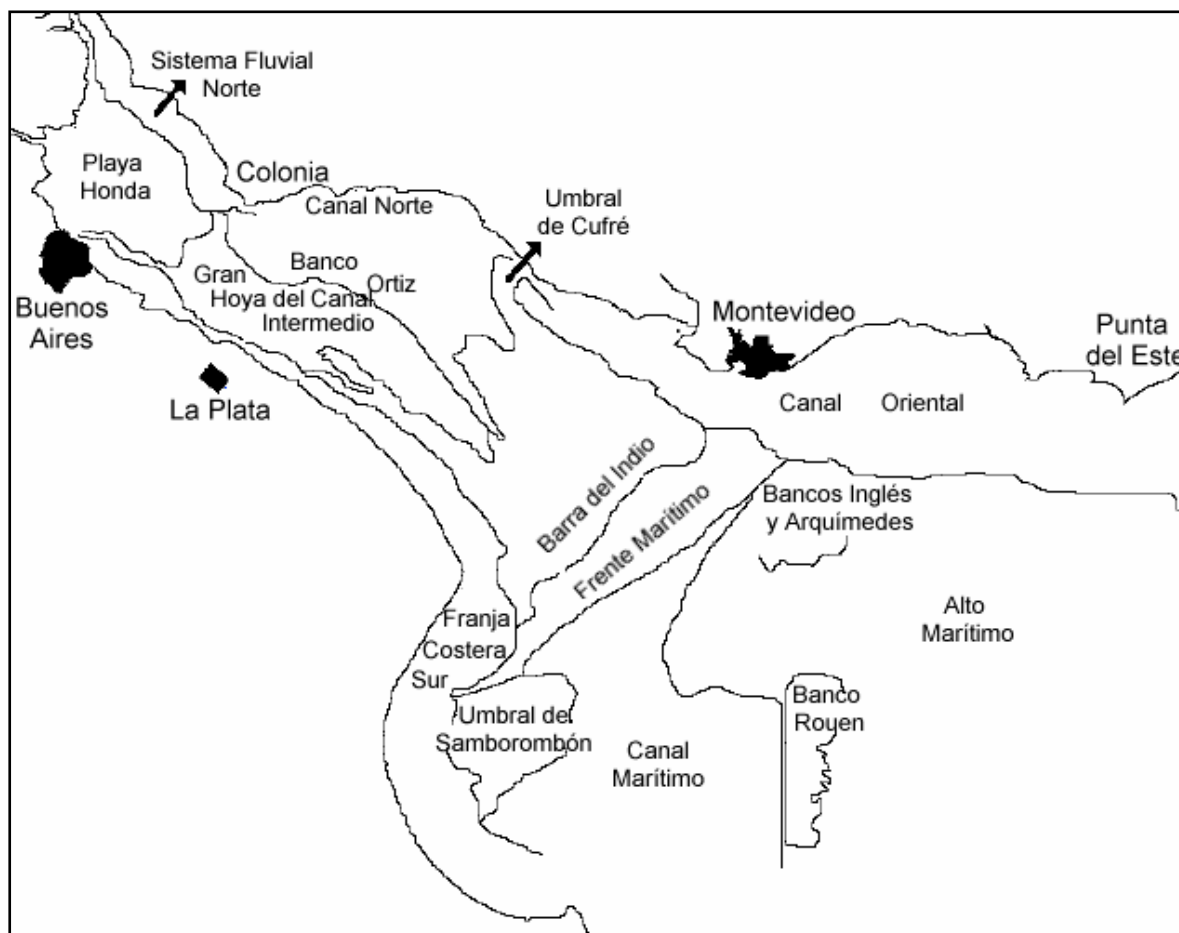


Figura 2.4: Morfología del Río de la Plata. Modificado de Ecoplata (1997).

Se han identificado en el Río de la Plata áreas con rasgos particulares que se han identificado como unidades morfológicas. Las mismas se muestran en la Figura 2.4 y se describen a continuación. Playa Honda, una prolongación subacuática del delta del río Paraná que está limitada aproximadamente por la isóbata de 6 m. El sistema Fluvial Norte, un sistema que incluye todos los canales que se extienden desde las cuencas de drenaje del Río de la Plata hasta Colonia; incluye canales, bancos longitudinales y dunas subacuáticas arenosas y asimétricas. El Banco Ortiz, se desarrolla entre el Canal Norte, cerca de la costa uruguaya y la Gran Hoya del Canal Intermedio y es una gran meseta con una pendiente pronunciada hacia el sur limitada por la isóbata de 6 m. La Gran Hoya del Canal Intermedio, es una extensa fosa existente al Sur del Banco Ortiz. El Canal Norte, se extiende entre la costa uruguaya y el Banco Ortiz, con una profundidad de 5 m. El Canal Oriental, es una depresión alargada que se extiende en sentido Este-Oeste desde el Canal Norte

hasta las proximidades de Punta del Este, donde cambia su dirección hacia el Noreste y aumenta abruptamente. Barra del Indio, es una planicie suave y amplia que se desprende en dirección Noreste de la costa argentina entre Punta Indio y Punta Piedras. La Franja Costera Sur, es el sector costero argentino entre el río Luján y el Cabo San Antonio que se extiende entre la costa y las isóbatas de 6 a 9 m. El Alto Marítimo, es el sector exterior del Río de la Plata, y contiene los Bancos Inglés, Arquímedes y Rouen. El Umbral de Samborombón, es una superficie triangular entre el centro de la Bahía de Samborombón y el canal Marítimo. El Canal Marítimo, es una depresión extensa con suave pendiente y un perfil asimétrico, que está entre la Barra del Indio, la Franja Costera Sur, el Umbral de Samborombón y el Alto Marítimo.

Considerando la geomorfología y la dinámica del Río de la Plata, en el proyecto Freplata (2004) se divide al Río de la Plata en dos regiones. La región Interior y la región Exterior, separadas por la barrera geomorfológica, Barra del Indio, que se extiende a lo largo de la línea que une Punta Piedras en Argentina con Montevideo en Uruguay. Esta clasificación considera las zonas del Río de la Plata interior e intermedia, mencionadas previamente, como una sola región denominada Interior.

2.3 - Oceanografía

En el Río de la Plata las corrientes son la resultante de las corrientes de marea, tanto astronómica como meteorológica, de las corrientes generadas por diferencia de densidad y del flujo que genera la descarga fluvial de los ríos Paraná y Uruguay. Los cambios de nivel en el Río de la Plata se deben a la influencia del océano y a las perturbaciones atmosféricas que pueden alterar marcadamente el desplazamiento de las aguas.

La marea astronómica afecta a todo el Río de la Plata y la acción de las mareas del océano se registra hasta la ciudad de San Pedro, al norte de la Provincia de Buenos Aires, a orillas del Río Paraná y hasta la ciudad de Gualeguaychú, en el Río Uruguay (Boschi, 1988). El régimen de mareas es semidiurno con desigualdades diurnas y la componente principal es la M_2 con un 80% del total de la energía de marea. Las otras componentes importantes de la marea son la O_1 , S_2 , N_2 y K_1 . Debido a la influencia del océano y a la menor profundidad, en la costa Sur del Río de la Plata se generan amplitudes de marea mayores que en la costa Norte, siendo las máximas 1 m y 0,4 m, respectivamente. Las ondas de marea tardan en recorrer el Río de la Plata aproximadamente 12 horas, por lo cual en cada instante existe en el río un ciclo completo de la componente semidiurna de la marea. La marea astronómica genera corrientes que alcanzan 1,5 m/s en la zona exterior del Río de la Plata y 0,2 a 0,7 m/s en la zona intermedia (Urien, 1972).

Las variaciones de nivel del río producidas por la marea astronómica son menores a las grandes perturbaciones que puede generar la acción de los vientos o las ondas de plataforma. Se han registrado niveles extremos de 3,5 m en las costas durante algunas tormentas y todos los

años se superan alturas de 2,2 m. La onda de marea oceánica es modificada dentro del río además de por el viento, por la fuerza de Coriolis, la profundidad y las variaciones de la sección transversal.

En el Río de la Plata ocurren simultáneamente corrientes en diferentes direcciones, debido principalmente a que a un mismo tiempo se manifiestan distintos tipos de marea. Debido a la mayor profundidad del río en la zona Norte sobre la costa uruguaya, las aguas marinas impulsadas por las mareas penetran en el río profundamente, en cambio en la zona de la Bahía de Samborombón los bajo fondos dificultan y retardan la penetración. Por otro lado, si se presentan vientos el régimen hidrodinámico puede cambiar completamente. Los vientos de la región exhiben cierta regularidad estacional, en la primavera y el verano dominan los vientos desde el océano, mientras que durante otoño e invierno existe cierto equilibrio entre los vientos desde el continente y los marinos. Como consecuencia, durante el otoño y el invierno se produce un mayor avance del agua dulce descargada a lo largo de la costa uruguaya, en tanto que durante la primavera y el verano ese efecto se registra en la costa argentina. Los vientos del verano que provienen del ESE y SE favorecen el ingreso al Río de la Plata de agua salada por la capa superior, lo cual permite que las aguas de la plataforma continental, saladas y más claras, alcancen la costa de Punta del Este. En invierno la relación es más compleja, predominan vientos de las direcciones NNW, E, N y NW pero la intensidad mayor proviene del sector SSW. De esta forma la influencia residual del viento es débil. De todas formas se observa que los vientos del NNW favorecen la evacuación de las aguas dulces y salobres. Por otro lado, con fuertes sudestadas las aguas del río son empujadas hacia la zona superior, conteniendo las aguas que descargan los tributarios, por lo que se pueden producir grandes inundaciones en las zonas costeras y un aumento del nivel del Río de la Plata.

2.4 - Caracterización de la región estuarina del Río de la Plata

En la región exterior del Río de la Plata se produce el encuentro de las aguas dulces de la descarga continental con las aguas saladas provenientes del Océano Atlántico y se genera una zona de mezcla, la cual presenta características de estuario. La interacción entre las dos masas de agua puede generar distintas estructuras salinas y patrones de circulación. El sector estuarino del río, es decir la franja que corresponde a las aguas salobres, sobrepasa Punta Brava (Uruguay) y se extiende más allá de Punta Indio en la costa argentina. Se han detectado aguas salobres hasta el Codillo (Urien, 1967), aunque con fuertes sudestadas pueden penetrar más adentro del río. La mayoría de los autores coinciden que esta zona del Río de la Plata es de tipo parcialmente mezclada, con una estructura vertical de salinidad en dos capas y que también bajo ciertas condiciones de viento se produce la mezcla vertical. Sin embargo se ha mencionado también la existencia de una cuña salina marcada.

2.4.1 - Estructura vertical de salinidad

Acha y Mianzan (2003) describen la zona estuarina del Río de la Plata como una zona de circulación en dos capas, una superior de agua dulce que circula hacia el océano y una capa inferior

más densa de agua salada que se mueve en dirección opuesta sobre el fondo del río hasta que la detiene un escalón, la Barra del Indio. Menciona que entre ambas capas existe una haloclina marcada por un cambio brusco en la salinidad. El espesor de la capa superior se mantiene mientras que el de la capa inferior decrece hacia la cabeza del río a medida que decrece la profundidad. La capa de agua salada es una cuña salina que se introduce por el fondo desde el océano y que es típica de un estuario de poca amplitud de mareas y suave pendiente de fondo. Su máximo avance hacia el interior del río se denomina el frente salino de fondo y es la frontera entre la zona intermedia y la zona exterior o estuarial del Río de la Plata. Por otro lado, el máximo avance del agua dulce hacia el océano es el frente salino de superficie y el límite exterior de la zona estuarial. Esta frontera es una zona variable de interacción entre el Río de la Plata y el océano, cuya forma y posición geográfica dependen de la acción recíproca de las fuerzas opuestas y fluctuantes que actúan sobre el sistema. La acción de los vientos en el gran espejo de agua que forma la zona exterior del río, de gran superficie y poca profundidad, puede generar variaciones en la estructura salina. En condiciones de viento normales, los efectos del mismo solo se sienten en la capa superior del río, por encima de la haloclina. Sin embargo, de vez en cuando soplan en la zona vientos fuertes del Sudeste que producen la mezcla de las dos capas de agua y en pocas horas el hábitat de los organismos de la zona estuarina cambia bruscamente. Una vez que el viento disminuye, el río fluye sin obstáculos desplazando las aguas mezcladas hacia el océano. Luego de un tiempo las aguas saladas penetran por debajo de las aguas fluviales y se restablece la condición normal.

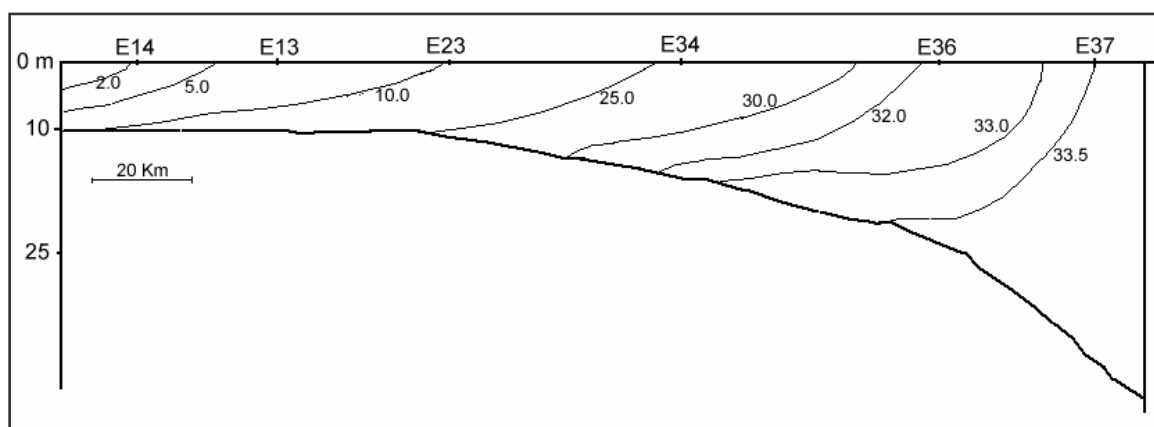


Figura 2.5: Perfil vertical de salinidad entre las estaciones 14 (35°12' S - 56°23' W) y 37 (36°24' S - 55°02' W) de la campaña C03/81, marzo de 1981. Modificado de Boschi (1988).

Por otro lado Boschi (1988) reafirma la idea de que el viento influye en el ingreso de las aguas marinas y en la mezcla con las aguas dulces. Menciona que con vientos de más de 10 m/s del Oeste y Sudoeste las aguas se mezclan y se detecta un alto grado de salinidad en toda la columna de agua. En cambio con vientos del Norte y del Noreste se observa una pronunciada estratificación, con las aguas dulces en superficie por su menor densidad. En caso de que los vientos sean suaves o nulos la salinidad fluctúa según la marea y presenta una variación similar a

la misma. En la Figura 2.5 se muestra un perfil vertical de salinidad en una transecta ubicada aproximadamente en el eje del río, que incluye las aguas de la zona estuarina y del océano, obtenido durante una campaña de medición realizada por el INIDEP en 1981. En la misma se observa que la penetración de las aguas marinas hacia el interior del río, ocurre en forma de cuña, 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.

En los informes de ECOPLATA (1997 y 2001) se señala que la estructura salina vertical experimenta un ciclo de estratificación y mezcla controlado por el caudal fluvial y por el viento. El límite medio de la intrusión salina (para caudales medios y vientos calmos) se ubica entre las secciones de Punta Yeguas y Punta Tigre, en las cercanías de la Barra del Indio. Cuando se desarrolla una estratificación vertical, el esquema de circulación-estratificación dominante del frente salino es del tipo parcialmente mezclado, con una doble capa desarrollada y una haloclina marcada. Se menciona que los vientos con velocidades mayores a 10 m/s (con ocurrencia menor o igual al 5%) mezclan la columna de agua hasta más de 10 m de profundidad, mientras que los vientos de intensidades mayores a los 7 m/s (con ocurrencia igual al 25%) mezclan las aguas poco profundas, de profundidades menores a los 7 m. El viento medio promedio anual en Montevideo tiene intensidad de 7 m/s, por lo que habitualmente, a escala temporal semanal, la zona es bien mezclada o parcialmente mezclada (diferencias de salinidad menores a 3 ppm, sin una haloclina marcada). En definitiva, concluyen que la dinámica del Río de la Plata es gobernada por tres forzantes externos, la marea a escala horaria, el viento a escala sinóptica de 1 a 10 días y la descarga fluvial a escala mensual e interanual.

Una descripción detallada de la estructura de estratificación y circulación se realiza en el Informe del proyecto Ecoplata (1997). En términos generales, según la relación entre el caudal fluvial y el volumen de marea, la zona estuarina del Río de la Plata se clasificaría como de tipo mezclada verticalmente. Sin embargo, las características morfológicas e hidrológicas locales modifican esta clasificación general, y debe seguirse una aproximación zonal. La Bahía de Samborombón se clasifica localmente como una zona levemente estratificada y a menudo bien mezclada. Las regiones intermedia y exterior se pueden definir como ambientes parcialmente mezclados o con una mezcla variable. Con frecuencia se encuentra una estructura mezclada verticalmente debido al efecto de los vientos. La estructura tipo cuña salina se descarta que exista, salvo cuando ocurren condiciones excepcionales de descarga fluvial. En el Canal Oriental, se genera una circulación de doble capa. La capa superior asociada con la salida fluvial con una profundidad que varía en función del caudal fluvial, la marea, y la mezcla turbulenta dada por el viento. La capa inferior está asociada con el ingreso de agua marina y con la profundidad de la capa, la cual es determinada por las mareas y los vientos. Ejemplos de la estructura vertical salina en el Canal Oriental se presentan en la Figura 2.6. En la misma se puede observar la variabilidad del perfil vertical de salinidad en la zona, presentando características de una zona mezclada en un determinado momento y una estratificación vertical en otros.

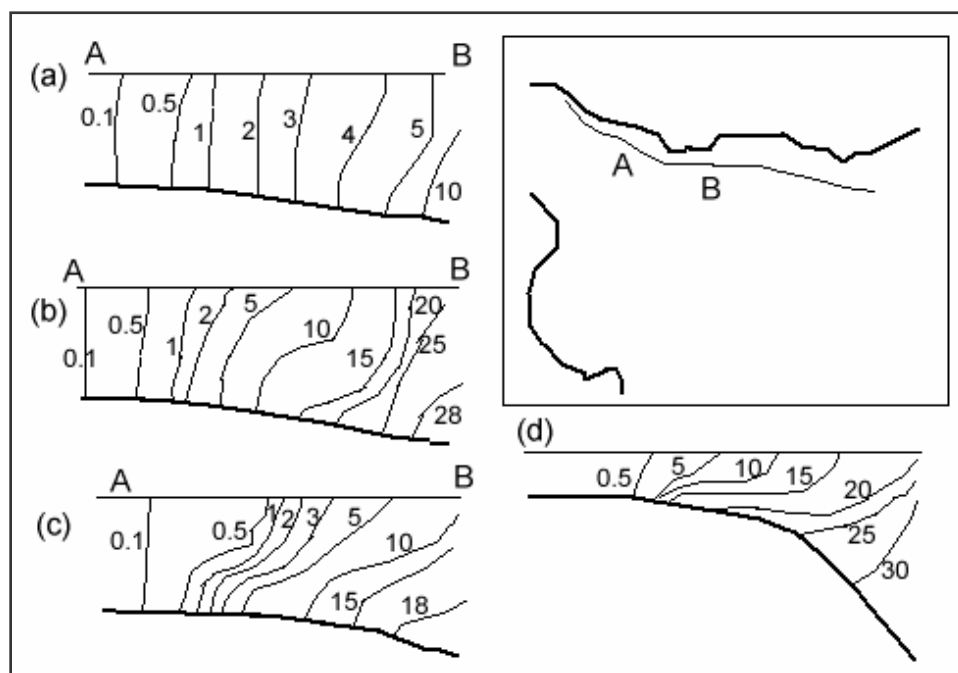


Figura 2.6: Ejemplos de la estructura vertical salina en el Canal Oriental. (a) bien mezclado (diciembre 1984), (b) levemente estratificado (enero 1985), (c) parcialmente estratificado (febrero 1985) y (d) estratificación en todo el Canal Oriental con caudal medio 25.000 m³/s (abril 1986). Modificado de EcoPlata (1997).

Guerrero et al (1997) presenta una caracterización del perfil vertical de salinidad en el Río de la Plata, a partir de 3 conjuntos de mediciones realizadas en tres transectas distintas, una ubicada al Norte del río a través del Canal Oriental, una central a través del eje del río y una tercera en el Sur a lo largo de la costa argentina. La primera serie de mediciones se realizó durante agosto de 1992, con un viento medio de 2,7 m/s en dirección saliente al río. Los resultados mostraron en este caso una alta estratificación vertical en las tres transectas, con gradientes verticales de salinidad entre 4,6 y 15,8 ppm/m. La segunda serie de mediciones fue realizada durante noviembre de 1995 con un viento medio entrante al río de 7,4 m/s. En este caso no se observó estratificación en la sección Norte, mientras que una estratificación leve, entre 3,9 y 8,3 ppm/m se observó en las secciones central y sur. La tercer serie de mediciones fue realizada en condiciones muy cercanas a la de una sudestada, con vientos entrantes al río, principalmente del SE y ESE con intensidades entre 10 y 14 m/s durante más de 60 horas. Los perfiles de salinidad que se obtuvieron en este caso mostraron que no había estratificación vertical, salvo en una zona pequeña de la sección Norte donde se observa una leve estratificación de 2,6 ppm/m.

2.4.2 - Estructura horizontal

En la Figura 2.7 se muestran las líneas de isosalinidad de superficie y fondo obtenidas durante una campaña realizada por el INIDEP en Marzo de 1981 en la zona de aguas salobres del Río de la Plata (Boschi 1988). Se observa en la misma la variabilidad espacial de la salinidad en la región exterior del Río de la Plata y las diferencias existentes entre la salinidad superficial y la salinidad de fondo.

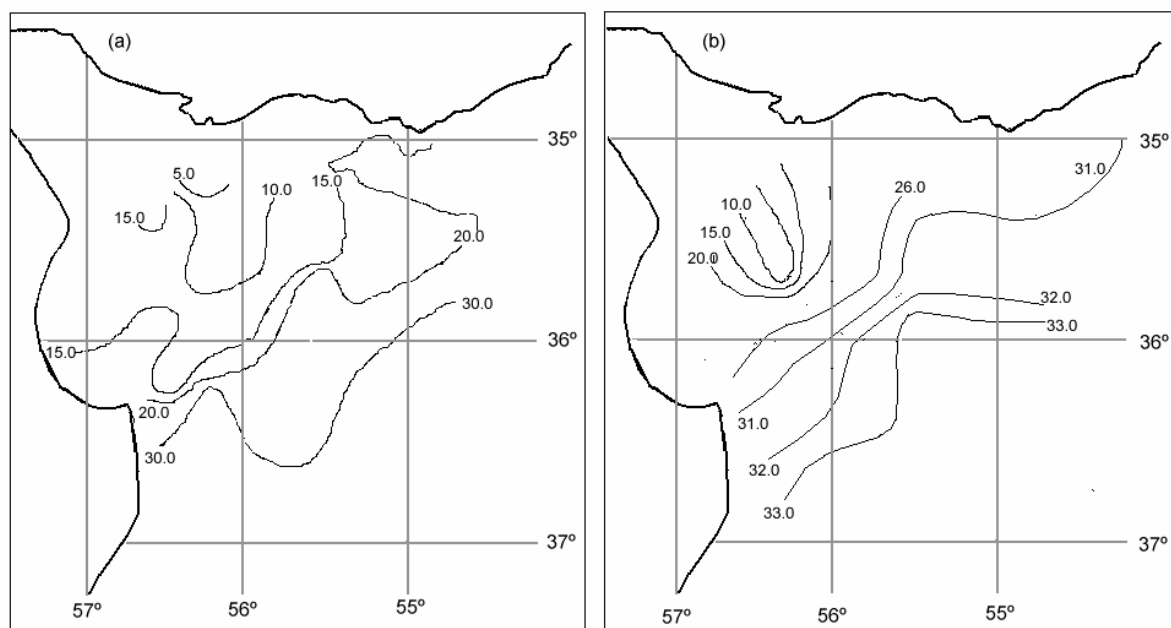


Figura 2.7: El Río de la Plata y el frente Marítimo. (a) Salinidades de superficie y (b) Salinidades de fondo. Campaña C03/81, marzo de 1981. Modificado de Boschi (1988).

Con relación a la variabilidad en el plano horizontal de la salinidad, se ha identificado que dicho campo presenta una caracterización estacional (Guerrero et al 1997, Piola et al 2003, Sepúlveda et al 2003). En las estaciones de verano y primavera, cuando la descarga de agua dulce es más baja que durante el resto del año y cuando los vientos predominantes provienen del sector Este, se extiende una pluma de agua salobre sobre la costa argentina. En cambio durante otoño e invierno la descarga de agua dulce proveniente de los tributarios alcanza su pico anual y los vientos característicos son salientes al Río de la Plata, lo cual junto con el efecto de Coriolis, generan un desplazamiento de las aguas menos salinas sobre la costa Norte del Río de la Plata, la costa uruguaya.

Piola et al (2003) presentan la distribución de salinidad anual, de verano y de invierno, en superficie y en fondo, determinada a partir de un análisis de datos oceanográficos históricos existentes en el Río de la Plata. En la Figura 2.8 se muestra la distribución de salinidad en superficie y en fondo. Respecto a la distribución de salinidad en superficie se observa que los mayores gradientes de salinidad existen entre las isohalinas de 10 y 20 ppm. En la Bahía de Samborombón la variación horizontal de salinidad es menor en invierno que durante el verano. Durante el verano además se observan altos gradientes de salinidad cerca de la costa Norte entre Montevideo y Punta del Este. Respecto a la distribución de salinidad en el fondo del Río de la Plata se observa que la salinidad de fondo tiene una variación menor que la salinidad en la superficie y el patrón es similar en ambas estaciones.

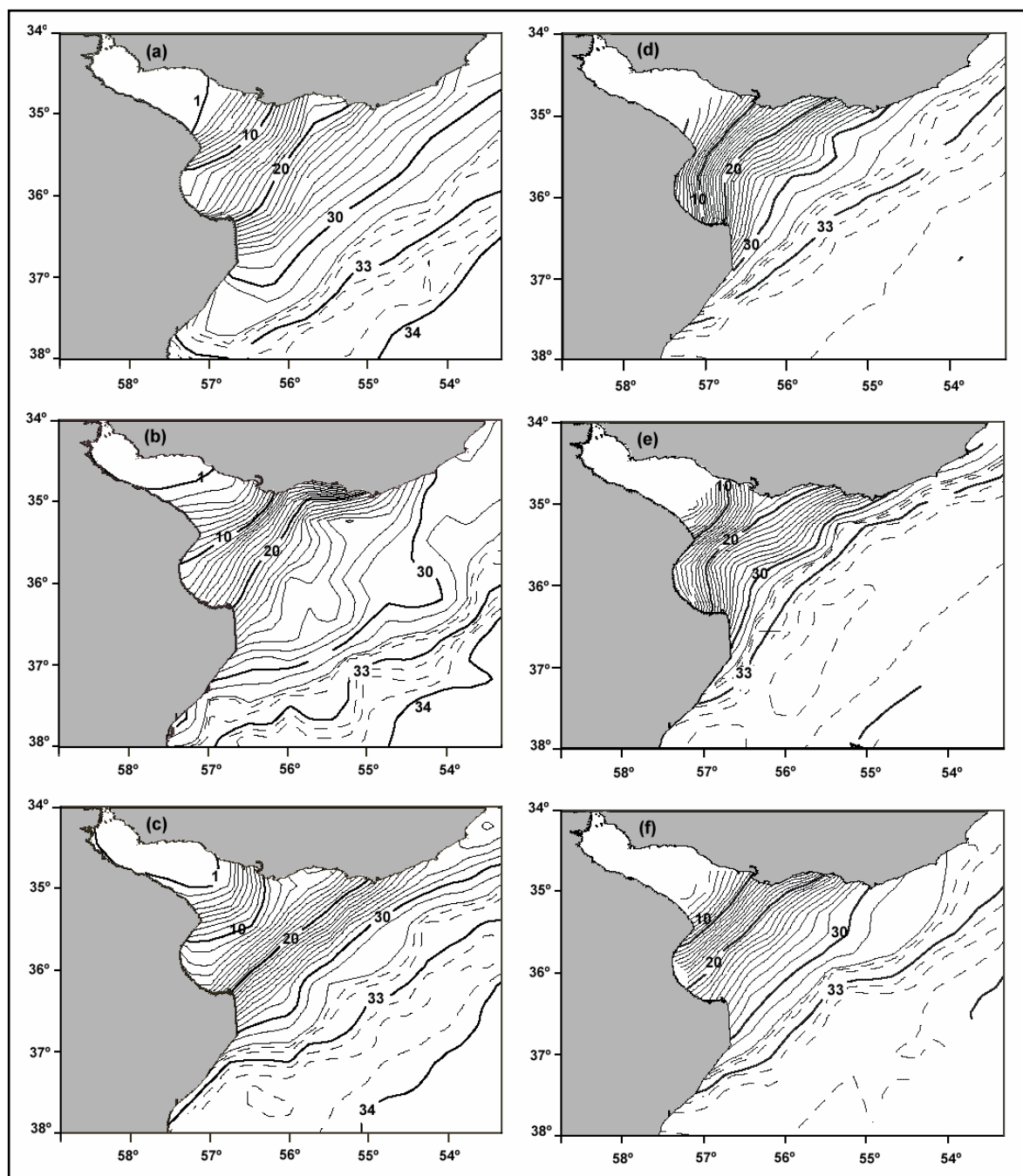


Figura 2.8: Distribución de salinidad superficial (a) anual, (b) de verano y (c) de invierno. Distribución de salinidad de fondo (a) anual, (b) de verano y (c) de invierno. Modificado de Piola et al (2003).

En Ecoplata (1997) se analiza la variación de la salinidad en la costa uruguaya, es decir sobre la costa Norte del Río de la Plata. Se menciona que las salinidades mensuales máximas ocurren en el verano (entre noviembre y marzo), mientras que las salinidades mínimas mensuales ocurren durante parte del otoño e invierno (entre abril y agosto). En Playa Pascual, cerca de la boca del río Santa Lucía, la salinidad media del período 1981 a 1985 fue menor a 1 ppm. La distribución de frecuencias muestra que el 62% de los registros diarios son menores a 1 ppm y sólo un 11% de los registros diarios son mayores a 3 ppm. En Montevideo la salinidad mensual

muestra salinidades menores en invierno que durante el verano, pero se registran valores menores a 3 ppm y mayores a 30 ppm durante casi todo el año. Por otro lado la variación de salinidad en una determinada zona disminuye al pasar de la región de transición entre aguas dulces y estuariales, a la zona de transición entre aguas estuariales y marinas.

En definitiva, el Río de la Plata presenta en su zona exterior una distribución vertical y una distribución horizontal de salinidad, generadas por el encuentro entre las aguas dulces continentales y las aguas saladas del Océano Atlántico. Considerando que en esta zona la salinidad es variable y que se observa la influencia de la marea, esta zona exterior podría clasificarse como una zona con características de estuario. Por otro lado, la zona estuarial del Río de la Plata puede clasificarse como de tipo parcialmente mezclada y de tipo mezclada verticalmente, en función de las características morfológicas e hidrológicas locales de cada zona y de las características de los vientos en diferentes instantes.

Capítulo 3

ANALISIS DE DATOS

En este capítulo se presenta el análisis de mediciones de caudal fluvial, salinidad, corrientes y vientos realizadas en algunas zonas del Río de la Plata. El objetivo del mismo es presentar una serie de análisis efectuados y los resultados obtenidos que han contribuido a la caracterización del campo salino y del campo hidrodinámico en algunas zonas del Río de la Plata. Los resultados aquí presentados son utilizados posteriormente en la etapa de modelación numérica.

3.1 - Caudal fluvial

A partir de mediciones de caudales que realiza el INA (Instituto Nacional del Agua Argentino) en los ríos Paraguay y Uruguay se obtuvieron los caudales medios mensuales de ambos ríos para el período 1991-2003. A partir de éste conjunto de datos se realizaron varios análisis que se presentan a continuación.

En la Figura 3.1 se muestra la distribución anual del caudal del río Uruguay, del caudal del río Paraná y del caudal total que ingresa al Río de la Plata, calculado como la suma de los aportes de los ríos Paraná y Uruguay. Estas distribuciones anuales fueron calculadas a partir de los caudales medios mensuales registrados durante los trece años comprendidos entre 1991 y 2003. Los caudales medios que descarga el río Uruguay son menores a los descargados por el río Paraná y la distribución anual de los mismos es diferente. Los resultados obtenidos para el caudal del río Uruguay muestran que las descargas mayores ocurren a partir del mes de abril, manteniéndose durante el otoño y el invierno, disminuyendo en agosto y setiembre, pero con un pico de caudal en el mes de octubre. La distribución de caudales del río Paraná muestra un aumento de caudal a partir de febrero que se mantiene durante el otoño, con el caudal mayor correspondiente al mes de marzo. La suma de ambos caudales constituye el aporte de agua dulce principal al Río de la Plata y su distribución anual muestra meses de bajo caudal como agosto con $18.500 \text{ m}^3/\text{s}$ y meses de caudales altos como marzo y mayo con cerca de $28.000 \text{ m}^3/\text{s}$. La distribución anual muestra un pico de caudal en el período marzo, abril y mayo y un segundo pico en noviembre.

Estos resultados coinciden con la información bibliográfica mencionada en 2.4.2, donde se señala que la descarga de agua dulce en el Río de la Plata presenta durante primavera y verano los valores más bajos, mientras que durante otoño e invierno se alcanzan los caudales máximos anuales. Por otro lado, considerando todo el período de datos se determinó el caudal medio total de descarga igual a $24.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Este valor también es similar al indicado por la bibliografía, $22.000 \text{ m}^3/\text{s}$, mencionado en 2.1 y la diferencia entre ambos se debe a que utilizaron una base de datos más extensa para su determinación.

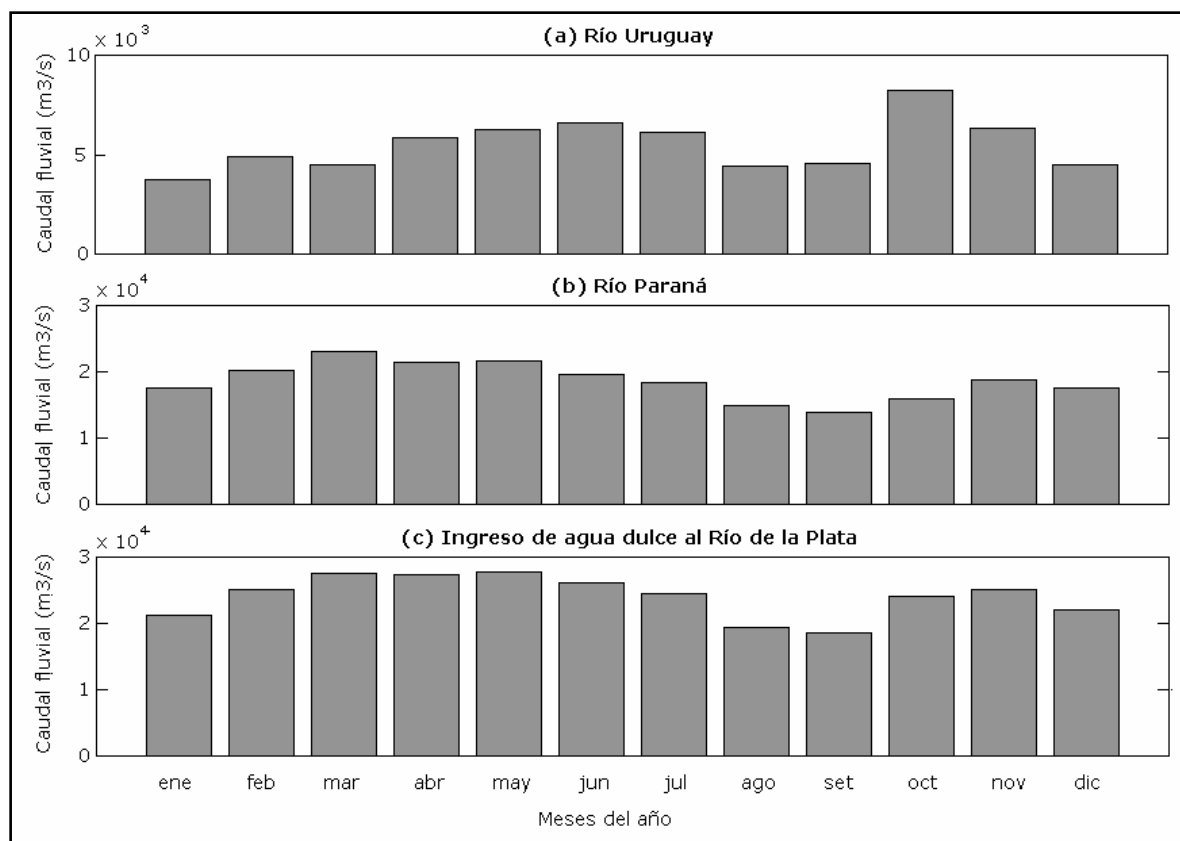


Figura 3.1: Distribución anual del caudal fluvial medio mensual entre los años 1991 y 2003 para (a) el Río Uruguay, (b) el Río Paraná y (c) la suma de ambos.

Durante el período de datos analizados ocurrieron varios eventos de caudales extremos asociados a la ocurrencia del Niño o de la Niña (Ecoplata, 2001). Durante 1998 se inició un evento de la Niña y se registraron los máximos mensuales de este período analizado, siendo 48.500 m³/s el caudal medio de enero y 64.600 m³/s el caudal medio del mes de mayo. Por otro lado, durante los años 1999 y 2000 se registraron valores mínimos mensuales de por ejemplo 11.771 m³/s en diciembre de 1999 y 815 m³/s en el río Uruguay durante enero del 2000.

3.2 - Registros de corriente en la costa de Montevideo

3.2.1 - Información de base

El presente análisis se basa en los registros de mediciones directas de corrientes efectuadas entre 1982 y 1983 en diferentes estaciones de medición frente a la costa de Montevideo por la empresa CDM & Asociados. En ese entonces se realizaron dos campañas de mediciones, de aproximadamente un mes de duración cada una, entre los meses de diciembre de 1982 y febrero de 1983. El resultado de estas campañas es el conjunto de valores, en cada punto fijo, de la dirección y el módulo de la corriente cada treinta minutos, medidas con correntógrafos marca ENDECO. Son catorce los puntos o estaciones donde se tomaron datos de corrientes y en cinco de ellas se tomaron simultáneamente datos por separado cerca de la superficie y cerca del fondo. En

la Figura 3.2 se muestra la ubicación de las cinco estaciones donde se tomaron datos de corrientes en superficie y fondo durante la campaña de CDM. Las estaciones 1 y 3 son las que están ubicadas más cerca de la costa, siendo la distancia entre las mismas y la costa de aproximadamente 2 Km.

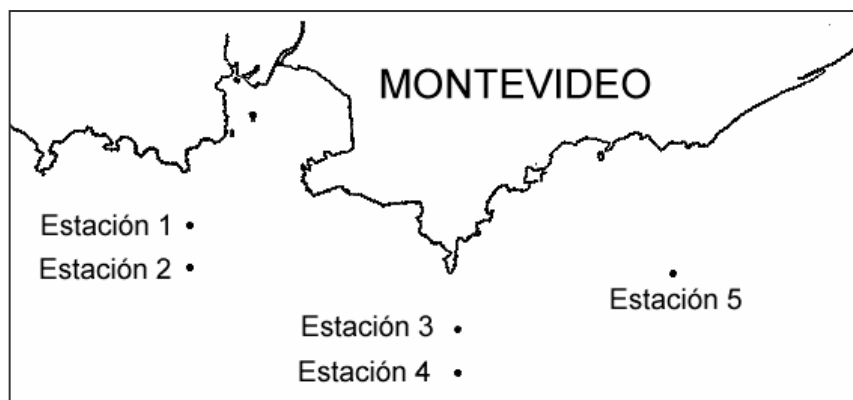


Figura 3.2: Ubicación de las estaciones de medición de corrientes.

En un convenio realizado en el IMFIA en el año 2002 se analizaron estos registros de corriente y se determinó que el conjunto total de velocidades registradas posee una dirección preferencial de escurrimiento en sentido Este-Oeste, acompañando la forma de la costa. Además, un análisis de corrientes residuales determinó que aunque se filtre la marea, el comportamiento general es también en sentido Este-Oeste, con una dirección preponderante de escurrimiento residual hacia el Este. A partir de un análisis de las componentes principales de las corrientes por efecto astronómico, se determinó la componente astronómica de la velocidad. Por ejemplo para la estación 1 se determinó que en la dirección Este las corrientes por marea son del orden de 45 cm/s, mientras que la componente residual alcanza valores un poco mayores, del orden de 50 cm/s. En la dirección Norte, las componentes astronómicas y la componente residual alcanzan valores mucho menores, del orden de 7 cm/s y 10 cm/s respectivamente.

Nº estación	Profundidad (m)
1	7,6
2	8,1
3	9,9
4	10,7
5	8,5

Tabla 3.1: Profundidad en cada estación de medición de corriente.

Nº estación	Cantidad de registros
1	2799
2	2800
3	2581
4	2881
5	2869

Tabla 3.2: Cantidad de registros simultáneos de corriente en superficie y fondo por estación.

Estas medidas simultáneas de corriente en superficie y en fondo durante aproximadamente dos meses, permiten analizar el perfil vertical de velocidades en cinco lugares cercanos a la costa uruguaya. De esta forma es posible obtener una clasificación del perfil vertical de velocidades. Aunque las estaciones se ubican relativamente cerca de la costa la profundidad en las mismas supera los 7 m. En la Tabla 3.1 se muestra la profundidad en cada uno de los puntos de medición.

Las mediciones en superficie fueron realizadas aproximadamente a 3 m de la superficie y las mediciones de fondo a 2 m del fondo. El número de registros de corriente simultánea en fondo y superficie existentes para cada estación de medición se presenta en la Tabla 3.2.

3.2.2 - Análisis de registros

Para clasificar los patrones del flujo vertical en cada una de las estaciones, se calculó la componente principal del flujo para cada uno de los registros (dirección Este-Oeste, con sentido positivo hacia el Este) en superficie y fondo, y se determinó el porcentaje de tiempo asociado a los cuatro tipos de flujo siguientes:

- Descarga: cuando la componente de superficie y de fondo son positivas, es decir salientes al río.
- Acumulación: cuando la componente de superficie y de fondo son negativas, entrantes al río.
- Circulación gravitacional: cuando la componente de superficie es positiva (saliente al río) y la componente de fondo es negativa (entrante al río). Flujo asociado a una zona parcialmente mezclada.
- Flujo inverso: es el flujo inverso a la circulación gravitacional, o sea cuando la componente de superficie es negativa (entrante al río) y la componente de fondo es positiva (saliente al río).

Esta división de los datos en cuatro patrones de flujo diferentes se realizó en primer lugar considerando los registros puros de corriente, obteniendo una clasificación del flujo medido. Por otro lado, se analizó la distribución del flujo residual para lo cual se removió la componente astronómica de los registros de corriente y luego se promediaron los datos en bloques de 24 horas. De esta forma se buscó identificar los patrones de flujo reales y los patrones del campo residual. Un análisis similar se puede observar en Elliot (1978).

Por último, se estudió el efecto del viento sobre los patrones de flujo residuales, considerando que los vientos generan tensiones en la superficie del Río de la Plata, capaces de modificar el perfil vertical de corrientes. Para no filtrar las variaciones en la corriente generada por los vientos, este análisis se realizó relacionando los vientos con las corrientes residuales, es decir, la corriente registrada menos la componente astronómica en cada instante. Los registros de viento utilizados en el análisis fueron mediciones de intensidad y dirección del viento efectuadas cada una hora en la estación Carrasco ubicada en Montevideo. Esta estación es la más cercana a las estaciones de medición de corrientes en la cual se efectuaron medidas de viento durante el período 1982-1983. Calculando las componentes en la dirección Este-Oeste del vector viento se identificó el porcentaje de tiempo en el cual la componente del viento y de la corriente superficial tienen igual sentido, indicando una posible influencia del viento en el flujo residual. Como las frecuencias de

medición de corriente y viento fueron distintas (30 minutos para las corrientes y una hora para el viento), este tercer análisis se realizó solamente con los registros de corriente simultáneos a los registros de viento.

3.2.3 - Resultados obtenidos

En la Tabla 3.3 se muestran los porcentajes de tiempo asociados a los cuatro tipos diferentes de flujo, calculados a partir de los registros de corriente en las cinco estaciones de medición anteriormente mencionadas. Los dos perfiles de flujo más comunes en todas las estaciones de medición durante estos dos meses fueron la descarga y la acumulación, flujos asociados principalmente al movimiento de la marea. La circulación gravitacional, el flujo característico de una zona parcialmente mezclada, como máximo ocurrió un 16,8% del tiempo en la estación 1 y solamente un 3,9% en la estación 5. Estos valores muestran que en general el flujo superficial y de fondo no tienen sentido opuesto y que la circulación gravitacional no fue el patrón de flujo vertical que ocurrió con mayor frecuencia en esta zona determinada del Río de la Plata durante éste período de tiempo.

	Descarga (%)	Acumulación (%)	Circulación gravitacional (%)	Flujo inverso (%)
Estación 1	44,9	33,9	16,8	4,3
Estación 2	43,6	36,5	14,3	5,6
Estación 3	42,3	43,2	9,9	4,1
Estación 4	33,2	41,9	8,8	8,8
Estación 5	37,7	49,5	3,9	8,0

Tabla 3.3: Porcentaje de frecuencia asociado a cada uno de los tipos de flujo para cada estación.

Para identificar la relación entre las corrientes de superficie y fondo del flujo medio en la costa de Montevideo, se realizó el mismo análisis considerando las corrientes residuales calculadas a partir de los registros y de la marea astronómica. De esta forma se remueven las principales componentes astronómicas de la corriente y no se consideran en este análisis las fluctuaciones de la corriente generadas por la marea. Para estudiar el flujo medio diario se pasa un filtro pasa bajo de 24 horas, de forma de remover otro tipo de fluctuaciones secundarias de las corrientes. A modo de ejemplo se muestra en la Figura 3.3 la componente Este-Oeste de la corriente registrada y del flujo residual filtrado, en superficie y fondo, para la estación de medición 1.

En la Tabla 3.4 se presentan para el flujo residual los porcentajes de frecuencia asociados a cada uno de los tipos de perfiles verticales de flujo. En este caso al filtrar la marea los patrones de flujo están asociados a los efectos de la descarga, vientos y corrientes por densidad. Se observa en dicha tabla que la descarga, la acumulación y la circulación gravitacional tienen grandes porcentajes de frecuencia asociados en la mayoría de las estaciones de medición. El tiempo asociado a la circulación gravitacional es mayor comparado con el análisis de los datos puros, lo

cual es esperable al filtrar las fluctuaciones generadas por marea que dominan muchas veces sobre los demás forzantes.

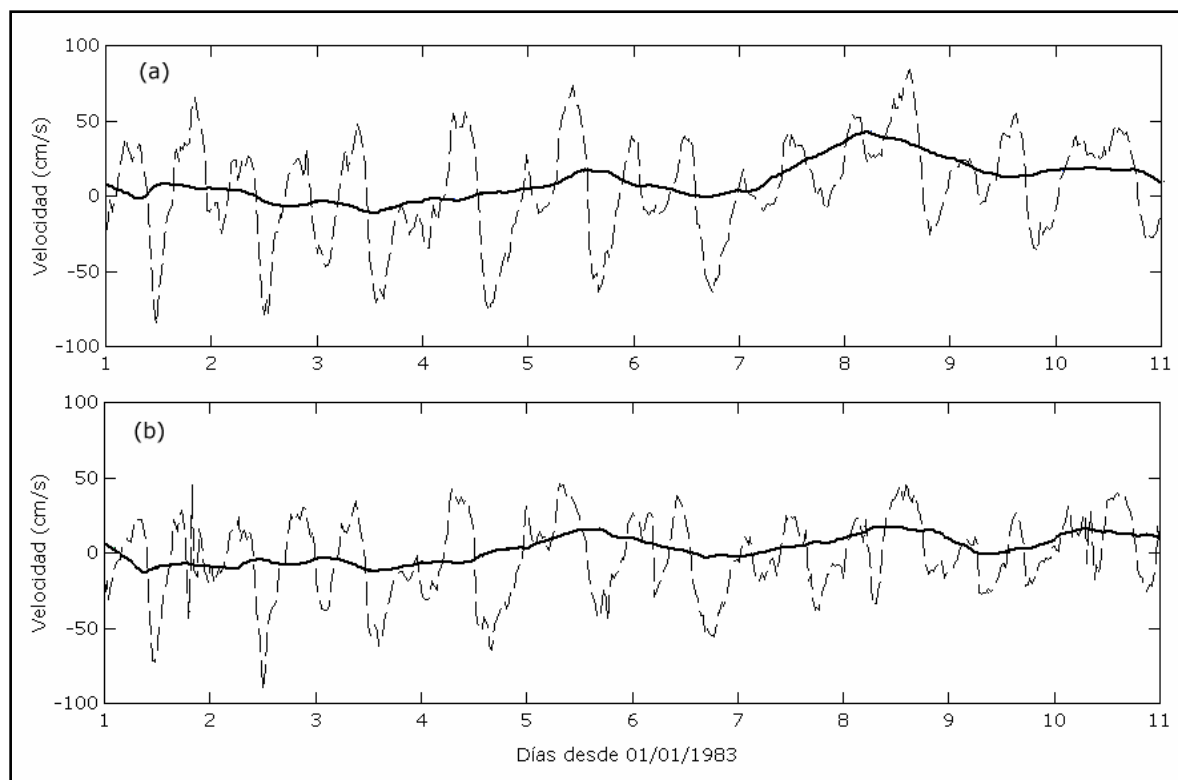


Figura 3.3: Ejemplo de los registros. La línea punteada muestra la componente Este-Oeste del flujo medido y la línea sólida muestra la componente Este-Oeste del flujo residual en la estación 1 en (a) superficie y (b) fondo.

	Descarga (%)	Acumulación (%)	Circulación gravitacional (%)	Flujo inverso (%)
Estación 1	47,4	19,5	31,1	2,0
Estación 2	46,5	26,8	24,6	2,1
Estación 3	33,2	35,5	30,0	1,4
Estación 4	22,2	39,0	29,9	8,9
Estación 5	33,7	53,8	6,0	6,6

Tabla 3.4: Porcentaje de frecuencia asociado a cada uno de los tipos de flujo de la corriente residual media para cada estación.

Los resultados obtenidos varían en función de la estación de medición considerada. Por ejemplo en la estación 1 el 47,4% del tiempo el flujo es de tipo descarga, el 31,1% del tiempo el flujo característico es tipo circulación gravitacional, el 19,5% del tiempo ocurre un flujo de acumulación y solamente un 2% ocurre un flujo inverso. En cambio en la estación 4 la mayor parte del tiempo se produce un flujo de acumulación con un 39%, seguido en porcentaje de frecuencia por la circulación gravitacional con un 29,9%, luego la descarga ocurre un 22,2% del tiempo y el flujo inverso tiene asociado un 8,9% del tiempo. Por otro lado en la estación de medición 5 la circulación gravitacional es el flujo con menor porcentaje de frecuencia asociado, solamente un

6%, mientras que la acumulación es el flujo que de mayor porcentaje de frecuencia (53,8%) seguido de la descarga (33,7%).

Para estudiar la influencia del viento sobre los cuatro perfiles de circulación vertical definidos, se calculó la componente en dirección Este-Oeste del viento registrado en la zona y se comparó el sentido de la misma con el sentido de la corriente superficial residual en cada estación. De esta forma se determinó para cada uno de los tipos de flujo, el porcentaje de tiempo en el cual la corriente residual superficial tiene igual sentido que el viento que ocurrió en ese instante. Por ejemplo para el flujo tipo descarga y circulación gravitacional, se calculó el número de casos en que la componente Este-Oeste del viento es hacia el Este, igual que la corriente residual superficial. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.5. Para cada uno de los cuatro tipos de flujo definidos anteriormente se presenta una columna A y una columna B. La columna A muestra la frecuencia de ocurrencia asociada a ese tipo de flujo. Estos valores son diferentes a los presentados en la Tabla 3.4 porque en este caso se analizó el flujo residual sin tomar un promedio en 24 horas para comparar de mejor forma con el viento. En la columna B se muestra el porcentaje de frecuencia asociado a los vientos de igual sentido que la corriente superficial para ese tipo de flujo.

	Descarga (%)		Acumulación (%)		C. Gravitacional (%)		Flujo inverso (%)	
	A	B	A	B	A	B	A	B
Estación 1	43,0	15,3	24,6	76,7	25,9	10,2	6,5	85,7
Estación 2	44,1	12,2	29,3	74,4	21,0	13,9	5,6	88,6
Estación 3	35,2	13,0	38,9	79,0	20,3	10,7	5,6	83,3
Estación 4	26,8	14,2	36,4	74,6	24,3	11,1	12,5	74,4
Estación 5	32,8	15,9	49,1	75,0	9,8	10,0	8,4	75,8

Tabla 3.5: Influencia del viento en el perfil vertical de flujo. Para cada patrón de flujo en la columna A se muestran los porcentajes asociados a cada tipo de flujo y en la columna B se presenta el porcentaje de frecuencia en que la componente Este – Oeste del viento tiene igual sentido la componente Este – Oeste de la corriente superficial.

La Tabla 3.5 muestra claramente dos tipos de resultados. Por un lado para la descarga y la circulación gravitacional, los porcentajes de tiempo asociados a un viento de igual sentido que la corriente superficial son menores a un 16%. Por otro lado para los flujos tipo acumulación y flujo inverso los porcentajes asociados a un viento de igual sentido que la corriente residual superficial son mayores a 74%.

En todas las estaciones de medición un flujo entrante al río en toda la columna de agua (flujo acumulación) coincide más de un 74% de las veces con un viento con componente negativa, en sentido Oeste. Esto indica cierta correlación entre el viento y el flujo acumulativo. Además, el 78% de éstos casos tienen una componente Este-Oeste del viento de intensidades importantes, mayores a 7 m/s, capaces de generar una tensión importante en la columna de agua y generar de ésta

forma un flujo entrante. Por otra parte, el flujo inverso está asociado con un viento de igual sentido que la corriente superficial entre el 74% y el 88% del tiempo, según la estación de medición. En estos casos también más del 80% de las componentes del viento son mayores a los 7 m/s, lo cual indica que los vientos con una componente Oeste importante son los que generan un flujo superficial hacia el continente y un flujo de fondo hacia el océano.

Por otra parte, tomando en cuenta todas las estaciones de medición, solamente entre un 12,2% y un 15,9% el flujo de descarga coincide con un viento de componente hacia el Este positiva, igual que la corriente superficial. En este caso la intensidad de la componente Este-Oeste de los vientos es menor, siendo solamente entre un 56% y un 60% de las veces mayores a 7 m/s, dependiendo de la estación de medición. Parece ser entonces que aunque vientos de intensidades importantes puedan intensificar la descarga en determinados casos, no es el principal generador de este tipo de flujo, como posiblemente lo sea la descarga fluvial. Por último, solamente entre un 10% y un 14% el viento tiene componente Este-Oeste positiva cuando ocurre el flujo tipo circulación gravitacional. En estos casos, la intensidad del viento es mayor a 7m/s entre un 59% y un 73% del tiempo, dependiendo de la estación de medición. De forma similar al caso anterior, es posible que el viento favorezca la circulación gravitacional en algunos casos pero principalmente este flujo no es favorecido por el viento, sino por la diferencia de densidades de las aguas salobres junto con la descarga fluvial.

A partir de éste análisis de los registros de corriente en la costa de Montevideo se puede concluir que al menos en ésta zona del Río de la Plata, la mayor parte del tiempo el flujo no se corresponde con la circulación característica de un estuario parcialmente mezclado pues no se observan dos capas de flujo claramente diferenciadas más de un 30% del tiempo.

Sepúlveda et al (2003), realizó un análisis de una serie de registros de perfiles verticales de corriente y salinidad en la zona de transición fluvio estuarial del Río de la Plata. Las principales conclusiones que se obtuvieron en dicho trabajo fueron que el Río de la Plata puede dividirse en dos zonas respecto a las características de circulación, el sector Sur y el sector Norte. En el sector Sur las corrientes residuales muestran una circulación estuarina bien desarrollada, donde las corrientes por marea son fuertes y proveen el efecto friccional necesario para desarrollar las dos capas de flujo. En cambio en el sector Norte, las corrientes de marea son débiles y su influencia en los efectos de fricción es mínima comparada con la influencia friccional del viento y de las corrientes costeras locales. Sin embargo, en los casos en que los vientos y las corrientes costeras locales sean débiles el flujo medio se puede asociar a un flujo tipo circulación gravitacional. Los resultados que presenta este trabajo para la región Norte del Río de la Plata, son similares a los obtenidos en éste análisis de mediciones de corrientes cercanas a la costa uruguaya: sobre la costa de Montevideo el perfil vertical medio de circulación la mayor parte del tiempo es un flujo de descarga generado por el caudal fluvial principalmente o un flujo de acumulación causado por la

acción del viento, siendo secundaria la circulación gravitacional generada por la diferencia de densidades y la descarga fluvial.

3.3 - Registros de salinidad en las playas de Montevideo

3.3.1 - Información de base

Se presenta a continuación un análisis de la salinidad sobre la costa de Montevideo. Este análisis se realiza a partir de las mediciones de salinidad que realiza la Intendencia Municipal de Montevideo en las playas de ésta ciudad desde 1997 en adelante. En el verano se toman muestras todos los días, en cambio en invierno se tienen cuatro o cinco registros semanales. Las muestras se toman en las playas, aproximadamente a 0,5 m de profundidad. A partir de estos datos se realizó un análisis estadístico de los registros en cuatro puntos de la costa: Escollera Sarandí, playa Ramírez, playa Pocitos y playa Verde, cuya ubicación se muestra en la Figura 3.4.

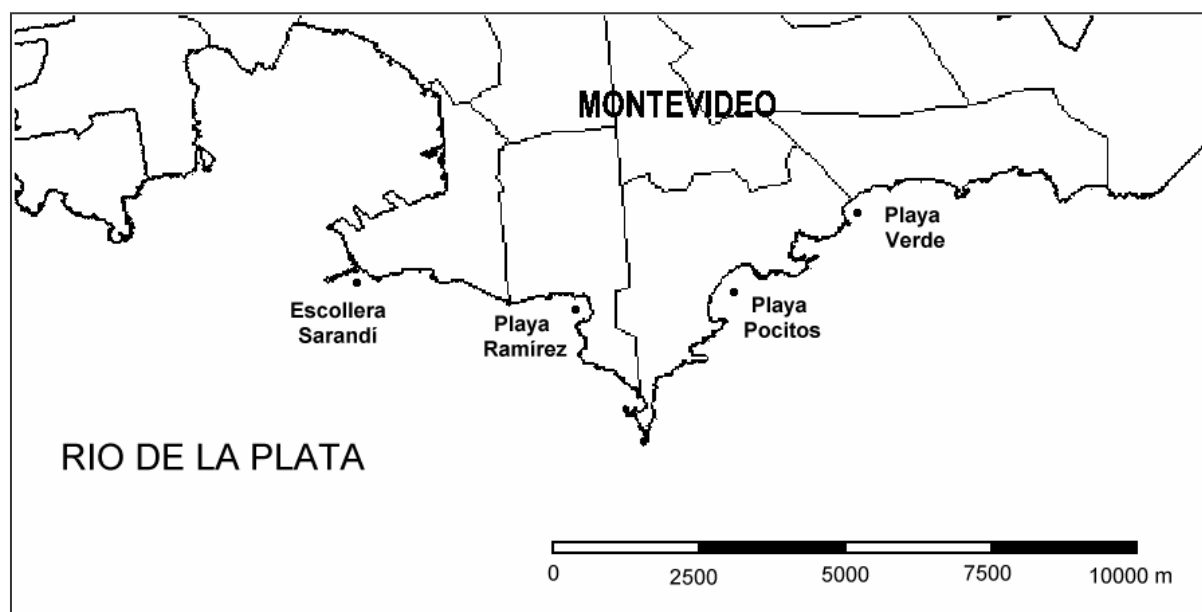


Figura 3.4: Ubicación de las estaciones de medición de salinidad en la costa de Montevideo. De Oeste a Este: Escollera Sarandí, playa Ramírez, playa Pocitos y playa Verde.

La base de datos utilizada está formada por todos los registros existentes entre los años 1997 y 2003. El número de registros varía mucho en función de la época del año, existiendo por ejemplo 10 registros de salinidad en Playa Verde para agosto del 2000 y 31 valores para diciembre del 2000 en el mismo punto. Por otro lado, entre los distintos años en los que se han tomado muestras la cantidad de datos también es distinta. Por ejemplo durante el año 1999 se tomaron 288 registros en la Escollera Sarandí, mientras que en el año 2003 el número de registros disminuyó considerablemente a 105 valores. Por último, hay diferencias en la cantidad de muestras entre los cuatro puntos de medición. Por ejemplo en el año 2002 se tomaron 138 medidas en la Escollera Sarandí, 166 en Playa Ramírez, 173 en Playa Pocitos y 161 en Playa Verde. En la Tabla

3.6 se muestra la cantidad de datos mensuales de salinidad para cada punto de medición entre los años 1997 y 2003.

(a) ESCOLLERA SARANDI

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	anual
1997	0	0	0	16	17	17	20	15	17	19	22	26	169
1998	24	26	26	23	17	19	21	20	21	20	21	26	264
1999	26	25	29	19	19	20	21	24	26	19	29	31	288
2000	30	29	30	17	18	20	11	11	9	11	22	30	238
2001	31	27	0	11	11	10	10	14	10	13	21	31	189
2002	26	20	13	10	9	5	10	8	9	8	10	10	138
2003	13	6	10	5	8	5	4	5	4	9	20	16	105

(b) PLAYA RAMIREZ

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	anual
1997	0	0	0	17	20	20	20	19	19	21	23	30	189
1998	30	27	29	25	16	20	23	21	22	21	24	30	288
1999	28	28	24	20	19	21	22	26	26	20	29	31	294
2000	31	29	30	18	21	21	13	11	11	12	23	29	249
2001	31	27	0	11	11	10	10	14	11	13	21	31	190
2002	26	27	20	11	10	9	10	12	12	8	10	11	166
2003	13	6	10	6	11	9	6	7	4	13	20	17	122

(c) PLAYA POCITOS

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	anual
1997	0	0	0	17	20	21	21	18	19	21	23	30	190
1998	30	27	29	25	18	20	23	21	22	21	24	30	290
1999	29	28	26	20	19	22	22	26	26	20	29	31	298
2000	31	29	31	18	21	21	13	11	12	12	23	28	250
2001	31	27	0	11	11	10	10	14	11	13	21	31	190
2002	28	24	23	12	10	10	12	12	12	9	10	11	173
2003	13	6	10	6	11	8	7	6	4	13	19	18	121

(d) PLAYA VERDE

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	anual
1997	0	0	0	17	20	20	20	18	19	20	24	30	188
1998	30	27	29	25	18	20	23	20	21	21	25	30	289
1999	28	27	31	21	19	22	22	25	26	20	29	31	301
2000	30	28	31	18	21	21	13	11	11	12	23	30	249
2001	31	27	0	11	11	10	10	14	11	13	21	31	190
2002	28	24	23	12	10	7	8	8	11	8	10	12	161
2003	13	6	10	4	11	4	7	6	4	11	18	18	112

Tabla 3.6: Número de datos de salinidad existentes para cada mes y año en (a) Escollera Sarandí, (b) playa Ramírez, (c) playa Pocitos y (d) playa Verde.

3.3.2 - Resultados obtenidos

Una de las características más importantes del campo salino que muestran los registros de salinidad en la costa de Montevideo es la variabilidad que presenta el mismo en esta zona. En todos los puntos de control analizados se han registrado salinidades bajas de 1 ppm y salinidades altas mayores a 30 ppm. Esto indica que sobre la costa uruguaya se tiene en algunos casos agua dulce, en otros casos agua salobre y en otros casos el agua de la zona es casi oceánica. En la Figura 3.5 se muestran todos los registros de salinidad de 1999 en la Playa Ramírez y los registros

del año 2000 en la Playa Verde. En la misma se observa lo mencionado anteriormente, la gran variabilidad que muestran los datos de salinidad en éstos puntos de la costa uruguaya.

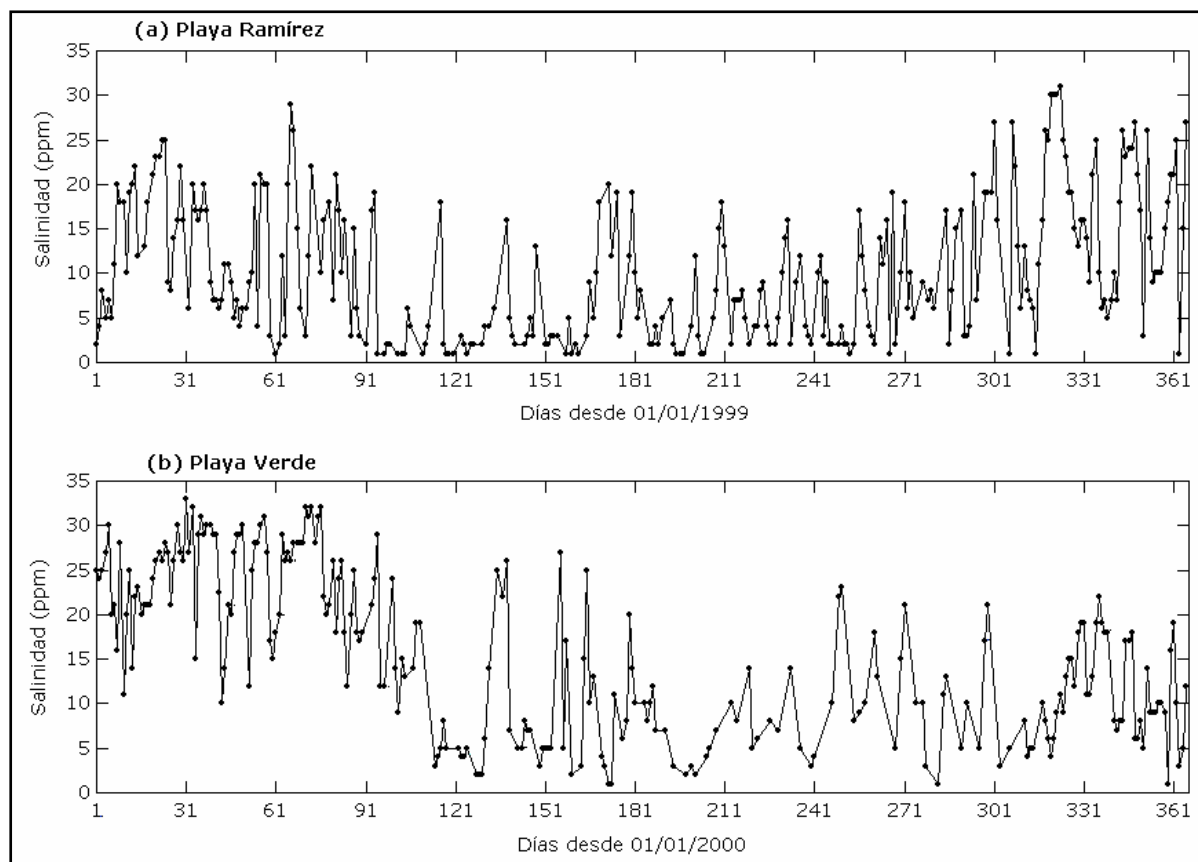


Figura 3.5: Valores de salinidad registrados en (a) Playa Ramírez durante 1999 y (b) en Playa Verde durante el año 2000.

Otro resultado que se desprende al analizar los registros de salinidad es que existe una variabilidad de la misma a lo largo del año, siendo en general durante el invierno la salinidad media menor a la salinidad media durante el verano. En la Figura 3.6 se muestra la variación anual de la salinidad media calculada a partir de los siete años de datos, para cada una de las cuatro ubicaciones sobre la costa uruguaya. Esta tendencia se observa a grandes rasgos también en la Figura 3.5.

En la Figura 3.6 se observa que la salinidad media mensual presenta un ciclo anual, con salinidades bajas durante otoño e invierno y salinidades mayores en primavera y verano. Los valores medios mensuales varían en función de la ubicación en la costa uruguaya, aumentando la salinidad media cuanto más al Este se ubique el punto de medición. Por ejemplo si analizamos la Playa Ramírez, la salinidad media mensual es 13 ppm en enero, 5 ppm en mayo y 10 ppm en octubre. En cambio en Playa Verde la salinidad media mensual en enero es casi 17 ppm, en mayo es 7 ppm y en octubre es 12 ppm. Sin embargo estos valores medios tienen grandes desviaciones estándar, lo cual es coherente con la gran variabilidad diaria de los registros de salinidad. La variabilidad anual de la salinidad en la costa de Montevideo determinada a partir de los datos,

muestra resultados coincidentes a los mencionados en 2.4.2 provenientes de un análisis de Ecoplata (1997).

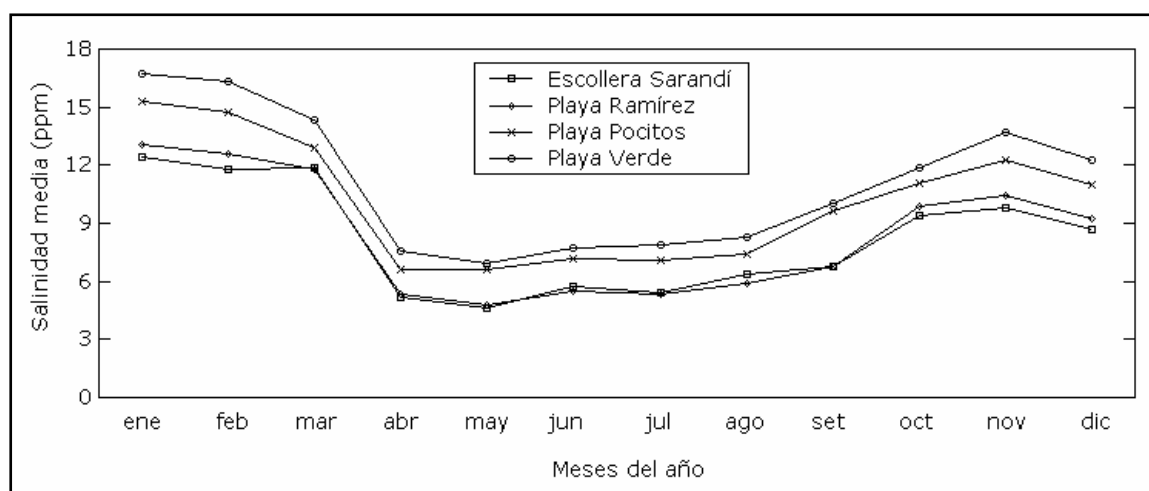


Figura 3.6: Salinidad media mensual calculada en las cuatro ubicaciones seleccionadas.

Los valores medios junto a los máximos y mínimos para cada mes se presentan en la Tabla 3.7. En la misma se observa que en todos los meses analizados se han registrado salinidades bajas de 1 ppm en toda la costa montevideana. Los valores máximos en cambio varían en función del mes y de la zona. Por ejemplo en los meses de verano se han registrado salinidades de hasta 33 ppm, mientras que en mayo y junio la salinidad máxima registrada fue 27 ppm.

	Escollera Sarandí			Playa Ramírez			Playa Pocitos			Playa Verde		
	Med	Min	Máx	Med	Min	Máx	Med	Min	Máx	Med	Min	Máx
ene	12,4	1,0	31,0	13,1	1,0	30,0	15,3	1,0	30,0	16,7	1,0	30,0
feb	11,8	1,0	31,0	12,6	1,0	33,0	14,7	1,0	33,0	16,3	1,0	33,0
mar	11,9	1,0	30,0	11,8	1,0	31,0	12,9	1,0	32,0	14,3	1,0	32,0
abr	5,2	1,0	22,0	5,3	1,0	22,0	6,6	1,0	27,0	7,6	1,0	29,0
may	4,6	1,0	22,0	4,8	1,0	26,0	6,6	1,0	26,0	6,9	1,0	26,0
jun	5,7	1,0	24,0	5,5	1,0	27,0	7,2	1,0	26,0	7,7	1,0	27,0
jul	5,4	1,0	21,0	5,3	1,0	22,0	7,1	1,0	26,0	7,9	1,0	31,0
ago	6,4	1,0	19,0	5,9	1,0	23,0	7,4	1,0	28,0	8,3	1,0	30,0
set	6,8	1,0	22,0	6,8	1,0	25,0	9,6	1,0	25,0	10,0	1,0	27,0
oct	9,4	1,0	27,0	9,9	1,0	27,0	11,1	1,0	27,0	11,9	1,0	28,0
nov	9,8	1,0	31,0	10,4	1,0	31,0	12,3	1,0	31,0	13,7	1,0	32,0
dic	8,7	1,0	28,0	9,2	1,0	30,0	11,0	1,0	29,0	12,3	1,0	30,0

Tabla 3.7: Salinidad mensual media, mínima y máxima para las cuatro ubicaciones analizadas.

Es importante mencionar además, que el ciclo anual medio de la salinidad en cada una de las ubicaciones analizadas, presentado en la Figura 3.6, presenta una gran variabilidad interanual. Sin embargo, esta variabilidad interanual no es homogénea en todos los meses del año, sino que en los meses de verano se han presentado mayores variaciones en la salinidad media, seguido de los meses de primavera. Por ejemplo si observamos el mes de febrero, en la Escollera Sarandí se tiene

una salinidad media mensual igual a 11,8 ppm, sin embargo en 1998 la salinidad media para febrero fue 2,5 ppm, en 1999 fue 10,3 ppm, en el 2000 fue 22,2 ppm, en el 2001 fue 12,4, en el 2002 fue 12,2 ppm y en el 2003 fue 4 ppm. Es decir que para el mes de febrero la salinidad media a variado entre 2,5 ppm y 22,2 ppm y de seis años de datos (durante febrero de 1997 no se tomaron mediciones) solamente tres años tienen salinidad media mensual similar al valor medio correspondiente del ciclo anual. Por otro lado si analizamos el mes de julio, la salinidad media en los siete años de datos en Playa Ramírez fue 5,3 ppm, mientras que en el año 2001 fue 11,8 ppm, en el año 1998 fue 3,3 ppm, en el año 2002 fue 2,4 ppm y en los años 1997, 1999, 2000 y 2003 fueron valores similares a 5,3 ppm. Se observa entonces que la salinidad media de julio no presenta una gran variabilidad como se observa en el mes de febrero, por lo cual es posible afirmar que es muy probable que la salinidad media de julio en el próximo año sea cercana a un valor de 5 ppm. En la Figura 3.7 se muestra la situación anteriormente mencionada para los meses de enero, junio, agosto y noviembre. En la misma se observa la gran variación de la salinidad media de enero y noviembre durante los distintos años de datos y la variación menor, pero también importante, que ocurre en los meses de junio y agosto.

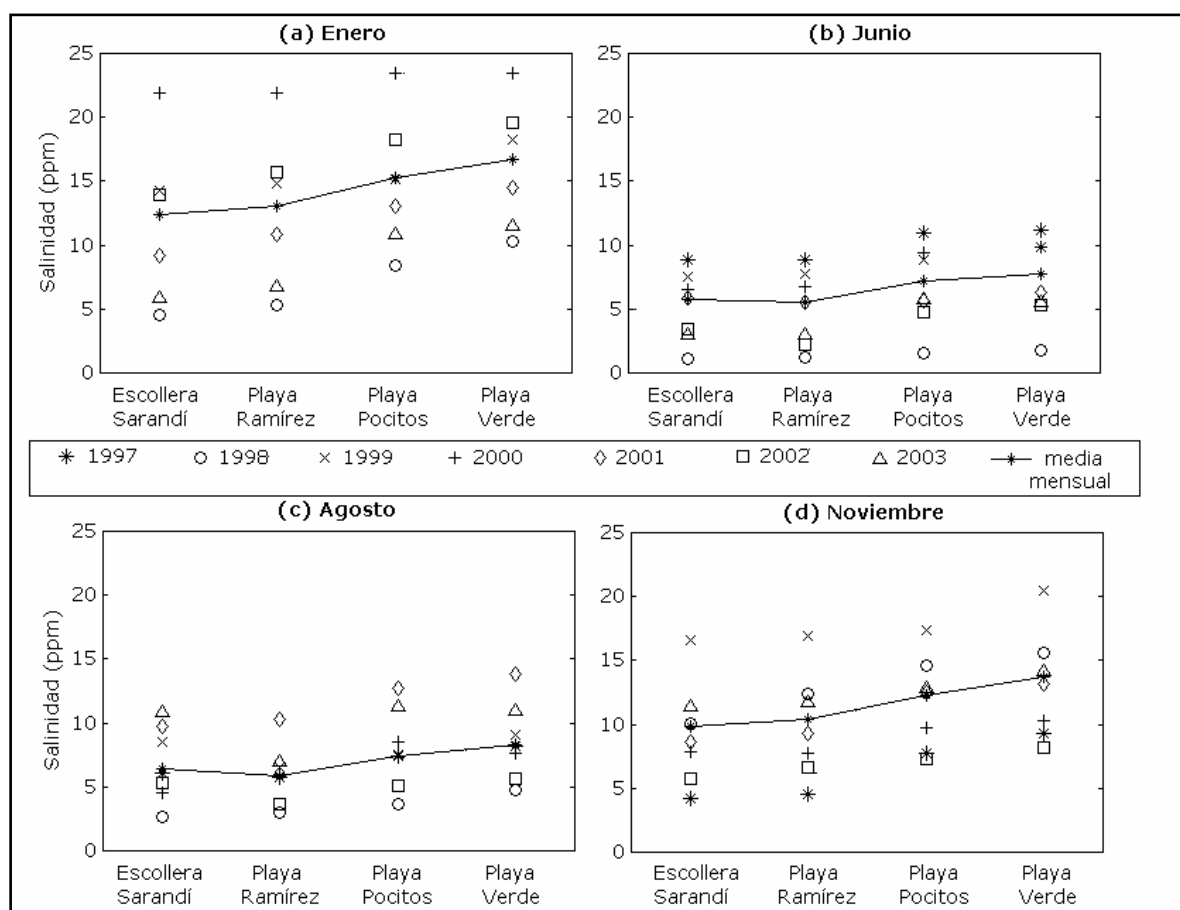
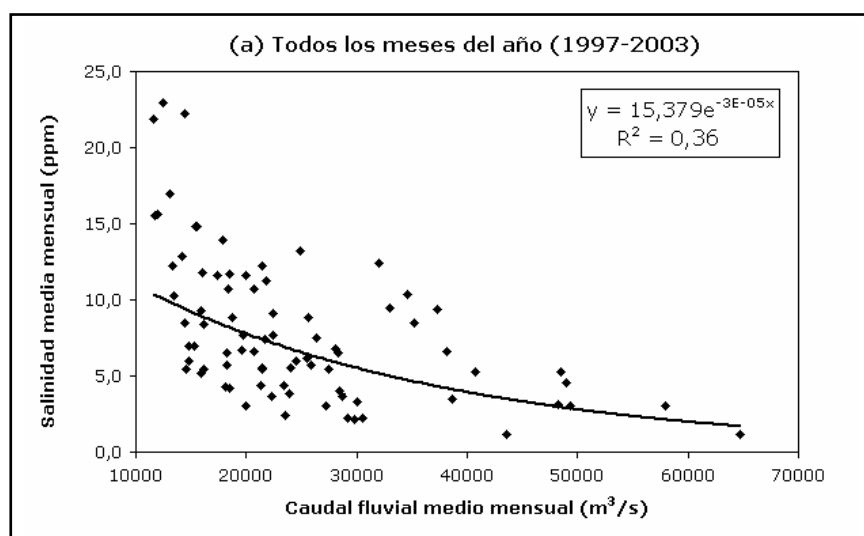


Figura 3.7: Comparación de la salinidad media en cada año de medición con la salinidad media calculada en todo el período para los meses de (a) enero, (b) junio, (c) agosto y (d) noviembre, en los cuatro puntos de medición analizados.

3.3.3 - Relación salinidad – descarga fluvial

Algunas variaciones de salinidad en la costa de Montevideo se han vinculado a las variaciones del caudal fluvial que ingresa al Río de la Plata y sobretodo con las variaciones del caudal del río Uruguay (Ecoplata, 2001). Para profundizar esta idea se realizó un análisis de la relación entre los valores medios mensuales de los caudales fluviales presentados en 3.1 con los valores medios mensuales de salinidad en la costa de Montevideo.

Como se mencionó anteriormente, durante los meses correspondientes a las estaciones de primavera y verano la salinidad en la costa de Montevideo presenta una mayor variabilidad interanual que durante el resto del año. Estos valores medios mensuales diferentes de la media son los que más se relacionan con el caudal fluvial. Por ejemplo en la Figura 3.7(a) se observa que en el año 1998 la salinidad media de enero fue menor a la salinidad media mensual, mientras que en el año 2000 los valores medios fueron mayores a la media. Los caudales fluviales de los ríos Paraná y Uruguay correspondientes a esas épocas muestran valores de crecida extraordinaria en enero de 1998 y caudales muy bajos a principios del año 2000. Es importante en estos casos la influencia del caudal fluvial sobre el campo salino en Montevideo, generando un desplazamiento del gradiente de salinidad hacia fuera del Río de la Plata cuanto mayor es el caudal fluvial descargado. En la Figura 3.8(a) se muestra la correlación existente entre el caudal total medio mensual y la salinidad media mensual en la Playa Ramírez y se observa que la vinculación es baja. Sin embargo cuando se consideran para la correlación los meses entre noviembre y marzo (Figura 3.8(c)), la correlación aumenta, mientras que para el resto del año la correlación sigue siendo baja (Figura 3.8(b)). Esto indica de alguna forma que la gran variación de la salinidad durante el período considerado, para estos meses determinados, se debe a la variación del caudal fluvial descargado en el río.



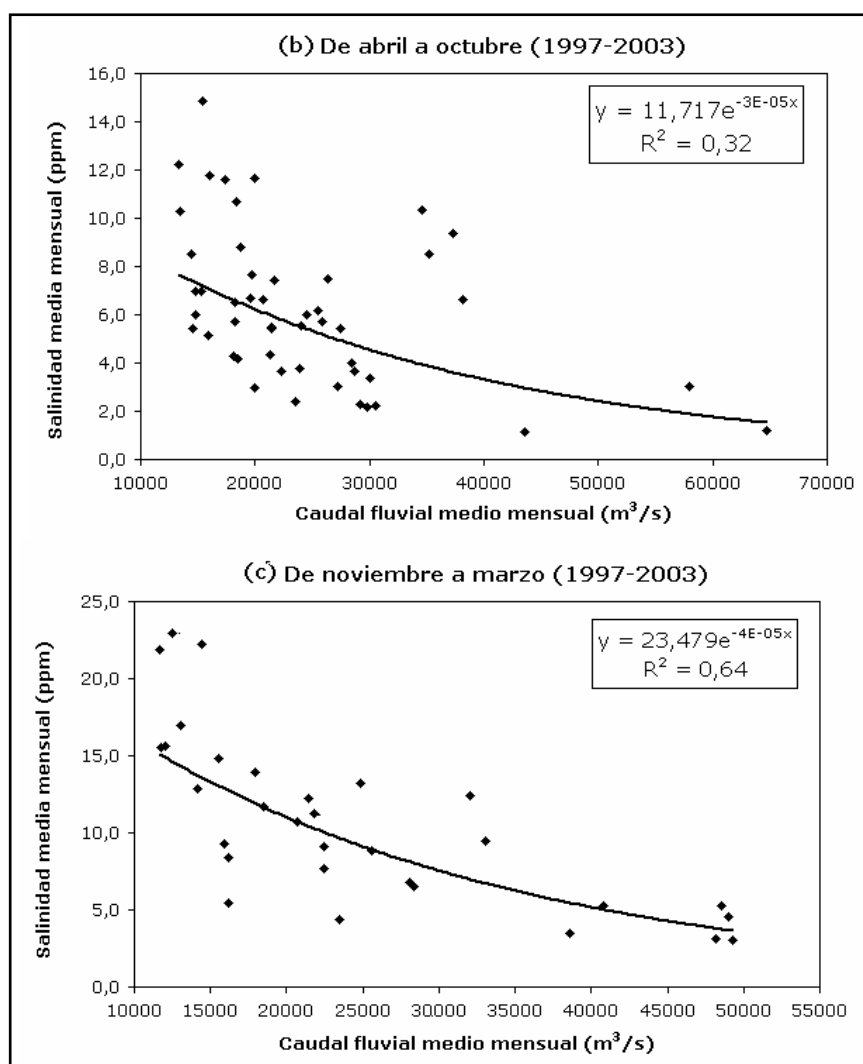


Figura 3.8: Correlación entre el caudal fluvial medio y la salinidad media mensual en Playa Ramírez. (a) Período completo 1997-2003, (b) Meses de abril a octubre del período 1997-2003 y (c) Meses de noviembre a marzo del período 1997-2003.

Se puede afirmar entonces que en general valores altos de caudal fluvial se corresponden con valores bajos de salinidad y que valores bajos de descarga fluvial se corresponden con valores altos de salinidad. Este resultado indica que la posición del frente salino se desplaza hacia aguas arriba o aguas abajo dependiendo del caudal fluvial. Existen otros factores que afectan la posición del campo salino como ser el viento, que pueden explicar ciertas anomalías en la distribución de salinidad, por ejemplo cuando bajos valores de salinidad se han registrado con caudales fluviales bajos, etc.

3.4 - Perfiles verticales de salinidad en el Río de la Plata

En el proyecto Freplata se han realizado varias campañas de mediciones de salinidad en varias zonas del Río de la Plata. En este capítulo se presentan algunos resultados obtenidos en las mismas, de modo de aumentar el conocimiento del campo salino en el río a través de la información de campo.

Entre los días 6 y 29 de noviembre del 2001 Freplata realizó una serie de mediciones de perfiles de salinidad en varios puntos del Río de la Plata y del Frente Marítimo. Se realizaron 71 perfiles verticales de salinidad, cuya ubicación se muestra en la Figura 3.9, de los cuales aproximadamente 25 fueron realizados en el Río de la Plata superior, 20 fueron realizados en la zona estuarina y el resto fueron ubicados en la zona exterior de la línea Punta del Este – Punta Piedras.

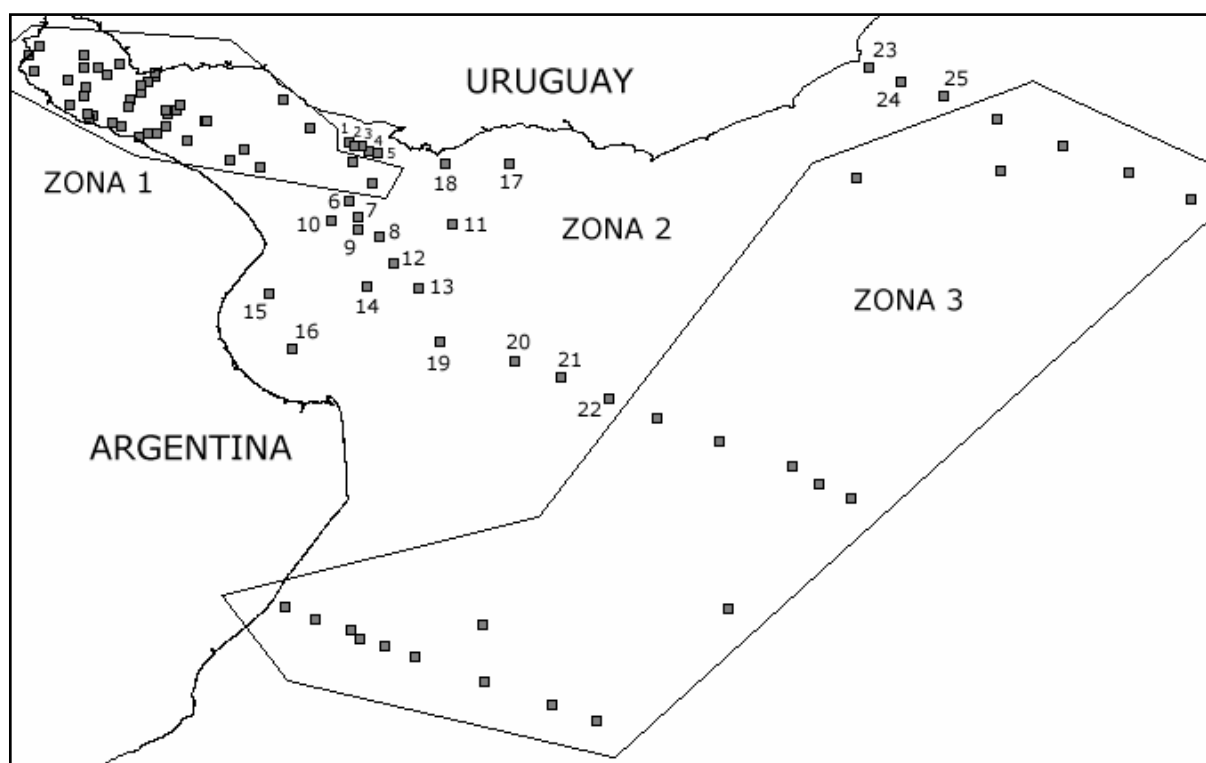


Figura 3.9: Ubicación de las estaciones de medición de perfiles verticales de salinidad. Modificado de Freplata.

Para cada una de las estaciones de medición se tiene un perfil vertical de salinidad por lo que no es posible analizar la variación temporal del mismo. Por otro lado no es posible hacer comparaciones entre los perfiles ya que cada medición corresponde a un instante de tiempo diferente. La utilidad de esta información es simplemente el conocimiento de un perfil de salinidad dado, en un determinado instante de tiempo y en una determinada ubicación.

Los datos muestran varios resultados interesantes. En todas las estaciones de medición ubicadas en la zona 1 marcada en la Figura 3.9, la salinidad registrada en toda la columna de agua fue menor a 1 ppm, lo que se considera agua dulce. Por otro lado, en las estaciones ubicadas en la zona 3, la salinidad registrada es mayor a 31 ppm en toda la columna de agua, no existiendo prácticamente estratificación vertical. Por lo tanto, las estaciones que se analizan y para las que se presentan resultados, son las ubicadas en la zona 2.

En la Figura 3.10(a) se presentan los perfiles de salinidad medidos en las estaciones de medición 1, 2, 3, 4 y 5, cercanas a la desembocadura del Río Santa Lucía. Se observa que salvo en

la estación 1 existe una estratificación vertical leve, de hasta 7 ppm entre superficie y fondo en la estación 4. Los perfiles verticales de salinidad en cinco estaciones de la zona central del Río la Plata se presentan en la Figura 3.10(b). En las estaciones 6, 7, 9 y 10 no existe casi estratificación vertical por salinidad, siendo la máxima diferencia entre superficie y fondo menor a 1 ppm. En cambio en la estación 8, se registró una fuerte variación de la salinidad de 6 ppm a 13 ppm aproximadamente, entre los 2 y 3 m de profundidad.

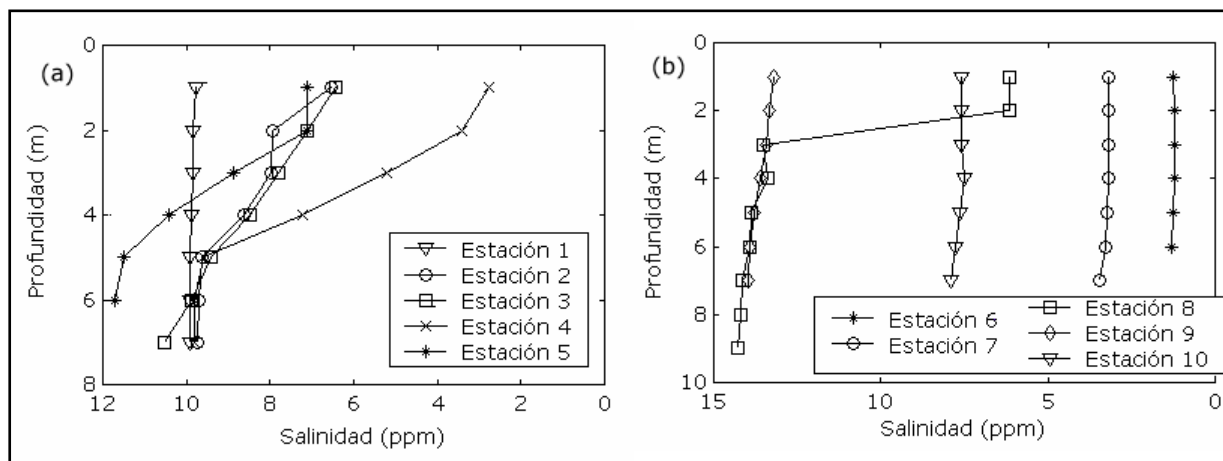


Figura 3.10: Variación de la salinidad con la profundidad en las estaciones de medición (a) de 1 a 5 y (b) de 6 a 10.

En la Figura 3.11(a) se muestran los perfiles de salinidad vertical medidos en varias estaciones ubicadas en la zona central del Río de la Plata. En las estaciones 11, 12, 13 y 19 se observa una leve estratificación con una diferencia de salinidad vertical menor a 3 ppm. Por otro lado en las estaciones 14 y 20 se observa una diferencia mayor de salinidad, de entre 6 y 7 ppm entre la superficie y el fondo, lo que indica la existencia en éstas estaciones de una estratificación salina vertical.

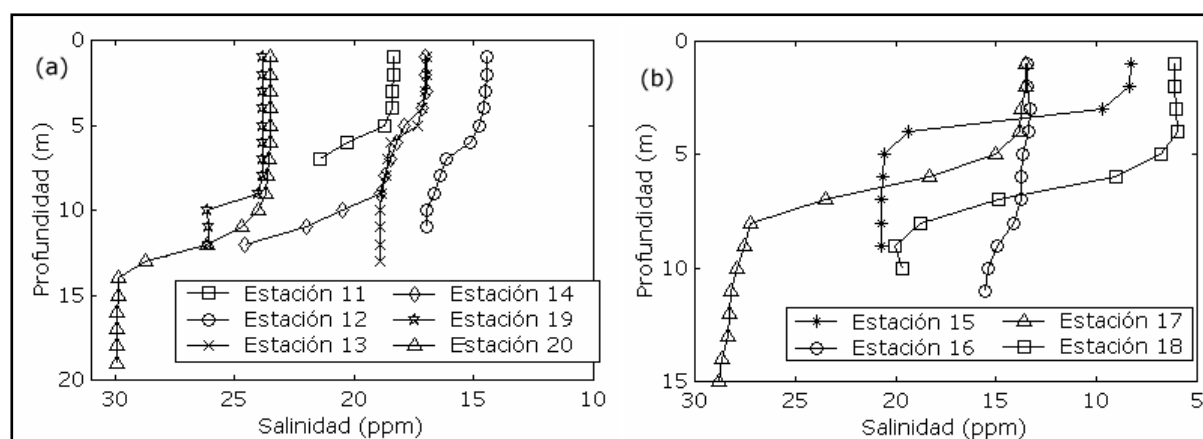


Figura 3.11: Variación de la salinidad con la profundidad en las estaciones de medición (a) 11, 12, 13, 14, 19, 20 y (b) de 15 a 18.

En la Figura 3.11(b) se muestran los perfiles de salinidad medidos en las estaciones ubicadas en la zona central del Río de la Plata, cercanas a la costa argentina (15 y 16) y cercanas a la costa uruguaya (17 y 18). En la estación 16 existe una mezcla vertical de salinidad casi completa, pero en las estaciones 15, 17 y 18 la estratificación vertical por salinidad es importante, de entre 12 y 15 ppm.

Por último se presentan en la Figura 3.12 algunos de los perfiles de salinidad registrados en la zona exterior del Río de la Plata. En la estación 21 se observa una estratificación vertical de 8 ppm de salinidad entre superficie y fondo. En las otras estaciones la diferencia de salinidades es menor, siendo 4 ppm en la estación 22, casi 2,5 ppm en la estación 24 y menor a 2 ppm en las estaciones 23 y 25. En la estación de medición 25 se registraron mediciones de salinidad cercanas a los 33 ppm desde los 32 m hasta los 71 m. Estos valores no se presentan en la Figura 3.12 para poder visualizar las variaciones de salinidad en las otras estaciones más claramente.

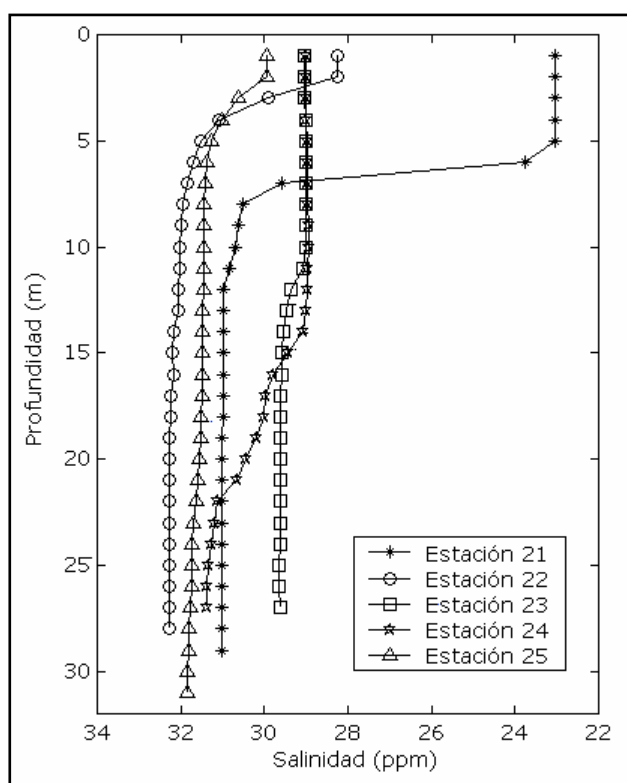


Figura 3.12: Variación de la salinidad con la profundidad en las estaciones de medición 21 a 25.

3.5 - Vientos

3.5.1 - Información de base

Se analizaron los vientos registrados en dos estaciones de medición ubicadas en el Río de la Plata: Punta Brava y Pontón Recalada. La estación Punta Brava es una estación de medición costera de la Dirección Nacional de Meteorología y está ubicada en Punta Brava sobre la costa de

Montevideo. La estación Pontón Recalada es la única estación de medición de vientos existente en el Río de la Plata que no es costera. Esta estación de medición está ubicada en los 35°10' de latitud Sur y 56°15' de longitud Oeste. En la Figura 3.13 se muestra la ubicación de ambas estaciones de medición.

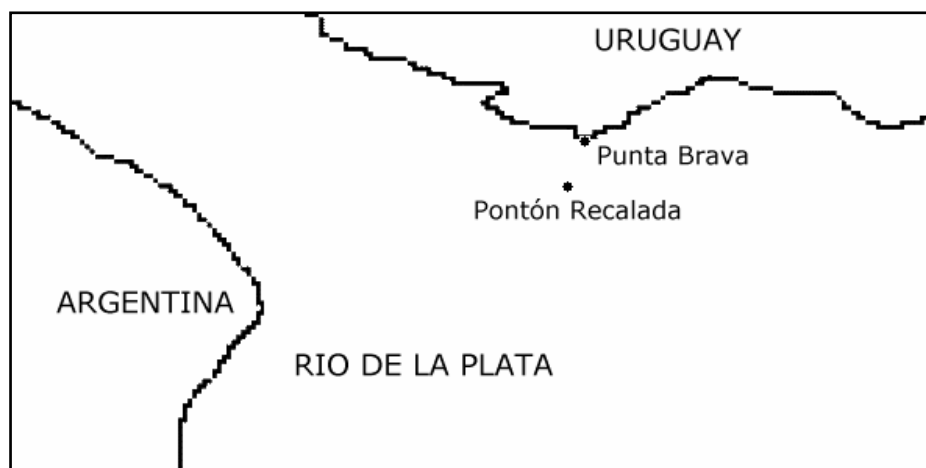


Figura 3.13: Ubicación de las estaciones de medición de vientos Punta Brava y Pontón Recalada.

Por ser una estación costera, los registros medidos en Punta Brava están afectados de alguna forma por la cercanía con la ciudad y el continente. En la misma se realizan mediciones del módulo y de la dirección del viento cada tres horas (y en algunos casos cada una hora), todos los días desde principios de la década del 90. Esto constituye una serie de datos extensa y de buena calidad, representativa del campo de vientos de las zonas cercanas a la ciudad de Montevideo.

En la estación Pontón Recalada se registran entre otros parámetros, el módulo y la dirección del viento. En el período anterior a 1997 se registraban los vientos cada seis horas, y desde 1997 en adelante se mide el viento cada tres horas todos los días del año. Se tiene entonces también una serie de datos de buena calidad con una frecuencia de medición aceptable representativa del campo de vientos existente en la zona central del Río de la Plata.

3.5.2 - Vientos en Punta Brava

Se presentan a continuación las características del viento registrado en Punta Brava, determinadas a partir del análisis de los vientos medidos en dicha estación durante seis años, en el período 1995-2000.

En la Figura 3.14 se presenta para cada mes del año la intensidad y la dirección del viento medio registrado en Punta Brava. Se observa en la misma que existe una variación anual del viento medio, durante los meses cálidos (período octubre a marzo) la intensidad del mismo es mayor a 2 m/s y proviene del Este, mientras que durante los meses más fríos (período abril a setiembre) la intensidad es menor a 1,5 m/s con una dirección variable.

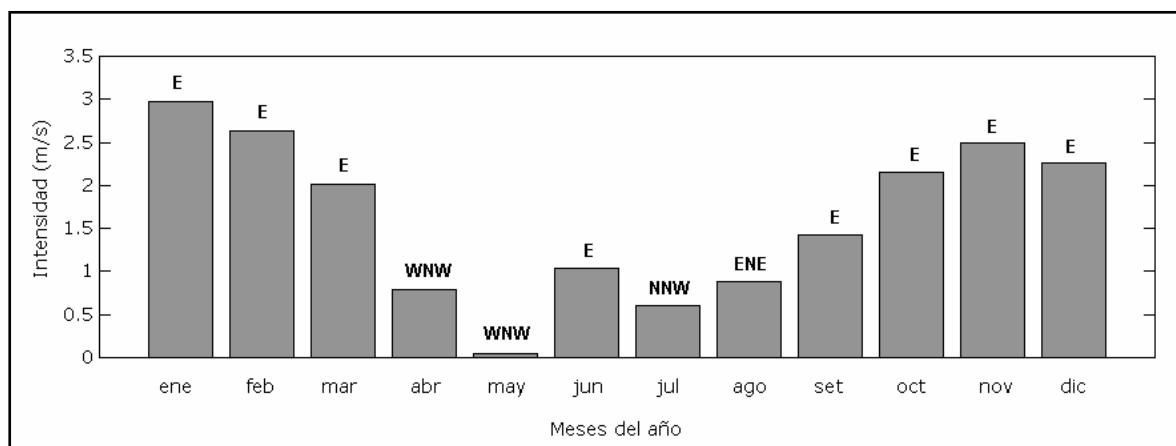


Figura 3.14: Variación anual del viento registrado en Punta Brava entre los años 1995 y 2000.

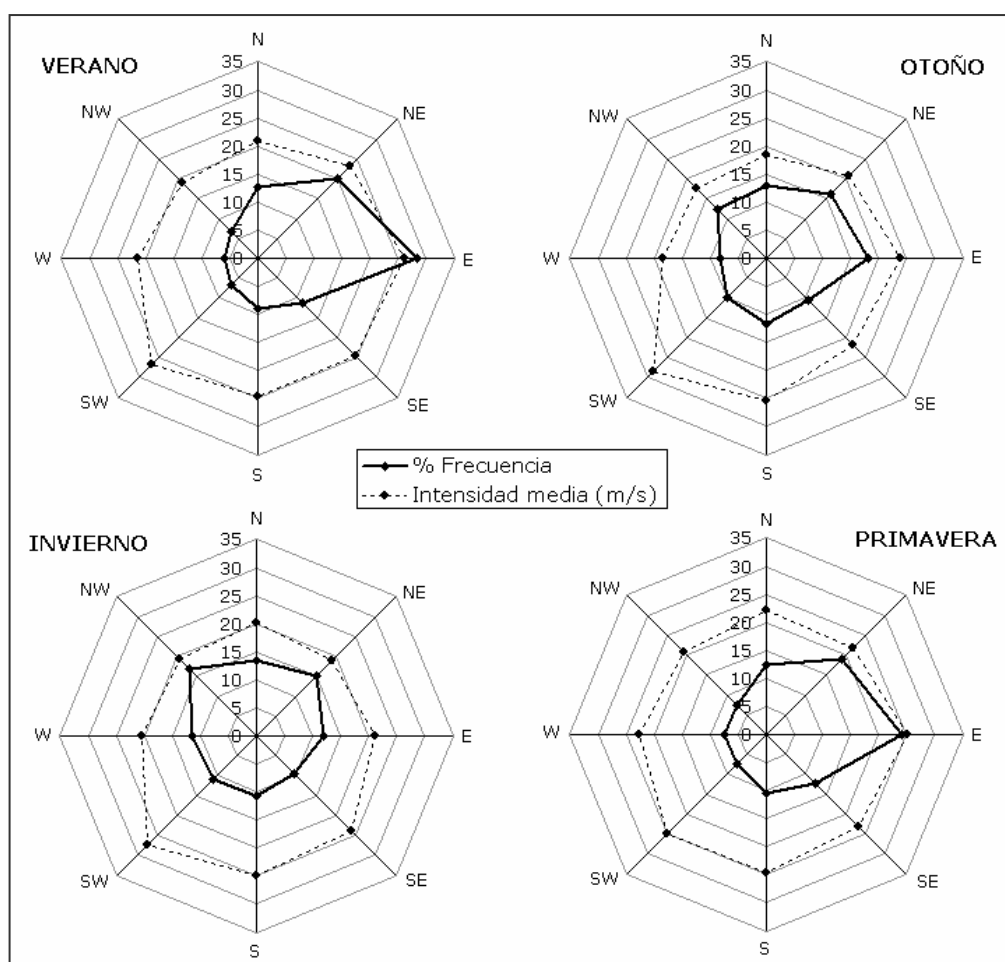


Figura 3.15: Rosas de viento para cada estación del año calculadas a partir del viento registrado en Punta Brava entre los años 1995 y 2000.

En la Figura 3.15 se presentan las rosas de viento para las cuatro estaciones del año: verano, otoño, invierno y primavera. Las mismas muestran la distribución de frecuencias asociada a las 8 direcciones principales de procedencia del viento, además de la intensidad media para cada dirección. De forma similar a lo señalado en la variación anual del viento medio, se observa que las rosas de viento son diferentes para las distintas estaciones del año, principalmente entre los meses

cálidos y los meses fríos. En las estaciones de primavera y verano los vientos provienen principalmente del Este y del Noreste; con los mayores porcentajes de frecuencia asociados al Este, 24% en primavera y 28% en verano. En el otoño las frecuencias asociadas a cada dirección son semejantes, con frecuencias levemente mayores, 16% y 18%, para los vientos provenientes del Noreste y Este, respectivamente. En el invierno tampoco se observan direcciones preponderantes de viento con un gran porcentaje de frecuencia asociado, aunque resaltan levemente los vientos del sector Noroeste, Norte y Noreste, con frecuencias del 16%, 13% y 15%, respectivamente. La intensidad media asociada a las diferentes direcciones del viento también muestra una variación a lo largo del año. En verano y primavera los vientos del Este y del Suroeste son los que tienen mayores intensidades medias, siendo la misma aproximadamente 26 km/h (7,2 m/s) en verano y 25 km/h (6,9 m/s) en primavera. Por otro lado, los vientos del sector Noroeste son los más suaves en ambas estaciones, con una intensidad media de 18,9 km/h (5,3 m/s) en verano y 20,5 km/h (5,7 m/s) en primavera. En el otoño aumenta la intensidad media de los vientos provenientes del Sur y Suroeste, cuyos valores son 25,4 km/h (7 m/s) y 28,6 km/h (7,9 m/s), respectivamente. Sin embargo en las otras direcciones las intensidades medias son menores que durante el verano, menores a los 20 km/h (5,5 m/s) en las direcciones Norte, Noroeste y Oeste. En invierno las intensidades medias son similares a las del otoño, siendo las mayores 27,4 km/h (7,6 m/s) para los vientos del Suroeste y 24,9 km/h (6,9 m/s) para los vientos del Sur.

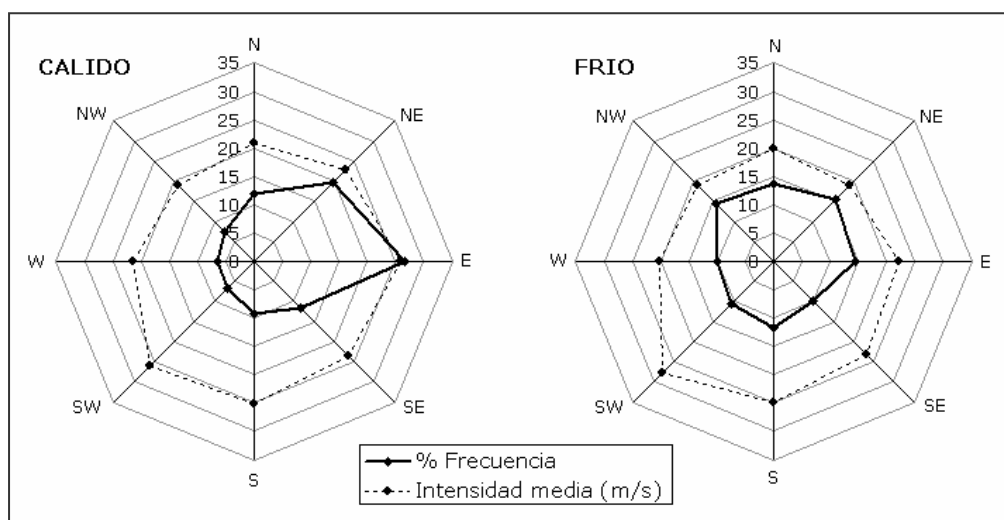


Figura 3.16: Distribución direccional de los vientos registrados en Punta Brava para el período cálido y el período frío.

A partir de la distribución anual del viento medio y de las rosas de vientos para cada estación del año, se pueden identificar dos comportamientos distintos del viento registrado en Punta Brava:

- Un período cálido, comprendido por los meses entre octubre y marzo, donde el 46% del tiempo los vientos provienen del Noreste y Este y las mayores intensidades medias son de 26 km/h (7,2 m/s) provenientes del Este y Suroeste.

- Un período frío, formado por los meses entre abril y setiembre, donde la distribución de frecuencias direccional de los vientos es bastante homogénea, destacándose levemente los vientos provenientes del sector Noroeste, Norte, Noreste y Este, con porcentajes de frecuencia entre 13% y 15%.

En la Figura 3.16 se muestran las rosas de vientos para el período cálido y el período frío calculadas a partir de los registros de viento, donde se pueden observar claramente las diferencias de los vientos característicos de cada período. Esta caracterización estacional de los vientos del Río de la Plata se ha realizado por varios autores (Framiñán & Brown 1996, Guerrero et al 1997, Simionato et al 2001) aunque en general difieren en los meses que le corresponden a cada período.

3.5.3 - Vientos en Pontón Recalada

Se realizó una caracterización similar para los vientos registrados en Pontón Recalada entre los años 1997 y 2001. En primer lugar se calculó la distribución anual del viento medio que se presenta en la Figura 3.17. Se observa en la misma que en las épocas cálidas como el verano y parte de la primavera el viento medio presenta las intensidades mayores (3,3 m/s en enero y 3,1 m/s en octubre) y proviene del sector ENE – ESE. Durante abril y mayo se observa una rotación del viento medio hacia el sector SE con una disminución de la intensidad media, luego en junio y julio el vector medio es bajo con direcciones SW y WNW respectivamente, y finalmente durante agosto y setiembre la intensidad media aumenta y se produce una rotación hacia el sector ESE.

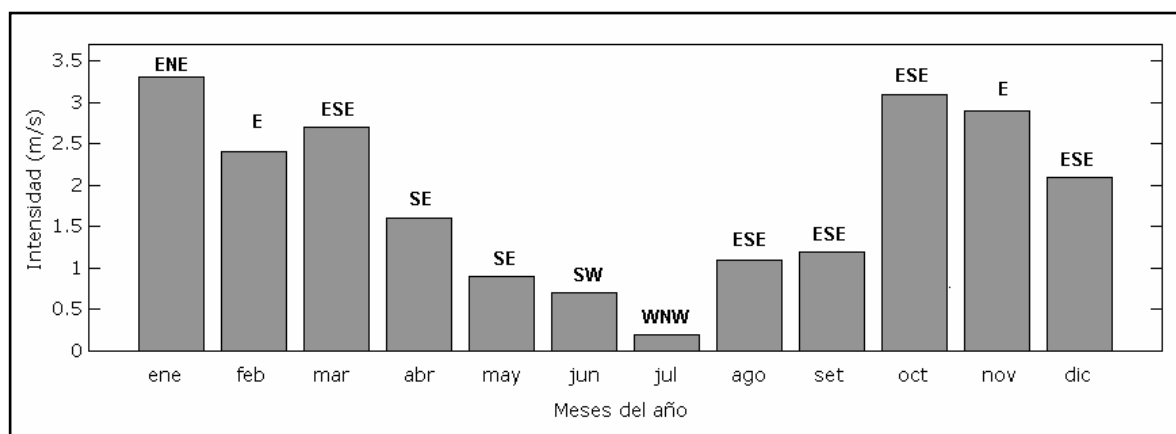


Figura 3.17: Variación anual del viento registrado en Pontón Recalada entre los años 1997 y 2001.

Las rosas de vientos calculadas para las cuatro estaciones del año con los vientos registrados en Pontón Recalada se presentan en la Figura 3.18. En la misma se observa que las estaciones de primavera y verano tienen una distribución de frecuencias similar. En ambas estaciones los vientos provienen principalmente del Este con frecuencias de aproximadamente 23% y del Noreste con frecuencias de 15%, mientras que los vientos de los sectores Noroeste, Oeste y Suroeste presentan frecuencias bajas del orden de un 6%. Durante el otoño continúan prevaleciendo los

vientos del sector Este con una frecuencia de 22% pero aumentan las frecuencias asociadas a los vientos del sector Sur, Suroeste y Oeste con respecto a las frecuencias del verano en esas direcciones. Finalmente durante el invierno la distribución de frecuencia no presenta una dirección predominante. Las mayores intensidades medias en primavera provienen del sector Este, Sureste y Suroeste, con más de 32 km/h (8,8 m/s). En verano se destacan los fuertes vientos del sector Suroeste que presentan una intensidad media de 34,7 km/h (9,6 m/s), aunque la frecuencia asociada es baja, 6,4%. Durante el otoño, las intensidades medias presentan una distribución homogénea, con valores del orden de los 30 km/h (8,3 m/s) en las direcciones Este, Sureste, Sur, Suroeste y Oeste, e intensidades del orden de 24 km/h (6,6 m/s) en las direcciones Noroeste, Norte y Noreste. Durante el invierno las intensidades medias mayores provienen del Suroeste y del Sur, con 31,3 km/h (8,7 m/s) y 32,5 km/h (9 m/s).

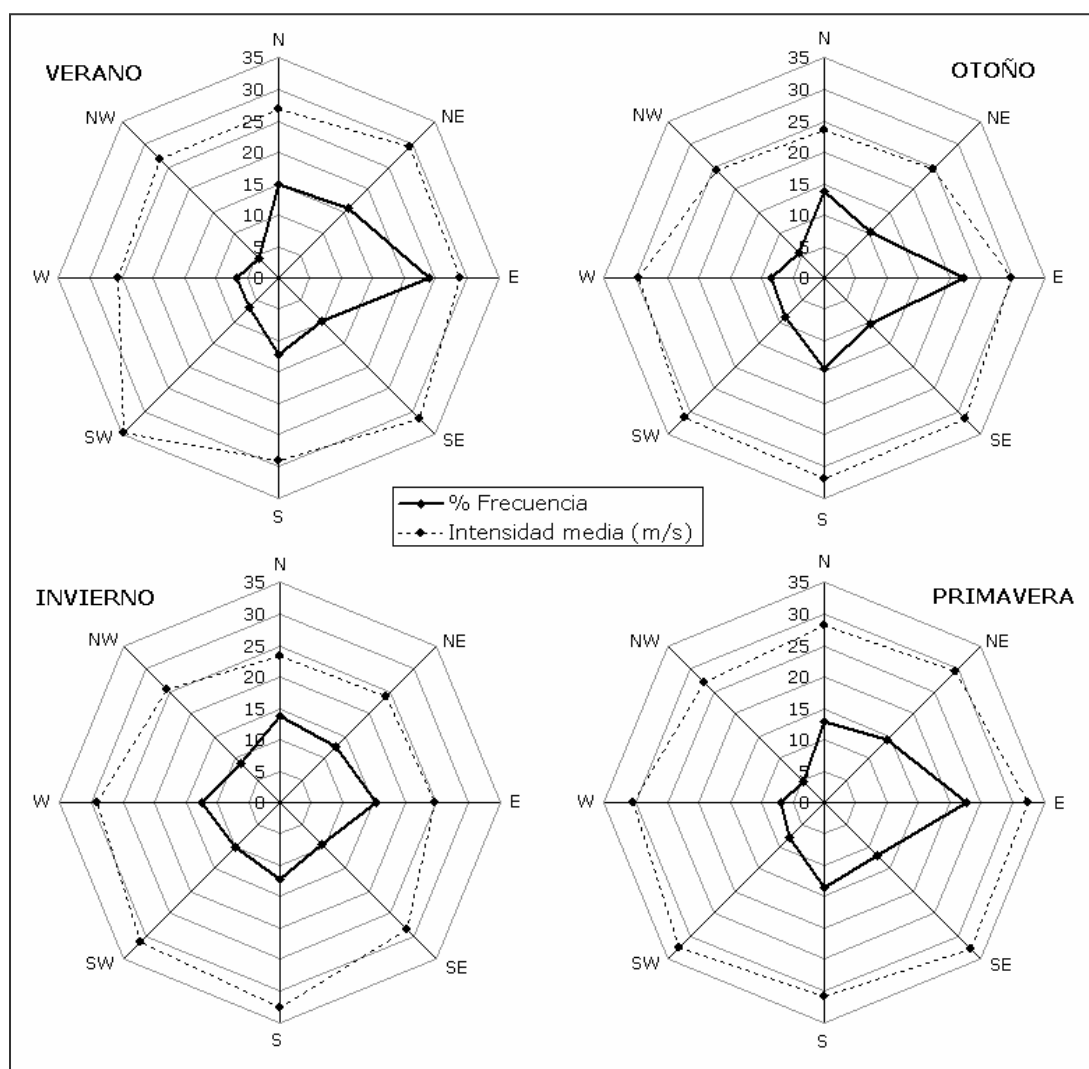


Figura 3.18: Rosas de viento para cada estación del año calculadas a partir del viento registrado en Pontón Recalada entre los años 1997 y 2001.

Estos resultados son similares a las rosas de vientos calculadas por Framiñán & Brown (1996) a partir de vientos registrados durante el período 1970-1980 en Pontón Recalada para las

estaciones de verano y primavera. En cambio para el invierno los resultados presentados en dicho artículo muestran una predominancia de los vientos del sector Sureste que no se observa en éstos resultados y para el otoño el artículo muestra una distribución de frecuencias más homogénea que la presentada en la Figura 3.18. Es importante tener estos resultados en cuenta ya que dicho análisis puede ser un poco más representativo que el análisis aquí efectuado, ya que tuvieron en cuenta 10 años de mediciones.

A partir de los resultados presentados y los mencionados en la bibliografía, se pueden identificar los dos comportamientos estacionales definidos para los vientos de Punta Brava en 3.5.2. Las rosas de viento calculadas para los mismos períodos anteriormente definidos, el período cálido (octubre a marzo) y el período frío (abril a setiembre), se presentan en la Figura 3.19, donde se observan las características de los vientos de cada período.

En términos generales es importante resaltar la diferencia que existe en las distribuciones calculadas en ambas estaciones durante estos años, lo cual indica que los vientos medidos en Punta Brava y los vientos medidos en Pontón Recalada presentan diferentes características. Aunque las direcciones preponderantes son similares en los dos puntos de medición, la intensidad media del viento es mucho mayor en Pontón Recalada que en Punta Brava.

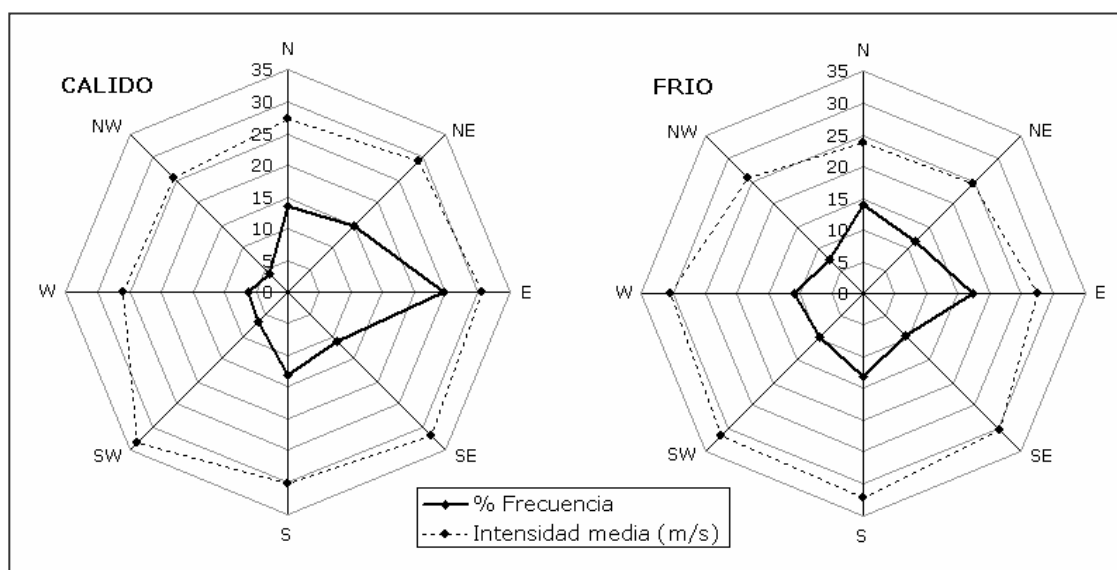


Figura 3.19: Distribución direccional de los vientos registrados en Pontón Recalada para el período cálido y el período frío.

3.5.4 - Comparación vientos Punta Brava – Pontón Recalada

Se ha presentado un análisis de los vientos registrados en dos estaciones de medición del Río de la Plata. Una estación costera, Punta Brava, y una estación ubicada en el medio del río, Pontón Recalada. Los resultados anteriores muestran algunas diferencias a pesar de la poca distancia que existe entre ambas estaciones (menos de 50 Km), siendo la principal la mayor intensidad media que presentan los vientos medidos en Pontón Recalada.

Con el objetivo de realizar una comparación de los registros de ambas estaciones, se analizaron los valores medidos simultáneamente durante los cuatro años de datos comunes, desde 1997 al 2000. De esta forma se obtuvieron 2866 datos en 1997, 2898 en 1998, 2912 en 1999 y 2912 en el 2000. Para cada uno de estos años se calculó la rosa de vientos anual en cada estación, las cuales se presentan en la Figura 3.20. En la misma se observa que existen diferencias entre ambos vientos, aunque éstas varían a lo largo de los cuatro años.

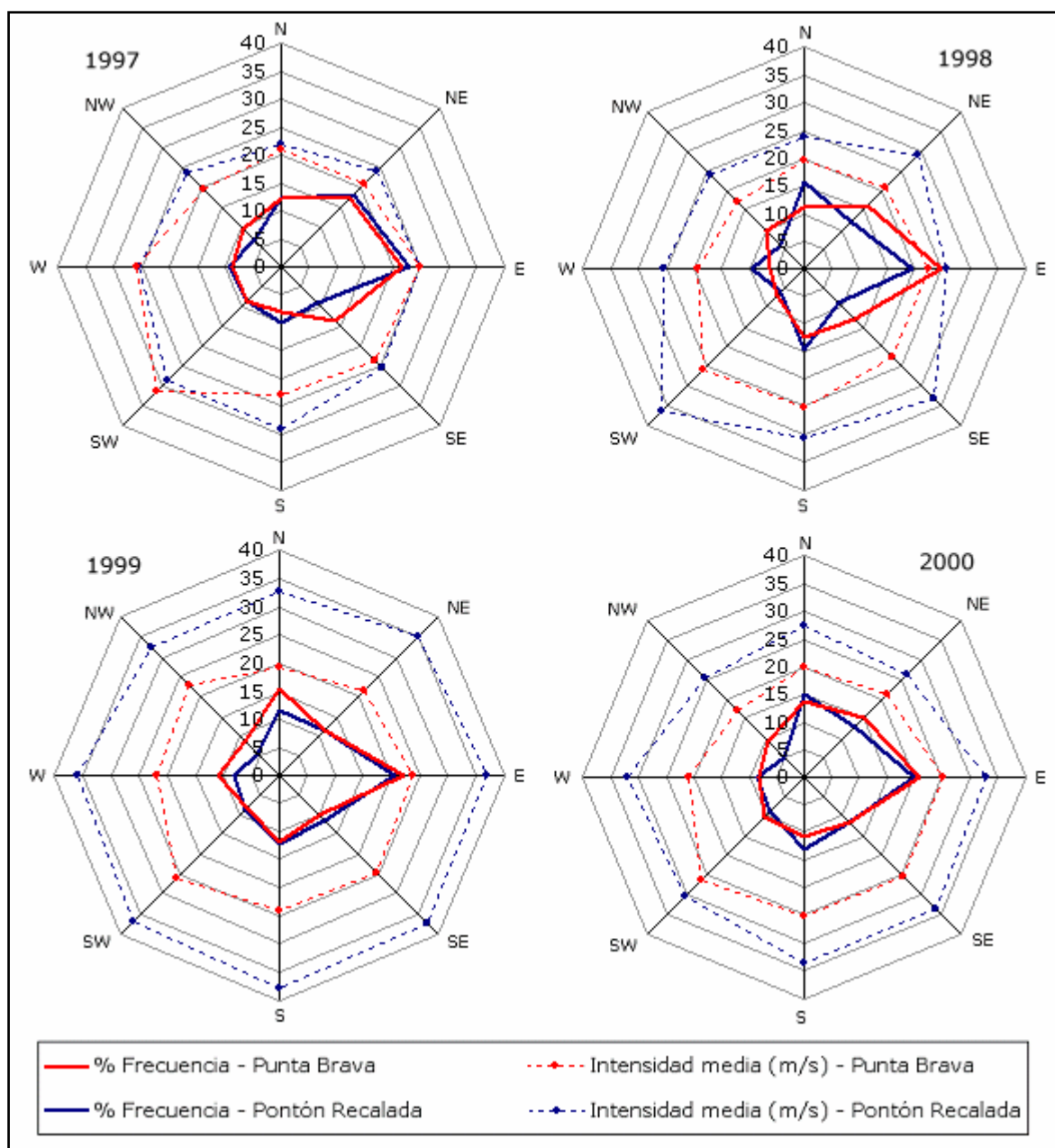


Figura 3.20: Comparación de los porcentajes de frecuencia direccional y de la intensidad media direccional de los vientos registrados en Pontón Recalada y Punta Brava durante los años 1997, 1998, 1999 y 2000.

En el año 1997 la distribución de frecuencias direccional de los vientos es muy similar en ambas estaciones, siendo la principal diferencia el porcentaje asociado a los vientos del Sureste y

Noroeste. Respecto a las intensidades medias, salvo en la dirección Suroeste los vientos registrados en Pontón Recalada fueron más intensos que los registrados en Punta Brava. La mayor diferencia en la intensidad media direccional fue de 6 km/h (1,7 m/s) en la dirección Sur. En el año 1998 la distribución de frecuencias no es tan similar en ambas estaciones como lo fue en 1997. En Punta Brava los vientos del sector Noreste, Este y Sureste tuvieron mayor ocurrencia en Punta Brava que en Pontón, mientras que en ésta última la frecuencia de los vientos del Norte, Oeste y Sur fue mayor que en Punta Brava. En 1998 las intensidades medias direccionales en Pontón Recalada fueron considerablemente mayores a las registradas en Punta Brava, con diferencias de hasta 10 km/h (2,8 m/s) en las direcciones Sureste y Suroeste.

En 1999 la distribución de frecuencias en ambas estaciones de medición fue muy similar. Sin embargo las intensidades medias en Pontón Recalada fueron mucho mayores que en Punta Brava en todas las direcciones del viento, siendo las diferencias máximas de 14 km/h (3,9 m/s) en las direcciones Este y Oeste. Por último en el año 2000 ocurre algo similar al año 1999 aunque las diferencias en las intensidades medias son menores que durante ese año, siendo la diferencia máxima en el 2000 igual a 11 km/h (3 m/s) en la dirección Oeste.

A partir de los resultados presentados en la Figura 3.20 se puede observar también que anualmente la dirección predominante de los vientos en ambas estaciones es el Este, con una frecuencia de más de 20% en los cuatro años seleccionados.

En definitiva la principal diferencia entre las dos estaciones de medición radica en las intensidades de viento registradas, siendo mayores en Pontón Recalada que en Punta Brava. Esto significa que el viento registrado en el río es mayor que los vientos medidos en la costa, lo cual adquiere importancia al seleccionar los vientos a utilizar por ejemplo en la modelación del Río de la Plata.

Tesis de Maestría - Junio 2005

Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental - IMFIA

Facultad de Ingeniería - Universidad de la República

Montevideo - Uruguay

TEMA 2

EL MODELO NUMERICO

MODELACION BIDIMENSIONAL

DEL CAMPO SALINO EN EL RIO DE LA PLATA

Capítulo 4

MODELO EN ELEMENTOS FINITOS PARA FLUJO ESTRATIFICADO RMA-10

En el Capítulo 1 se presentó el conjunto de ecuaciones que gobiernan el flujo en un estuario. Este sistema de ecuaciones no se puede resolver analíticamente. Debido a esto, se emplean métodos numéricos para obtener soluciones de estas ecuaciones en derivadas parciales hiperbólicas no lineales. En este trabajo, el cálculo del campo de velocidades y del campo de salinidades en el Río de la Plata se realiza mediante la aplicación del modelo hidrodinámico tridimensional baroclínico RMA-10. El modelo fue desarrollado por el Prof. Ian King de la Universidad de California en Davis. En este capítulo se describen las principales características del modelo a partir de la información especificada en el manual del mismo (King, 1993).

4.1 - Descripción general del modelo

El RMA-10 es un modelo numérico diseñado especialmente para simular la circulación hidrodinámica en cuerpos de agua con estratificación vertical por densidad. El modelo describe las variables de estado, presión y velocidad, en tres dimensiones resolviendo un conjunto de ecuaciones que derivan de la combinación de las ecuaciones de Navier-Stokes, continuidad volumétrica, advección-difusión, y una ecuación de estado que relaciona la densidad con la salinidad, temperatura y/o sedimento suspendido. En este modelo las fuerzas de fricción, el efecto de Coriolis y la tensión del viento en la superficie también se representan. El modelo puede usarse para simular situaciones dependientes del tiempo o estacionarias. La principal desventaja de este modelo es que la resolución de la matriz en el caso tridimensional no es muy eficiente desde el punto de vista computacional y los tiempos de máquina requeridos para obtener una solución son extremadamente grandes.

Las ecuaciones básicas, junto con las condiciones de borde e iniciales apropiadas, son resueltas numéricamente utilizando el método de los elementos finitos. La técnica de los elementos finitos, si bien es computacionalmente más costosa que los métodos clásicos de las diferencias finitas, tiene la enorme ventaja de poder representar adecuadamente la forma de contornos muy irregulares, utilizando celdas de distinto tamaño según la necesidad de una mayor resolución en determinadas zonas de interés. Para la generación de la grilla, el modelo permite definir en el plano elementos isoparamétricos lineales, triangulares y cuadriláteros. Dentro de un elemento, el modelo en elementos finitos utiliza aproximaciones cuadráticas para representar las componentes de la velocidad y las variaciones en la salinidad, temperatura o sedimento suspendido. Además el modelo utiliza interpoladores de Lagrange con 9 nodos por elemento por lo cual el nivel de resolución es aproximadamente 3 veces mayor al tamaño de la celda utilizada. Para determinar la

profundidad dentro de un elemento el modelo utiliza una aproximación lineal. Además de las ecuaciones de cantidad de movimiento, el RMA-10 resuelve las ecuaciones de advección y difusión para el transporte de la temperatura, salinidad y concentración de sedimento. El método de resolución para resolver las mismas es implícito y de segundo orden de aproximación.

El modelo ha sido diseñado para funcionar en varios niveles diferentes de resolución, con la opción de utilizar elementos bidimensionales promediados en vertical, elementos bidimensionales promediados lateralmente, elementos unidimensionales y elementos tridimensionales, los cuales pueden incorporarse en una misma malla. En el caso tridimensional y bidimensional integrado en vertical la generación de la grilla en la dirección vertical tiene la opción de definir nodos en profundidades específicas o espaciados a determinados incrementos verticales. Las condiciones de borde pueden especificarse en términos de descarga, velocidad, o nivel de agua, con una estructura vertical de densidad si es necesario.

La solución del sistema de ecuaciones se obtiene a partir de la aplicación del método de Galerkin para la definición de los pesos residuales en la formulación en elementos finitos. Luego de desarrolladas las ecuaciones se utiliza el método de Newton Raphson para estructurar el conjunto de ecuaciones y para la iteración. Las integrales de elementos finitos se evalúan por una función cuadrática gaussiana y se utiliza un método de resolución modificado de Crank Nicholson para calcular la variación temporal de la solución.

4.2 - Ecuaciones gobernantes para flujo estratificado tridimensional

4.2.1 - Sistema original de ecuaciones

Las ecuaciones que describen el flujo en un medio estratificado, ya sea por la variación de salinidad, temperatura o sedimento suspendido en la dirección vertical, relacionan la velocidad en las tres dimensiones cartesianas, la presión del agua y la distribución de salinidad, temperatura y/o sedimento suspendido en toda el área. Este conjunto de ecuaciones está formado por la forma de Reynolds de las ecuaciones de Navier Stokes, ecuaciones 4.1a, 4.1b y 4.1c; la ecuación de continuidad de volumen, ecuación 4.2; la ecuación de advección difusión de la salinidad, ecuación 4.3; y la ecuación de estado que relaciona la densidad con la salinidad, ecuación 4.4. En las últimas dos ecuaciones se considera que las variaciones de la densidad son debidas únicamente a variaciones en la salinidad del agua.

- Ecuaciones de Navier Stokes:

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{xz} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} - \Gamma_x = 0 \quad (4.1a)$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{yx} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{yz} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial y} - \Gamma_y = 0 \quad (4.1b)$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{zx} \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{zy} \frac{\partial w}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial z} + \rho \cdot g - \Gamma_z = 0 \quad (4.1c)$$

- Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.2)$$

- Ecuación de advección difusión:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} + w \frac{\partial s}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial s}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial s}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial s}{\partial z} \right) - \theta_s = 0 \quad (4.3)$$

- Ecuación de Estado:

$$\rho = F(s) \quad (4.4)$$

siendo (x,y,z) = sistema de coordenadas cartesianas; (u,v,w) = velocidades en las direcciones cartesianas; ρ = densidad; g = aceleración de la gravedad; p = presión del agua; ε_{xx} , etc = los coeficientes de viscosidad turbulenta; Γ_x , etc = tensiones externas que actúan sobre los bordes o el interior del cuerpo de agua; s = salinidad; D_x , etc = coeficientes de difusión turbulenta para la salinidad; θ_s = aporte o extracción de salinidad.

4.2.2 - Aproximación hidrostática

La aproximación hidrostática se aplica a la componente vertical de la ecuación dinámica 4.1c. Las velocidades verticales típicas en océanos son del orden de 10^{-2} cm/s mientras que las velocidades horizontales son 1000 veces mayores. Si el flujo es predominantemente horizontal y la aceleración vertical es pequeña comparada con la aceleración de la gravedad, la ecuación de cantidad de movimiento vertical puede reducirse a la simple ley hidrostática:

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho \cdot g = 0 \quad (4.5)$$

Al considerar la estratificación vertical, la densidad varía con la profundidad y no se utiliza esta aproximación para transformar directamente gradientes horizontales de presión en gradientes superficiales de presión. La presión en cada punto se resuelve como la integral en toda la profundidad de la densidad variable dependiente de z , según la ecuación 4.6:

$$p = \int_z^{a+h} (\rho \cdot g) dz \quad (4.6)$$

siendo a la elevación del fondo y h la profundidad total. De esta forma la presión es una función de la densidad y de la elevación de la superficie libre ($a+h$).

4.2.3 - Ecuación de continuidad

Integrando la ecuación de continuidad 4.2 en la dirección vertical en toda la profundidad, y calculando la velocidad vertical en la superficie y fondo en función de las velocidades horizontales y gradientes de velocidad horizontales, se obtiene una ecuación independiente de la velocidad vertical w :

$$\int_a^{a+h} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz = - \int_a^{a+h} \frac{\partial w}{\partial z} dz = -w(x, y, a+h) + w(x, y, a) \quad (4.7)$$

En la superficie:

$$\begin{aligned} w(x, y, a+h) &= u(x, y, a+h) \frac{\partial(a+h)}{\partial x} + v(x, y, a+h) \frac{\partial(a+h)}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial t} \\ &= u_s \frac{\partial(a+h)}{\partial x} + v_s \frac{\partial(a+h)}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial t} \end{aligned} \quad (4.8)$$

En el fondo:

$$w(x, y, a) = u(x, y, a) \frac{\partial a}{\partial x} + v(x, y, a) \frac{\partial a}{\partial y} = u_b \frac{\partial a}{\partial x} + v_b \frac{\partial a}{\partial y} \quad (4.9)$$

siendo u_s , v_s , u_b y v_b las componentes horizontales de la velocidad en la superficie y fondo, respectivamente.

El esquema de solución del modelo RMA-10 resuelve en primer lugar las componentes horizontales de la velocidad, la salinidad y la profundidad del agua. Luego por separado resuelve la componente vertical de la velocidad a partir de la ecuación de continuidad original 4.2. De esta forma el modelo resuelve el sistema considerando no acoplada dicha ecuación y la utiliza separadamente para calcular los valores de la velocidad vertical, w , considerando solamente la continuidad local. Para esto, la ecuación 4.2 se deriva respecto a la coordenada z transformándose en la ecuación 4.10, sujeta a las condiciones de borde específicas de superficie y fondo según las ecuaciones 4.8 y 4.9 presentadas anteriormente. Para resolver éstas ecuaciones se utilizan los valores de u y v determinados en todo el dominio en la primer parte del paso de resolución. Los valores determinados de w de ésta forma son utilizados en la siguiente iteración para calcular u , v , h y s . Las principales variables dependientes del modelo son entonces las componentes horizontales de la velocidad u y v , la profundidad del agua h y la salinidad s .

$$\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (4.10)$$

4.2.4 - Sistema modificado de ecuaciones

El sistema de ecuaciones tridimensionales presentados en 4.2.1 se reducen a partir de las aproximaciones y modificaciones mencionadas, a un sistema de dos ecuaciones de cantidad de movimiento (4.11a y 4.11b), una ecuación de continuidad integrada (4.12), una ecuación de advección difusión (4.13) y una ecuación de estado (4.14). En este sistema la velocidad vertical w solo aparece en las dos ecuaciones dinámicas y en la ecuación de advección difusión.

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{xz} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} - \Gamma_x = 0 \quad (4.11a)$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{yx} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{yz} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial y} - \Gamma_y = 0 \quad (4.11b)$$

$$\int_a^{a+h} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz + u_s \frac{\partial(a+h)}{\partial x} - u_b \frac{\partial a}{\partial x} + v_s \frac{\partial(a+h)}{\partial y} - v_b \frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} + w \frac{\partial s}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial s}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial s}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial s}{\partial z} \right) - \theta_s = 0 \quad (4.13)$$

$$\rho = F(s) \quad (4.14)$$

4.3 - Transformación geométrica vertical

El modelo utiliza una transformación sigma modificada en la dirección vertical. El sistema de ecuaciones se modifica para reflejar este nuevo sistema de coordenadas y se resuelve el sistema con dimensiones geométricas constantes. La modificación del modelo preserva el perfil de fondo como fue definido, pero transforma la superficie de agua a una elevación constante. Cuando esta transformación es aplicada, la componente vertical de velocidad en el fondo debe ajustarse para mantener la continuidad. Esto significa que la componente vertical de velocidad se calcula de forma que para cada nodo del fondo, cualquier flujo saliente al sistema sobre un área determinada es balanceado por un flujo entrante al sistema sobre la misma área. La transformación que modifica la geometría esta definida por:

$$x' = x \quad y' = y \quad z' = a + (z - a) \cdot \frac{(b - a)}{h} \quad (4.15)$$

siendo b la ubicación vertical fija a la cual la superficie de agua será transformada y a es la elevación del fondo correspondiente al mismo dato vertical.

Imponiendo esta transformación de la coordenada vertical a las ecuaciones de cantidad de movimiento 4.11, a la ecuación de continuidad modificada 4.12 y a la ecuación de advección difusión de sal 4.13, se obtiene el siguiente conjunto de ecuaciones tridimensionales para flujo estratificado:

$$\begin{aligned} \rho \left(h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \left[(b-a)(w-uT_x-vT_y) - (z-a) \frac{\partial h}{\partial t} \right] \right) - (b-a) \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{xx} \frac{h}{(b-a)} \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ - (b-a) \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{xy} \frac{h}{(b-a)} \frac{\partial u}{\partial y} \right) - (b-a) \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{xz} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \rho_s gh \frac{\partial a}{\partial x} + \rho_s gh \frac{\partial h}{\partial x} + g_x h - \Gamma_x = 0 \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \left[(b-a)(w-uT_x-vT_y) - (z-a) \frac{\partial h}{\partial t} \right] \right) - (b-a) \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{yx} \frac{h}{(b-a)} \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ - (b-a) \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{yy} \frac{h}{(b-a)} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - (b-a) \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{yz} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \rho_s gh \frac{\partial a}{\partial y} + \rho_s gh \frac{\partial h}{\partial y} + g_y h - \Gamma_y = 0 \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} \int_a^b \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{h}{(b-a)} - \frac{\partial u}{\partial z} T_x + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{h}{(b-a)} - \frac{\partial v}{\partial z} T_y \right) dz + u_s \frac{\partial(a+h)}{\partial x} - u_b \frac{\partial a}{\partial x} + v_s \frac{\partial(a+h)}{\partial y} \\ - v_b \frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} h \frac{\partial s}{\partial t} + hu \frac{\partial s}{\partial x} + hv \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial s}{\partial z} \left[(b-a)(w-uT_x-vT_y) - (z-a) \frac{\partial h}{\partial t} \right] - (b-a) \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{h}{(b-a)} \frac{\partial s}{\partial x} \right) \\ - (b-a) \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{h}{(b-a)} \frac{\partial s}{\partial y} \right) - (b-a) \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial s}{\partial z} \right) - h \theta_s = 0 \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\rho - F(s) = 0 \quad (4.20)$$

siendo: ρ_s = densidad en la superficie; u_s y v_s = las componentes horizontales de la velocidad en la superficie libre; u_b y v_b = las componentes horizontales de la velocidad en el fondo. Además:

$$\begin{aligned} g_x &= \int_a^{a+h} \frac{\partial}{\partial x} (\rho g) dz & g_y &= \int_a^{a+h} \frac{\partial}{\partial y} (\rho g) dz \\ T_x &= \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{(z-a)}{(b-a)} \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{h}{(b-a)} \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{(z-a)}{(b-a)^2} h \frac{\partial a}{\partial x} \\ T_y &= \frac{\partial a}{\partial y} + \frac{(z-a)}{(b-a)} \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{h}{(b-a)} \frac{\partial a}{\partial y} + \frac{(z-a)}{(b-a)^2} h \frac{\partial a}{\partial y} \end{aligned}$$

4.4 - Ecuaciones para flujo bidimensional integrado en vertical

El conjunto de ecuaciones bidimensionales integradas en la dirección vertical se obtienen integrando las ecuaciones 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19 sobre la dimensión vertical transformada ($b-a$) asumiendo que las velocidades u , v y la salinidad s son independientes de la elevación z . Bajo estas condiciones las derivadas respecto a z son cero, el término de presiones se simplifica y las ecuaciones que gobiernan el movimiento son las siguientes:

$$\begin{aligned} \rho(b-a) \left[h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{xx} h \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{xy} h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) \right] \\ - g(b-a) \frac{h^2}{2} \frac{\partial \rho}{\partial x} - (b-a) h \Gamma_x = 0 \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} \rho(b-a) \left[h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{yx} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{h}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right] \\ - (b-a) \frac{gh^2}{2} \frac{\partial \rho}{\partial y} - (b-a) h \Gamma_y = 0 \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (4.23)$$

$$(b-a) \left[h \left(\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x h \frac{\partial s}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y h \frac{\partial s}{\partial y} \right) - \theta_s \right] = 0 \quad (4.24)$$

$$\rho - F(s) = 0 \quad (4.25)$$

Es importante observar que aunque en estas ecuaciones se filtra la estratificación vertical se continúa considerando en las ecuaciones 4.21 y 4.22 la variación horizontal de la densidad y la influencia del flujo inducido por dicha variación (flujo baroclínico) sobre el campo de velocidades, a través de los términos:

$$\left[g(b-a) \frac{h^2}{2} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right] \quad \left[g(b-a) \frac{h^2}{2} \frac{\partial \rho}{\partial y} \right]$$

4.5 - Ecuación de estado

La salinidad, la temperatura y la concentración de sedimento suspendido modifican la densidad del agua según una ecuación de estado. En este trabajo, la temperatura y la concentración de sedimento suspendido se consideran constantes, por lo que las variaciones de la

densidad del agua se deben solamente a variaciones de salinidad. El modelo utiliza la ecuación de estado empírica 4.26 para describir la relación entre la salinidad y la densidad, expresando la densidad en unidades inglesas y la salinidad en partes por mil. Para la temperatura (T) utiliza la relación 4.27 y para la concentración de sedimento suspendido (C) la relación 4.28, expresando la temperatura en °C y el sedimento en mg/l. Cuando se utilizan varios constituyentes en una simulación, la densidad se define igual a 1,94 más las diferencias respecto a ese valor de cada constituyente.

$$\rho = 1,940 \left(1.0 + \frac{(4,906s - 11,7)}{(6511,7 - 1,906s)} \right) \quad (4.26)$$

$$\rho = 1,93993 + T(5,88599 \times 10^{-5} - 1,108539 \times 10^{-5} T) \quad (4.27)$$

$$\rho = 1,940(1 + 2,4 \times 10^{-6} C) \quad (4.28)$$

4.6 - Fuerzas externas de masa

La única fuerza de masa externa que actúa sobre todo el sistema y que considera el modelo es el efecto de la fuerza de Coriolis. Esta fuerza genera tensiones en las direcciones x e y de la forma:

$$\Gamma_x = \frac{\rho \Omega v h}{(b-a)} \quad \Gamma_y = -\frac{\rho \Omega u h}{(b-a)} \quad \Omega = 2\omega \sin \varphi \quad (4.29)$$

siendo ω la velocidad de rotación angular de la tierra y φ la latitud local.

4.7 - Condiciones de borde cinemáticas

Es necesario especificar condiciones de borde cinemáticas en todas las superficies externas al dominio de cálculo. En una representación tridimensional las condiciones de borde usuales que se ingresan son la elevación de la superficie libre en las fronteras con cuerpos de agua y los flujos de sal, calor o sedimento en las fronteras contra la tierra, aire o cuerpos de agua. Otra opción es especificar la velocidad contra las fronteras de tierra y agua, como condición de flujo específico (se define el producto de la velocidad por la profundidad) o con una ecuación de descarga, y un valor específico de sal, temperatura o concentración de sedimento en las fronteras con cuerpos de agua. En una representación bidimensional integrada en vertical, las condiciones de borde utilizadas son iguales a las especificadas para el caso tridimensional con la diferencia de que no es necesaria una condición de borde de flujo de sal, calor o sedimento contra la frontera con la atmósfera.

4.7.1 - Condición en la superficie libre

Las condiciones de borde impuestas a las ecuaciones de flujo en la superficie libre son no atravesamiento a través de la misma y presión igual a cero. Esta última se impone con la aproximación hidrostática y en la transformación geométrica. La condición de no atravesamiento se satisface automáticamente cuando la ecuación de continuidad local se resuelve con la siguiente condición de borde superior:

$$w_s = \frac{dh}{dt} \quad (4.30)$$

La condición de borde impuesta para la salinidad en la superficie libre es que no haya flujo de sal a través de la misma. Como la velocidad vertical a través de la superficie libre es cero, ésta condición debe aplicarse como una condición de flujo difusivo igual a cero. La condición de borde es entonces:

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0 \quad (4.31)$$

4.7.2 - Condición en el fondo

Hay dos formas posibles de definir la condición de borde en el fondo del dominio de cálculo. Si se asume que los efectos de la capa límite no serán modelados formalmente debido a que el espesor de la capa límite es menor que la resolución vertical de la grilla, entonces la velocidad de fondo será distinta de cero pero estará sujeta a las tensiones de corte del fondo. La condición de borde impuesta en este caso es la condición de no atravesamiento (ecuación 4.32). En el caso de que exista un detalle vertical suficiente para modelar los efectos de la capa límite, entonces lo más apropiado es aplicar la condición de no deslizamiento (ecuación 4.33).

$$u_b \frac{\partial a}{\partial x} + v_b \frac{\partial a}{\partial y} - w_b = 0 \quad (4.32)$$

$$u_b = v_b = w_b = 0 \quad (4.33)$$

Para la salinidad la condición de borde apropiada en el fondo es que no haya flujo de sal a través de la superficie de fondo. Debido a que hay una condición de no advección a través del fondo en los dos tipos de condiciones especificadas, la condición de flujo cero de sal se reduce a una condición de difusión igual a cero en el fondo (ecuación 4.31).

4.7.3 - Condición en los bordes laterales

Hay dos tipos de bordes laterales, los bordes formados por la costa y los cortes del sistema, donde se separa el área de estudio del resto del cuerpo de agua.

Estrictamente los bordes que representan a la costa deben tener profundidad igual a cero. Como consecuencia la posición de estos bordes sería variable, en función de la elevación de la superficie libre. En la práctica imponer profundidad cero genera dificultades numéricas y es conveniente entonces utilizar una aproximación, con la cual se define la costa con una pequeña profundidad positiva. Se define de esta forma una posición fija para la costa. La condición de borde impuesta en estos bordes es que la velocidad normal a la misma sea igual a cero, que siendo α la inclinación de la costa queda de la siguiente forma:

$$u \sin \alpha - v \cos \alpha = 0 \quad (4.34)$$

La condición de borde impuesta en la costa para la salinidad es flujo cero a través de la misma, que debido a la condición de velocidad normal a la misma igual cero se reduce a una condición de difusión igual a cero.

Los bordes que son cortes del sistema presentan varias opciones de condiciones de borde. Dependiendo de los datos con los que se cuenta y del análisis que se quiere efectuar se tienen varias opciones, y por lo menos debe especificarse alguna en todas las posiciones que conforman éste tipo de frontera. Una opción es especificar la elevación de la superficie de agua en parte o en toda la línea de frontera. Otra opción es especificar las velocidades en cada posición (x,y,z) de la línea de corte del sistema, y finalmente es posible una combinación entre ambas condiciones, como por ejemplo especificar un determinado flujo a través de la misma, de la forma $u.h$ ó $v.h$.

La condición de borde de salinidad en estos cortes del sistema depende de la dirección del régimen de flujo. Si la dirección de flujo es saliente al sistema, entonces no se requiere una especificación de la salinidad en estos bordes. Si en cambio la dirección de flujo es entrante al sistema, entonces los valores de salinidad se deben especificar para cada posición (x,y,z) de la misma.

4.8 - Condiciones de borde dinámicas

Las fuerzas externas sobre las superficie que calcula el modelo son la tensión del viento en la superficie libre y la fricción del fondo y de las paredes. Cada una de estas fuerzas se aplica sobre las superficies como una tensión de corte en la dirección apropiada.

4.8.1 - Tensión del viento

El viento sobre la superficie libre genera tensiones en la dirección del viento cuyas componentes se calculan según la ecuación 4.35.

$$\Gamma_x = \psi W^2 \cos \theta \quad \Gamma_y = \psi W^2 \sin \theta \quad (4.35)$$

siendo ψ = constante de entrada al modelo, por defecto $13,6 \times 10^{-6}$; θ = la dirección del viento medida en sentido antihorario desde el Este; y W = la intensidad del viento en m/s.

Estas componentes Γ_x y Γ_y representan las tensiones de corte independientes de la velocidad del agua y se consideran constantes en cada paso de tiempo. Sin embargo el viento puede simularse variable en el tiempo y en el dominio de calculo.

4.8.2 - Fricción de fondo

La formulación utilizada por el modelo para representar las componentes de la tensión generada por la fricción de fondo puede basarse en la ecuación de fricción de Manning o de Chezy. Utilizando la formulación de Chezy, las tensiones que actúan en el fondo en la dirección contraria al flujo son:

$$\Gamma_x = -\frac{\rho g u_b V}{C^2} \quad \Gamma_y = -\frac{\rho g v_b V}{C^2} \quad V = (u_b^2 + v_b^2)^{0.5} \quad (4.36)$$

siendo V = magnitud de la velocidad en el fondo; y C = coeficiente de Chezy. Utilizando la formulación de Manning las tensiones de fondo se calculan según:

$$\Gamma_x = -\rho g \left(\frac{n}{1,486} \right)^2 u_b \frac{V}{h^{4/3}} \quad \Gamma_y = -\rho g \left(\frac{n}{1,486} \right)^2 v_b \frac{V}{h^{4/3}} \quad V = (u_b^2 + v_b^2)^{0.5} \quad (4.37)$$

siendo V = magnitud de la velocidad en el fondo; n = coeficiente de Manning y 1,486 un factor de corrección de unidades.

4.8.3 - Fricción lateral

Una fuerza de corte se calcula también sobre las superficies laterales o paredes en los costados del dominio. Estas tensiones se calculan de forma análoga a la fricción de fondo utilizando la formulación de Manning o Chezy y tienen dirección opuesta al flujo.

4.9 - Viscosidad y difusión turbulenta en la dirección vertical

En flujos homogéneos o estratificados, la viscosidad vertical turbulenta y la difusión vertical turbulenta pueden variar significativamente a lo largo de la profundidad. El modelo permite optar entre varias formas de determinar esta dependencia.

4.9.1 - Descripción paramétrica

En este caso se calculan los parámetros ε_{xz} , ε_{yz} y D_z considerando una variación cuadrática a lo largo de la profundidad, utilizando la siguiente formulación:

$$\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{xz} \left[EDD1 + \frac{(z-a)}{(b-a)} \left(EDD2 + \frac{(z-a)}{(b-a)} EDD3 \right) \right] \quad (4.38)$$

Siendo ε_{xz} , $EDD1$, $EDD2$ y $EDD3$ parámetros fijos definidos por el usuario como valores de entrada al modelo. En este caso los coeficientes verticales son constantes en el tiempo. La misma formulación se aplica para ε_{yz} y D_z .

4.9.2 - Formulación RMA

Esta formulación se basa en las distribuciones de difusividad desarrolladas para aplicaciones en reservorios estratificados. En este caso los coeficientes ε_{xz} , ε_{yz} y D_z se determinan en primer lugar a partir de los valores homogéneos calculados a partir de la ecuación 4.38 y luego se aplica un coeficiente variable que considera la estratificación del sistema:

$$\varepsilon_{xz}'' = D_f \varepsilon_{xz} \quad (4.39)$$

$$\text{Con } D_f = 1 \quad \text{cuando} \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} < D_{CR} \quad (D_{CR} = 1.1335 \times 10^{-6} \text{ 1/ft})$$

$$\text{Con } D_f = 0,6888 \times 10^{-4} \left(-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^{0,7} \quad \text{cuando} \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} > D_{CR}$$

4.9.3 - Formulación Mellor Yamada

La determinación de los parámetros utilizando este método requiere dos pasos. En el primer paso se calculan los valores nominales de la viscosidad y difusividad turbulentas verticales asumiendo que se trata de un fluido homogéneo. Se aplica una metodología de cierre de segundo orden para determinar los coeficientes de viscosidad turbulenta de estabilidad neutral, $E_{xz} = E_{yz}$ y el coeficiente de difusión turbulenta de estabilidad neutral D_h , de la siguiente forma:

$$E_{xz} = E_{yz} = \rho S_m l_m q \quad D_h = S_h l_m q \quad (4.40)$$

Donde $S_m = 0,393$ y $S_h = 0,494$ son constantes determinadas por Mellor y Yamada a partir de mediciones experimentales; l_m es la longitud de mezcla turbulenta y q es una medida de las fluctuaciones de la velocidad. Estos dos últimos se calculan según:

$$l_m = 0.4(z-a) \left| 1 - \frac{(z-a)}{h} \right|^{0.5} \quad (4.41)$$

$$q^2 = 16.6 l_m^2 S_m \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (4.42)$$

En el segundo paso los valores nominales para el flujo homogéneo se ajustan para flujo estratificado utilizando la metodología de Henderson-Sellers. Los coeficientes E_{xz} y D_h se multiplican por los coeficientes variables en el tiempo S_{se} y S_{sd} determinados de la siguiente forma:

$$\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = S_{se} E_{xz} \quad D_z = S_{sd} D_h \quad S_{se} = \frac{1}{(1 + 37R_i^2)} \quad S_{sd} = \frac{1}{(1 + 0.74R_i)} \quad (4.43)$$

siendo R_i el número de Richardson definido como:

$$Ri = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho / \partial z}{\left(\partial V / \partial z \right)^2} \quad (4.44)$$

4.9.4 - Formulación Henderson Sellers

En este caso se utiliza una parametrización de la longitud de mezcla para desarrollar la distribución de los coeficientes verticales de viscosidad y difusividad para condiciones de estabilidad neutral y luego se aplica el ajuste de Henderson Sellers para definir los coeficientes para flujo estratificado. A diferencia de la opción 4.9.3, en ésta opción se definen los coeficientes homogéneos multiplicando la longitud de mezcla por un coeficiente ingresado al modelo:

$$E_{xz} = \rho l_m E_{in} \quad D_h = l_m D_{in} \quad (4.45)$$

siendo E_{in} y D_{in} valores constantes definidos por el usuario ingresados al modelo y l_m definido según la ecuación 4.41. Los coeficientes finales se obtienen aplicando las ecuaciones 4.43.

4.10 - Viscosidad y difusión turbulenta en la dirección horizontal

El modelo tiene varias formas de determinar los coeficientes de viscosidad y difusión horizontales. La opción más sencilla es ingresar directamente los valores de los coeficientes. Estos valores pueden variar en el dominio de cálculo pero permanecen constantes a lo largo del tiempo. Otra forma de calcular los coeficientes turbulentos horizontales es aplicando factores de escala que se ingresan al modelo para cada elemento. En una primer opción estos factores de escala se aplican a la longitud nominal del elemento en la dirección principal fija del elemento. El modelo en este caso calcula para cada elemento una dirección principal fija y según la misma una longitud nominal del elemento. En una segunda opción los factores de escala se aplican a la longitud nominal del elemento pero en la dirección del flujo en el elemento y no según la dirección fija definida según la forma del mismo. En la tercer opción los factores de escala se aplican en la dirección del flujo en el elemento como en la opción anterior pero se calcula el tamaño del elemento también según la dirección del flujo. Por último el modelo permite calcular los coeficientes de viscosidad y difusión turbulenta horizontales utilizando la formulación de Smagorinsky:

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \varepsilon_{yy} = kA \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \quad (4.46)$$

siendo k un coeficiente fijo determinado por el usuario y A el área del elemento.

Capítulo 5

RESOLUCION NUMERICA DEL MODELO RMA-10

En el capítulo anterior se describieron las características generales del modelo numérico RMA-10. En este capítulo se describen los métodos de resolución numérica que utiliza este modelo para resolver el conjunto de ecuaciones que describen el movimiento de un flujo estratificado. El modelo aplica el método de los elementos finitos para resolver las ecuaciones diferenciales junto con las condiciones de borde apropiadas.

5.1 - Introducción

La resolución numérica que utiliza el modelo para obtener la solución del sistema de ecuaciones consiste en:

- Definición de los elementos finitos utilizando una aproximación isoparamétrica.
- Aplicación del método de los pesos residuales de Galerkin para derivar las formulaciones en la metodología de los elementos finitos.
- Aplicación del método iterativo de Newton Raphson para resolver el sistema de ecuaciones.
- Aplicación del esquema de Crank Nicholson modificado para resolver la variación temporal en el caso de flujo no estacionario.
- Resolución de las integrales de los elementos finitos utilizando una aproximación gaussiana cuadrática.

El esquema de resolución resuelve en primer lugar las componentes horizontales de la velocidad, la salinidad y la profundidad del agua en todo el dominio de cálculo, y luego en una segunda etapa se determinan las velocidades verticales a partir de la ecuación de continuidad y las variables calculadas en la primer etapa. La iteración de Newton Raphson para ecuaciones no lineales utilizada abarca estas dos etapas de la resolución del sistema de ecuaciones.

5.2 - Método de Galerkin y formulación en elementos finitos

El método de los elementos finitos es un método para resolver ecuaciones diferenciales que aproxima una función o propiedad continua en determinado dominio en valores de dicha propiedad definidos para un conjunto de puntos discretos, denominados malla o grilla de cálculo. Como el método de los elementos finitos puede adaptarse a problemas de gran complejidad y geometría inusual, es una herramienta muy poderosa para obtener soluciones de problemas de transferencia de calor, mecánica de los fluidos y sistemas mecánicos. Además, la disponibilidad de computadoras

permite utilizar este método y obtener rápidamente soluciones aproximadas de los problemas complejos que no cuentan con soluciones analíticas exactas.

5.2.1 - Método de los residuos ponderados

En general la aproximación en elementos finitos se basa en los métodos del tipo de residuos ponderados que se aplican directamente sobre la ecuación diferencial y sus condiciones de contorno. Para explicar estos métodos consideremos una ecuación diferencial genérica de variable u definida sobre un dominio Ω según 5.1 que está sujeta a condiciones de contorno sobre la parte Γ de su frontera según 5.2. La ecuación 5.1 se verifica en Ω y la ecuación 5.2 en Γ , siendo $A(u)$ y $M(u)$ operadores diferenciales.

$$A(u) - f = 0 \quad (5.1)$$

$$M(u) - g = 0 \quad (5.2)$$

Si se reemplaza la solución exacta u por una solución aproximada u^* en la ecuación diferencial 5.1 y en sus condiciones de contorno 5.2, entonces estas ecuaciones no se cumplirán exactamente y van a generar un residuo R_Ω en el dominio y un residuo R_Γ en el contorno:

$$\begin{aligned} R_\Omega(u^*) &= A(u^*) - f \neq 0 \\ R_\Gamma(u^*) &= M(u^*) - g \neq 0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

La idea básica de los métodos de residuos ponderados es imponer la siguiente condición 5.4 para cualquier par de funciones arbitrarias W y W' que sean integrables y no idénticamente nulas. Se ha demostrado que si esto se cumple entonces la función u debe ser la solución exacta de la ecuación diferencial y de sus condiciones de contorno naturales.

$$\int_{\Omega} W R_\Omega(u) d\Omega + \int_{\Gamma} W' R_\Gamma(u) d\Gamma = 0 \quad (5.4)$$

A partir de la idea anterior es posible generar soluciones aproximadas de este sistema de la forma:

$$u^* = \sum_{i=1}^n a_i N_i(x, y) \quad (5.5)$$

Donde las funciones $N_i(x, y)$ se denominan funciones de prueba que pueden ser elegidas arbitrariamente y satisfacen las condiciones esenciales de contorno. Las n constantes a_i son coeficientes a determinar imponiendo las n condiciones definidas anteriormente:

$$\int_{\Omega} W_i R_{\Omega}(u^*) d\Omega + \int_{\Gamma} W_i' R_{\Gamma}(u^*) d\Gamma = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.6)$$

donde W_i y W_i' se denominan funciones de ponderación.

Según el tipo de funciones de peso o ponderación W_i empleadas en la formulación se definen diferentes métodos de aproximación. El modelo RMA-10 utiliza el método de Galerkin de los pesos residuales, en el cual se adoptan las funciones de ponderación W_i iguales a las funciones de prueba N_i , utilizadas en la representación de las variables en la formulación en elementos finitos. Con esto la condición 5.6 queda de la forma:

$$\int_{\Omega} N_i R_{\Omega}(u^*) d\Omega + \int_{\Gamma} N_i R_{\Gamma}(u^*) d\Gamma = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.7)$$

En este método las funciones de prueba N_i deben tener derivadas definidas hasta el máximo orden que aparece en el residuo, esto es, del mismo orden que la ecuación diferencial.

5.2.2 - Formulación en elementos finitos

Se han definido, según la ecuación 5.5, las soluciones aproximadas de las variables de nuestro sistema, que como se mencionó en el Capítulo 4, son las componentes de la velocidad, la profundidad y la salinidad. Se ha asumido implícitamente que las funciones de prueba N_i están definidas por una expresión simple válida en todo el dominio Ω . Esto puede ser posible en casos de dominios con geometría sencilla como rectángulos, círculos, etc., pero no en casos de geometrías más complejas, como puede ser por ejemplo la geometría del Río de la Plata. Debido a esto, el método de elementos finitos divide el dominio de cálculo en una serie de subdominios o elementos Ω^e que no se superponen, para definir las funciones de prueba más fácilmente. Las aproximaciones u^* se construyen entonces por trozos usando definiciones simples de las funciones de prueba sobre cada uno de los elementos.

Dentro de los elementos es posible definir diferentes puntos, que pueden ser por ejemplo sus extremos o puntos pertenecientes a los lados de cada elemento. A cada uno de estos puntos denominados nodos se asocia un valor de la variable a_i , de forma que la sumatoria definida en la ecuación 5.5 se toma en todos los nodos del dominio.

En definitiva en la aproximación por elementos finitos se divide el dominio de cálculo en elementos y nodos, y se reemplaza la variable continua por la aproximación en elementos finitos paramétrica dentro de cada elemento utilizando las funciones de prueba. En el modelo numérico RMA-10 las variables del sistema se describen de diferentes maneras, las componentes de la velocidad y la salinidad se describen dentro de cada elemento utilizando funciones de prueba cuadráticas y la profundidad se define utilizando una función básica lineal.

5.3 - Tipos de elementos

En el RMA-10 se pueden definir cuatro tipos de elementos para dividir el dominio de cálculo: elementos tridimensionales, elementos bidimensionales integrados en vertical, elementos bidimensionales integrados lateralmente y elementos unidimensionales integrados lateral y verticalmente. Las velocidades y la salinidad requieren la definición de los nodos en los lados y en los vértices de los elementos ya que se utilizan funciones de prueba cuadráticas para su aproximación. Para la profundidad en cambio se utilizan funciones lineales por lo que la misma queda definida completamente por los valores en los nodos de los vértices.

Los elementos tridimensionales más utilizados son los prismas, con el tetraedro y la pirámide como elementos necesarios para definir transiciones entre diferentes niveles de discretización. Los tipos de elementos bidimensionales que pueden definirse en el plano son elementos cuadriláteros o triangulares con nodos en cada uno de los vértices y en cada lado. El elemento unidimensional es una línea de tres nodos.

5.3.1 - Elementos tridimensionales

Según la ecuación 5.7, cuando se aplica el método de los pesos residuales de Galerkin al sistema de ecuaciones de flujo tridimensional (ecuaciones 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19) se debe multiplicar el residuo obtenido para cada variable por una función de peso apropiada y luego se debe resolver la integral en cada elemento.

El modelo RMA-10 define un vector fila de funciones cuadráticas **N** que será utilizado como función de peso para las ecuaciones de cantidad de movimiento y para la ecuación de advección difusión. El vector **N** representa una sucesión de funciones geométricas definidas iguales a 1 en un nodo y 0 en todos los otros nodos esquina del elemento. Como se mencionó anteriormente los nodos se definen en las esquinas de los elementos y en los puntos medios de los lados de los mismos. Para la ecuación de continuidad integrada se define un vector fila de funciones básicas lineales **M**, que son iguales a 1 en un determinado nodo de esquina y 0 en todos los demás nodos esquina del elemento, de forma que **M** tendrá un valor de 0,5 en todos los puntos medios.

A partir de estos vectores se definen los vectores siguientes:

- **f_x**: vector columna cuyos términos representan el error residual en la ecuación de cantidad de movimiento según *x* de cada elemento.
- **f_y**: vector columna cuyos términos representan el error residual en la ecuación de cantidad de movimiento según *y* de cada elemento.
- **f_c**: vector columna cuyos términos representan el error residual en la ecuación de continuidad de cada elemento.
- **f_s**: vector columna cuyos términos representan el error residual en la ecuación de advección difusión de salinidad de cada elemento de la grilla.

Evaluando los residuos de las ecuaciones dinámicas 4.16 y 4.17, multiplicando por los pesos residuales anteriormente definidos, integrando y aplicando la regla de integración por partes en los términos viscosos y de carga de las ecuaciones de cantidad de movimiento, se obtienen las formulaciones de $\mathbf{f}_x$ y $\mathbf{f}_y$ siguientes:

$$\begin{aligned}
 f_x = & \int_V N^T \rho \left(h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \left[(b-a)(w - uT_x - vT_y) - (z-a) \frac{\partial h}{\partial t} \right] - \Omega v h \right) dV + \\
 & \int_V N^T \left(-\varepsilon_{xx} \frac{h}{(b-a)} \frac{\partial a}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} - \varepsilon_{xy} \frac{h}{(b-a)} \frac{\partial a}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} + \rho_s g h \frac{\partial a}{\partial x} - g \frac{h^2}{2} \frac{\partial \rho_s}{\partial x} + g_x h - \Gamma_x \right) dV + \\
 & \int_V \left(N_x^T \left(h \varepsilon_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} - \rho_s g \frac{h^2}{2} \right) + N_y^T \left(h \varepsilon_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + N_z^T \left((b-a) \varepsilon_{xz} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) dV - \\
 & \int_A N^T \left(h \varepsilon_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + h \varepsilon_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} + (b-a) \varepsilon_{xz} \frac{\partial u}{\partial z} + \rho_s g \frac{h^2}{2} \right) dA
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

$$\begin{aligned}
 f_y = & \int_V N^T \rho \left(h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \left[(b-a)(w - uT_x - vT_y) - (z-a) \frac{\partial h}{\partial t} \right] + \Omega u h \right) dV + \\
 & \int_V N^T \left(-\varepsilon_{yx} \frac{h}{(b-a)} \frac{\partial a}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} - \varepsilon_{yy} \frac{h}{(b-a)} \frac{\partial a}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial y} + \rho_s g h \frac{\partial a}{\partial y} - g \frac{h^2}{2} \frac{\partial \rho_s}{\partial y} + g_y h - \Gamma_y \right) dV + \\
 & \int_V \left(N_x^T \left(h \varepsilon_{yx} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + N_y^T \left(h \varepsilon_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} - \rho_s g \frac{h^2}{2} \right) + N_z^T \left((b-a) \varepsilon_{yz} \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) dV - \\
 & \int_A N^T \left(h \varepsilon_{yx} \frac{\partial v}{\partial x} + h \varepsilon_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + (b-a) \varepsilon_{yz} \frac{\partial v}{\partial z} + \rho_s g \frac{h^2}{2} \right) dA
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

Siendo $\mathbf{N}_x$, $\mathbf{N}_y$, $\mathbf{N}_z$ los vectores que se obtienen derivando la función cuadrática $\mathbf{N}$ respecto a las coordenadas x , y , z , respectivamente.

El residuo de la ecuación de continuidad integrada sobre la profundidad transformada $(b-a)$ (ecuación 4.18) multiplicado por el vector de funciones lineales $\mathbf{M}$ debe integrarse sobre el área en planta A_h . Los términos de la integral doble se combinan para formar una integral de volumen:

$$\begin{aligned}
 f_c = & \int_V M^T \left(\frac{h}{(b-a)} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial u}{\partial z} T_x - \frac{\partial v}{\partial z} T_y \right) dV + \\
 & \int_{A_h} M_h^T \left(u_s \frac{\partial(a+h)}{\partial x} + v_s \frac{\partial(a+h)}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial t} - u_b \frac{\partial a}{\partial x} - v_b \frac{\partial a}{\partial y} \right) dA
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

Siendo $\mathbf{M}_h$ el vector de funciones básicas definido solamente utilizando los elementos en planta bidimensionales.

Por último, el error residual para la ecuación de advección difusión de salinidad (ecuación 4.19) es:

$$\begin{aligned}
 f_s = & \int_V N^T \left(h \frac{\partial s}{\partial t} + hu \frac{\partial s}{\partial x} + hv \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial s}{\partial z} \left[(b-a)(w - uT_x - vT_y) - (z-a) \frac{\partial h}{\partial t} \right] \right) dV + \\
 & \int_V N^T \left(-D_x \frac{h}{(b-a)} \frac{\partial a}{\partial x} \frac{\partial s}{\partial x} - D_y \frac{h}{(b-a)} \frac{\partial a}{\partial y} \frac{\partial s}{\partial y} - h\theta_s \right) dV + \\
 & \int_V \left(N_x^T \left(D_x h \frac{\partial s}{\partial x} \right) + N_y^T \left(D_y h \frac{\partial s}{\partial y} \right) + N_z^T \left(D_z (b-a) \frac{\partial s}{\partial z} \right) \right) dV
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

5.3.2 - Elementos bidimensionales integrados en vertical

El método de los elementos finitos se aplica en forma análoga a las ecuaciones bidimensionales promediadas en vertical definidas en 4.4. La integración se realiza en este caso sobre el área de los elementos en el plano horizontal. Las funciones de base **N** y **M** están definidas por funciones bidimensionales con propiedades idénticas a las definidas para elementos tridimensionales. Como se consideran las ecuaciones integradas en vertical se incluyen en la formulación siguiente las fuerzas debidas al viento y a la fricción de fondo a través de la formulación de Chezy.

Los vectores residuales **f_x**, **f_y**, **f_c** y **f_s** se presentan en las ecuaciones 5.12, 5.13, 5.14 y 5.15, respectivamente. En dichas formulaciones **Γ_{wx}** y **Γ_{wy}** representan las fuerzas debido a la tensión del viento en las direcciones *x* e *y* respectivamente.

$$\begin{aligned}
 f_x = & \int_{Ah} N^T \left(\rho(b-a) \left[h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{g}{C^2} u|V| + uq_s - \Omega vh - \Gamma_{wx} \right] \right) dA + \\
 & \int_{Ah} N^T \left(-\varepsilon_{xx} h \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial a}{\partial x} - \varepsilon_{xy} h \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial a}{\partial x} + \rho gh(b-a) \frac{\partial a}{\partial x} + \rho g \frac{h^2}{2} \frac{\partial a}{\partial x} \right) dA + \\
 & \int_{Ah} \left(N_x^T \left[\varepsilon_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} (b-a)h - \rho g(b-a) \frac{h^2}{2} \right] + N_y^T \varepsilon_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} (b-a)h \right) dA
 \end{aligned} \tag{5.12}$$

$$\begin{aligned}
 f_y = & \int_{Ah} N^T \left(\rho(b-a) \left[h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{g}{C^2} v|V| + vq_s + \Omega uh - \Gamma_{wy} \right] \right) dA + \\
 & \int_{Ah} N^T \left(-\varepsilon_{yx} h \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial a}{\partial y} - \varepsilon_{yy} h \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial a}{\partial y} + \rho gh(b-a) \frac{\partial a}{\partial y} + \rho g \frac{h^2}{2} \frac{\partial a}{\partial y} \right) dA + \\
 & \int_{Ah} \left(N_x^T \varepsilon_{yx} \frac{\partial v}{\partial x} (b-a)h + N_y^T \left[\varepsilon_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} (b-a)h - \rho g(b-a) \frac{h^2}{2} \right] \right) dA
 \end{aligned} \tag{5.13}$$

$$f_c = \int_{Ah} M^T \left(h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial t} - q_s \right) dA \quad (5.14)$$

$$f_s = \int_{Ah} N^T \left(h(b-a) \left(\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} \right) - D_x h \frac{\partial a}{\partial x} \frac{\partial s}{\partial x} - D_y h \frac{\partial a}{\partial y} \frac{\partial s}{\partial y} - h(b-a) (\theta_s + q_s (s_s - s)) \right) dA + \int_{Ah} \left(N_x^T D_x h(b-a) \frac{\partial s}{\partial x} + N_y^T D_y h(b-a) \frac{\partial s}{\partial y} \right) dA \quad (5.15)$$

5.4 - Método Newton Raphson

El RMA-10 utiliza el método de convergencia de Newton Raphson para obtener la solución de las ecuaciones anteriormente presentadas. Es un proceso iterativo, lo que consiste básicamente en calcular a partir de valores iniciales supuestos de las variables la solución de las ecuaciones y reemplazar dicha solución nuevamente en la ecuación repitiendo el procedimiento, calculando de esta forma un valor aproximado de la solución en cada iteración. Cuando la diferencia entre los resultados obtenidos en dos iteraciones sucesivas es menor que cierto valor predeterminado de las variables, significa que el método ha convergido y la solución obtenida es la correcta.

El método de Newton Raphson define una forma de determinar los valores nuevos de las variables a ingresar en las ecuaciones en función de los valores obtenidos en las iteraciones anteriores, de forma de obtener una solución mejorada y aumentar la convergencia del sistema. Se define esta solución mejorada calculando las variaciones de la función error residual respecto a cada una de las variables desconocidas y realizando una corrección simultánea de todas las estimaciones asumiendo que las funciones error son localmente lineales. Anteriormente se definió la función error residual para cada una de las ecuaciones que gobiernan el flujo. Sea $\mathbf{f}_i(\mathbf{u}_j^n)$ el error residual en la ecuación i calculado para el valor estimado de la variable $\mathbf{u}_j$ luego de la iteración n . Si la solución calculada en un paso de cálculo es la solución exacta entonces las funciones error $\mathbf{f}_i(\mathbf{u}_j^n)$ deben ser iguales a cero para todo i . El método de Newton Raphson define el ajuste $\Delta \mathbf{u}_j$ de la solución obtenida $\mathbf{u}_j$ tal que verifique la siguiente ecuación:

$$\sum_{j=1} \left(\frac{\partial f_i}{\partial u_j} \right)_{u^n} \Delta u_j + f_i = 0 \quad \forall i=1, \dots, N \quad (5.16)$$

Donde $\left(\frac{\partial f_i}{\partial u_j} \right)_{u^n}$ es la derivada del error residual de la ecuación i respecto a la variable $\mathbf{u}$ evaluada con las n estimaciones de $\mathbf{u}$ ya calculadas en las iteraciones anteriores.

Se tiene entonces un conjunto de N ecuaciones simultáneas con N incógnitas, donde la matriz cuadrada de elementos $\left(\frac{\partial f_i}{\partial u_j} \right)_{u^n}$ es el jacobiano $[J^n]$ del sistema en la iteración n .

Cuando se aplica el método de Newton Raphson al sistema de ecuaciones tridimensionales en elementos finitos (ecuaciones 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11) o al sistema de ecuaciones bidimensionales integradas en vertical (5.12, 5.13, 5.14 y 5.15), se requieren las derivadas parciales de las cuatro integrales f_x , f_y , f_c y f_s , respecto a los valores en los nodos de cada variable dependiente:

- Para la ecuación momento en x: $\frac{\partial f_x}{\partial u} \quad \frac{\partial f_x}{\partial v} \quad \frac{\partial f_x}{\partial h} \quad \frac{\partial f_x}{\partial s}$
- Para la ecuación momento en y: $\frac{\partial f_y}{\partial u} \quad \frac{\partial f_y}{\partial v} \quad \frac{\partial f_y}{\partial h} \quad \frac{\partial f_y}{\partial s}$
- Para la ecuación de continuidad: $\frac{\partial f_c}{\partial u} \quad \frac{\partial f_c}{\partial v} \quad \frac{\partial f_c}{\partial h} \quad \frac{\partial f_c}{\partial s}$
- Para la ecuación de difusión advección: $\frac{\partial f_s}{\partial u} \quad \frac{\partial f_s}{\partial v} \quad \frac{\partial f_s}{\partial h} \quad \frac{\partial f_s}{\partial s}$

Las fórmulas correspondientes a cada una de estas derivadas para las ecuaciones tridimensionales y para el sistema de ecuaciones bidimensional integrado en vertical se presentan en el Anexo 1.

5.5 - Resolución temporal

Cuando el flujo es no estacionario el modelo determina la variación temporal de las variables utilizando un método de resolución temporal semi-implícito. El método reemplaza las derivadas respecto al tiempo por una formulación en diferencias finitas. Considerando que la variación temporal de un parámetro u es de la forma $u = u_o + at + bt^a$, siendo u_o el valor de u al inicio del intervalo de tiempo y a , b constantes a determinar, la variación de u en el tiempo para un intervalo Δt es de la forma:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = (1 - \alpha) \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)_0 + \alpha \frac{(u - u_o)}{\Delta t} \quad (5.17)$$

Siendo $\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)_0$ la derivada respecto al tiempo al inicio del intervalo.

Esta aproximación muestra que la derivada temporal puede expresarse como una función de valores conocidos al inicio del intervalo de tiempo y de la variable dependiente misma. Sustituyendo esta expresión cuando aparecen derivadas en el tiempo en la formulación de elementos finitos se obtiene la ecuación 5.17. Para el método de Newton Raphson son necesarias las derivadas respecto a cada variable de la ecuación 5.17, las cuales quedan de la forma de la ecuación 5.18.

$$\int N^T \frac{\partial u}{\partial t} dV = \int N^T \left[(1-\alpha) \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)_0 + \alpha \frac{(u - u_o)}{\Delta t} \right] dV \quad (5.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial u} \int N^T \frac{\partial u}{\partial t} dV = \int N^T \frac{\alpha}{\Delta t} N dV \quad (5.18)$$

El parámetro α es un factor de peso. Cuando $\alpha = 1$ se obtiene un método puramente implícito en la resolución temporal y para $\alpha = 2$ se obtiene un esquema centrado semi-implícito que tiene forma idéntica al método de Crank Nicholson. El modelo RMA-10 se ha desarrollado considerando un factor de $\alpha = 1,6$ determinado a partir de la experiencia numérica de los autores, al cual se le denomina método de paso de tiempo de Crank Nicholson modificado.

5.6 - Cuadratura gaussiana

Las integrales en los elementos definidas anteriormente para los problemas tridimensionales o bidimensionales integrados en vertical no pueden evaluarse analíticamente. Para determinar el valor de las mismas se requiere la aplicación de la integración numérica o cuadratura, siendo la cuadratura gaussiana el esquema aplicado en el RMA-10. Esta aproximación sustituye una integral en línea, área o volumen en una sumatoria de términos que son el integrando evaluado en una ubicación predeterminada, multiplicado por un factor de ponderación. En general este factor de ponderación es el largo, área o volumen del elemento multiplicado por un factor U_i y la sumatoria se realiza sobre un número de puntos predeterminados:

$$\int_A f dA = area \sum_i f(x_i, y_i) U_i \quad (5.19)$$

El número y la ubicación de los puntos en donde se calcula la sumatoria definida en la cuadratura gaussiana son los que determinan el orden de aproximación del polinomio a la integral. Por ejemplo una cuadratura gaussiana sobre 9 ubicaciones en un elemento permite una integración de un polinomio de quinto orden en x e y . El RMA-10 utiliza como orden de aproximación estándar para elementos de lados rectos la sumatoria de quinto orden. Para elementos curvos el orden de aproximación es de séptimo orden.

Capítulo 6

IMPLEMENTACION DEL MODELO EN EL RIO DE LA PLATA

El cálculo del campo de velocidades y del campo de salinidades en el área de interés se realizó mediante la aplicación del modelo hidrodinámico tridimensional baroclino RMA-10, cuyas características principales se han descrito en los dos capítulos anteriores. En este trabajo, el modelo fue aplicado en forma integrada en la vertical, manteniendo el acople entre el campo de salinidades y de velocidades a través del gradiente horizontal de densidad. Este modelo ha sido aplicado exitosamente para estudiar flujos costeros y flujos en estuarios, como en la Bahía de San Francisco, en New York Harbor, en la Bahía Galveston, en las aguas costeras de Sydney, en el Río St. Lawrence y en las aguas costeras de Hong Kong (Warner, J. C. 2000). Como en el IMFIA se trabaja con los modelos del tipo RMA hace varios años, para la implementación del modelo RMA-10 se tomaron en cuenta varios resultados y procedimientos ya realizados. En este capítulo se describen las características principales de la implementación del modelo numérico RMA-10 en el Río de la Plata.

6.1 - Malla de cálculo

La malla de cálculo bidimensional utilizada en este trabajo de modelación fue definida y generada en etapas anteriores al mismo, durante otros trabajos de modelación del Río de la Plata realizados en el IMFIA.

El dominio de cálculo utilizado se extiende desde Mar del Plata al Sur, La Paloma al Este y los ríos Paraná y Uruguay al Oeste. La malla en elementos finitos se estructuró sobre la base de un sistema coordenado Este-Oeste y Norte-Sur, a partir de los contornos y de los datos batimétricos digitalizados.

En la Figura 6.1(a) se muestra la malla de cálculo global utilizada en este trabajo, denominada de baja resolución, superpuesta a un plano del Río de la Plata para observar la correcta representación del mismo. Esta malla está formada por elementos cuadrangulares de aproximadamente 30 Km de lado en la frontera oceánica y 3 Km en la zona próxima a Montevideo. Esta malla está formada por 1.630 elementos y 5.113 nodos. En la Figura 6.1(b) se observa un detalle de la malla en la zona estuarina del Río de la Plata donde se observan los nodos de esquina e intermedios además de los elementos cuadrangulares de la grilla.

En el Anexo 2 se presenta la descripción de otra malla de cálculo bidimensional de mayor resolución con la cual se realizaron algunas simulaciones.

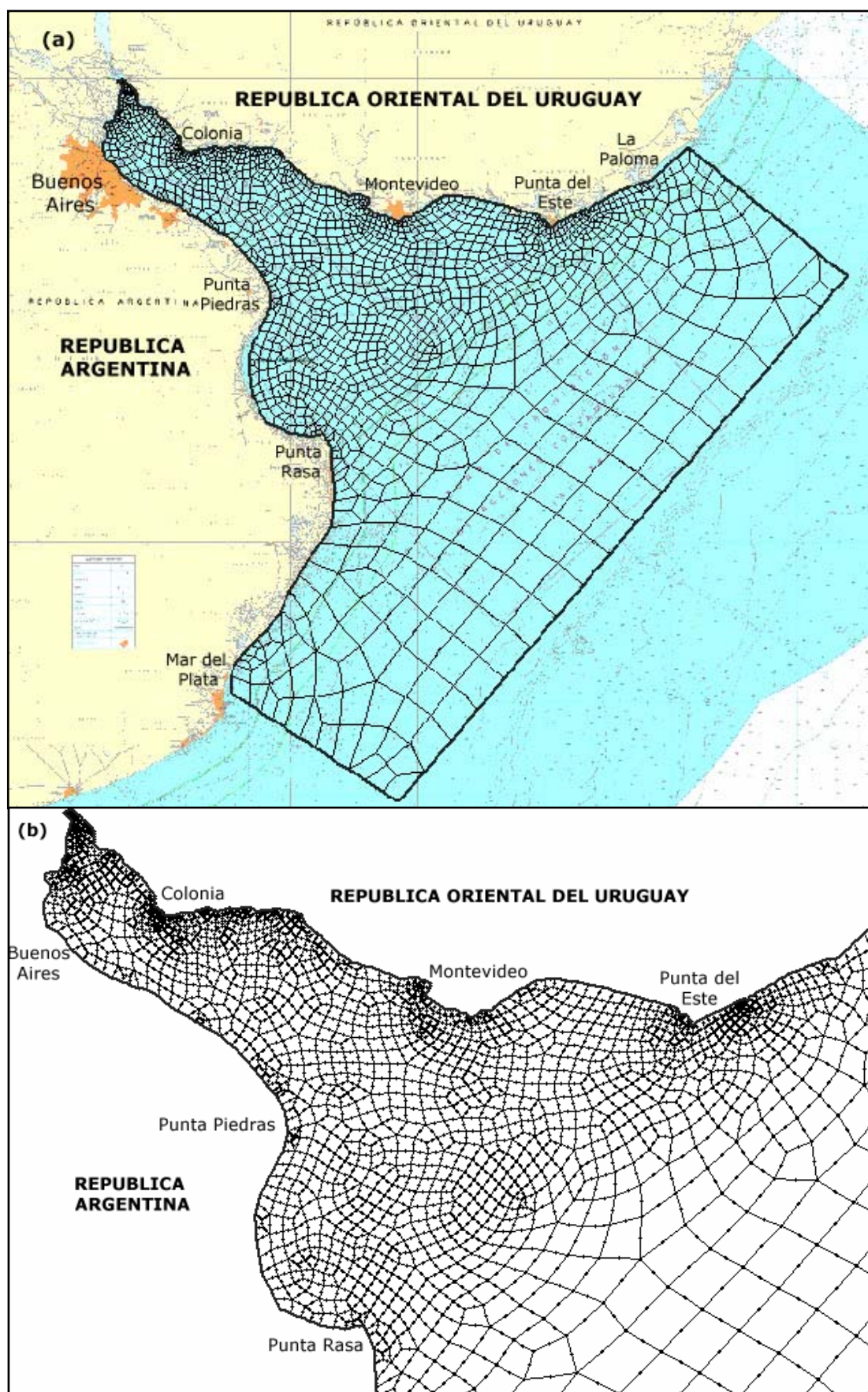


Figura 6.1: (a) Malla en elementos finitos de baja resolución utilizada en la modelación del Río de la Plata. (b) Detalle de la malla en la zona central estuarina.

En la Figura 6.1(a) se observa que los límites del dominio de cálculo en la frontera oceánica se ubicaron normales a la costa desde Mar del Plata en la frontera Sur y un poco más al Norte de La Paloma por la frontera Norte. De esta forma la frontera abierta se sitúa aproximadamente en forma paralela a la línea Punta Rasa – Punta del Este y la frontera Sur se posiciona de tal manera que la principal componente de marea M_2 ingresa al dominio de cálculo prácticamente con su frente de onda paralelo a la frontera. Esta condición de ingreso de la onda es favorable para la modelación según estudios anteriores realizados en el IMFIA.

6.2 - Información básica

La información básica utilizada durante la implementación del modelo y otras etapas posteriores de la modelación, como ser calibración y verificación, a sido recopilada durante el desarrollo del proyecto Freplata y de otros estudios vinculados al Río de la Plata realizados en el IMFIA. Esta información refiere a profundidades, elevación de la superficie libre, caudales fluviales y vientos en la zona del Río de la Plata.

6.2.1 - Batimetría

La batimetría se confeccionó a partir de información cartográfica correspondiente a las cartas náuticas confeccionadas por el Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA) para el Río de la Plata y la plataforma continental, cartas Nº 1 y 40. Toda la información de profundidades recopilada tiene el mismo nivel de referencia, el Cero Wharton, razón por la cual no fue necesaria ninguna reducción adicional. Esta información convenientemente digitalizada constituye los archivos de base para la generación de la batimetría en la malla discreta sobre la cual trabaja el modelo.

En la Figura 6.2 se presenta la batimetría del área modelada ingresada al modelo para la malla de baja resolución. Se observa en la misma que mientras en la zona de plataforma continental las profundidades son mayores a 140 metros, en la zona costera las mismas se reducen a cero. Al comparar la Figura 6.2 con la Figura 2.4 presentada en el Capítulo 2 se observa que se representan en el modelo las principales características morfológicas del Río de la Plata, como Playa Honda, la Barra del Indio, los Bancos Inglés y Arquímedes, el Canal Oriental, etc.

6.2.2 - Niveles

La información de niveles en el Río de la Plata fue recopilada a través del Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA), del Servicio de Hidrografía Naval Argentino (SHN) y de la Dirección Nacional de Hidrografía (DNH), y corresponde a registros horarios de nivel de agua en las siguientes estaciones mareográficas:

- La Paloma
- Punta del Este

- Montevideo
- Colonia
- Buenos Aires
- Torre Oyarvide
- Pinamar
- Mar del Plata

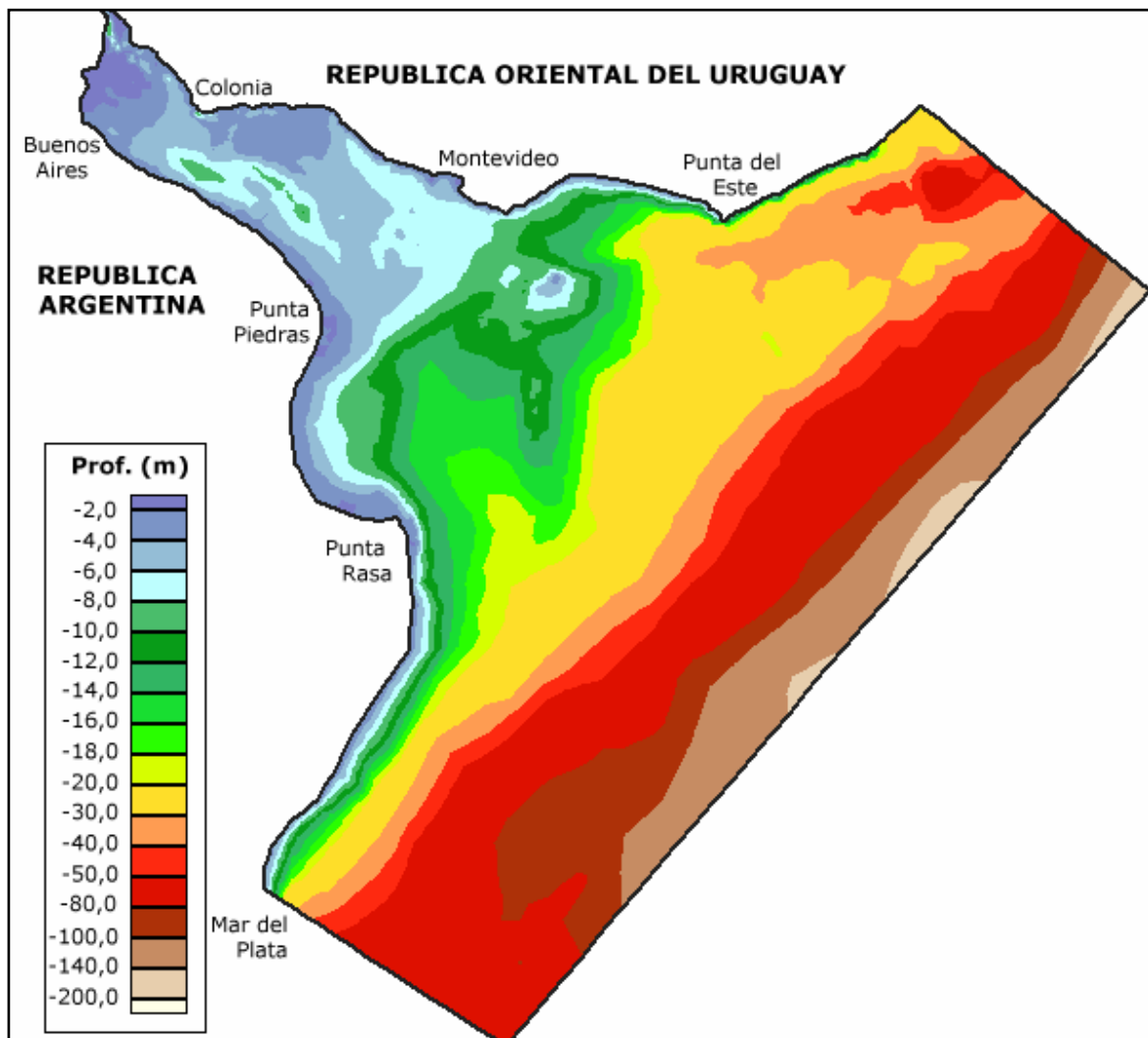


Figura 6.2: Batimetría del área modelada ingresada al modelo.

6.2.3 - Caudales

La información de caudales de los ríos Paraná y Uruguay fue recopilada a través del Instituto Nacional de Agua Argentino (INA). La información disponible consiste en valores medios mensuales de descarga de ambos ríos.

6.2.4 - Vientos

La información de vientos utilizada corresponde a valores medidos de viento en las estaciones de medición de Pontón Recalada y Punta Brava. En el caso de Pontón Recalada se utilizaron las medidas de dirección e intensidad del viento registradas cada tres horas a partir de 1997. En otros casos se utilizaron para las modelaciones los vientos registrados cada una hora o cada tres horas, dependiendo del período seleccionado, en la estación meteorológica Punta Brava de la Dirección Nacional de Meteorología ubicada en la costa de Montevideo. En el Capítulo 3 se presentó la ubicación de las dos estaciones de medición, así como también un análisis de los vientos registrados en las mismas.

6.3 - Condiciones de borde

6.3.1 - Caudal fluvial

Como se mencionó anteriormente, por la frontera Oeste del Río de la Plata ingresa el caudal de aporte de los ríos Paraná y Uruguay. Esta condición de borde se impone al modelo como un ingreso de caudal a través de las secciones correspondientes a los ríos, las cuales se definen como líneas de continuidad en la malla. Se impuso un ingreso del caudal perpendicular a la frontera y un valor de salinidad cero por tratarse de un ingreso de agua dulce.

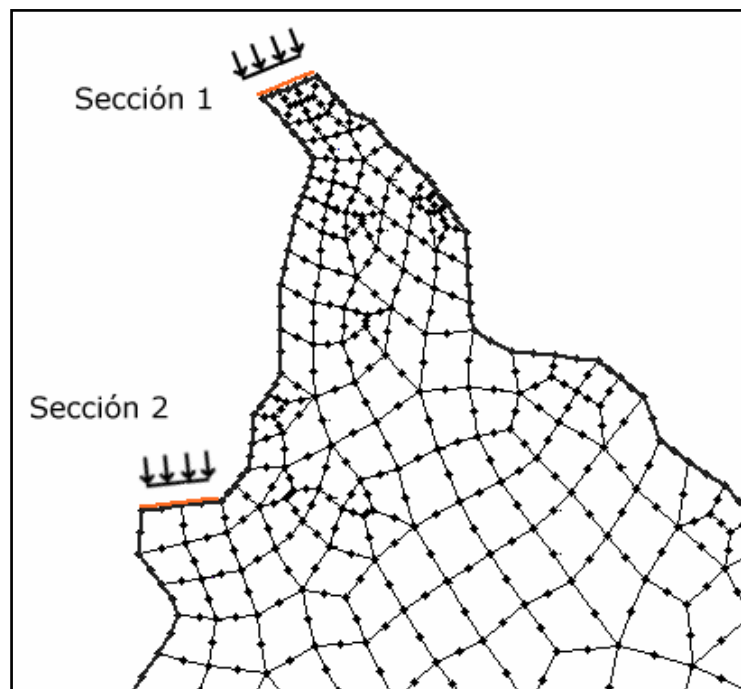


Figura 6.3: Esquema de las secciones de la malla correspondientes al ingreso del caudal de los ríos Paraná y Uruguay.

En la Figura 6.3 se muestran las dos secciones de aporte de caudal definidas para la malla utilizada. La sección 1 corresponde al ingreso de los ríos Uruguay y Paraná-Guazú, mientras que la

sección 2 corresponde al ingreso del caudal del río Paraná Las Palmas. Como se mencionó en 6.2.3, los datos de caudal fluvial corresponden a valores medios mensuales del río Uruguay y del río Paraná en su totalidad. Por lo tanto, para ingresar al modelo se debe dividir el caudal del río Paraná y se realiza esta división de la siguiente forma: un 73% del caudal del río Paraná corresponde al río Paraná Guazú y el 27% corresponde al río Paraná Las Palmas.

El ingreso de caudal puede especificarse como un valor constante a lo largo del período de simulación o como una serie temporal variable a lo largo del tiempo. Por otro lado, el modelo interpola linealmente a partir de valores de caudal correspondientes a diferentes momentos y calcula de ésta forma un valor de caudal para cada instante de tiempo. Esta opción fue la más utilizada en las modelaciones utilizando el dato de caudal medio mensual como el valor de caudal correspondiente al día 15 de cada mes.

6.3.2 - Elevación de la superficie libre

En la frontera oceánica se debe especificar la elevación de la superficie libre y el valor de salinidad a lo largo de la misma. La elevación de la superficie libre puede imponerse como un valor constante en todo el período de simulación o puede especificarse como una serie temporal de nivel variable. La condición de borde oceánica seleccionada para la salinidad fue un valor constante a lo largo de todo el período de simulación.

Dependiendo de las condiciones que se quieren representar en cada simulación, el nivel impuesto en la frontera oceánica se calcula diferente:

- Cuando se realiza la simulación considerando como uno de los forzantes la marea astronómica, ésta se representa en el modelo a partir de la condición de borde de nivel en la frontera oceánica. En ocho nodos distribuidos en la frontera oceánica (Figura 6.4) se calculan las series temporales de niveles correspondientes a la marea astronómica a partir de la superposición de las componentes armónicas principales de la marea, M_2 , O_1 , Q_1 , N_2 y S_2 para el período de tiempo seleccionado. El modelo en cada paso de tiempo calcula los niveles en el resto de los nodos de la frontera oceánica interpolando linealmente a partir de los niveles ingresados. Se tiene con esto un valor de nivel impuesto en ésta frontera para cada paso de tiempo, es decir, variable temporalmente.
- Cuando se considera la marea real como uno de los forzantes del modelo, también se utiliza la condición de borde de nivel en la frontera oceánica para representarla, siendo necesarias en este caso las series de registros reales de niveles en Mar del Plata y en La Paloma. Estas series de niveles se ingresan al modelo como condiciones de borde de nivel en los dos nodos correspondientes a dichas ubicaciones, nodos 1 y 8, respectivamente según la Figura 6.4. Es importante aclarar que el nodo 8 no representa exactamente la ubicación de La Paloma, pero por la cercanía entre la frontera y dicha estación mareográfica se utilizan los datos de La Paloma como representativos de ese

nodo frontera. Por otro lado se calculan los niveles correspondientes a la marea astronómica del mismo período en los ocho nodos de la frontera oceánica. Para los nodos correspondientes a Mar del Plata y La Paloma se calcula la diferencia entre los niveles medidos y los niveles astronómicos, obteniéndose así la serie de niveles residuales en estos dos puntos. A partir de éstas series de niveles residuales se calcula la serie de niveles residuales en los seis nodos restantes de la frontera, que posteriormente se suman a la componente astronómica. Por último el modelo distribuye linealmente los niveles reales de los ocho nodos a lo largo de todos los nodos de la frontera oceánica.

En ambos casos se ingresan al modelo las series de niveles en los ocho nodos de la frontera seleccionados. Las ubicaciones de los mismos se determinaron en estudios previos realizados en el IMFIA en donde se analizó como representar el ingreso de la marea real y astronómica en el dominio de cálculo.

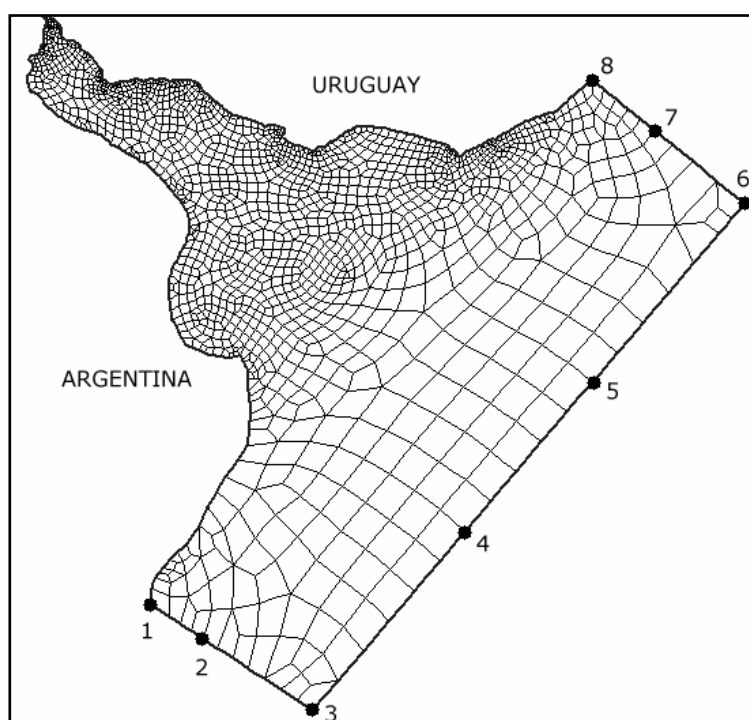


Figura 6.4: Ubicación de los nodos de la frontera oceánica en donde se ingresan las series temporales de elevación de la superficie libre como condición de borde.

6.3.3 - Tensión de corte por viento

Cuando en las simulaciones se considera como forzante del sistema al viento, se ingresa el mismo como un valor de fuerza externa que ejerce una tensión sobre la superficie libre. El viento puede simularse constante a lo largo del período de simulación o variable según el paso de tiempo, siendo necesaria la especificación en este caso del vector viento en cada instante de la simulación. A partir de los datos de viento el modelo impone como condición de borde una tensión por efecto del viento a través de la ecuación 4.35 presentada en el Capítulo 4.

En todas las simulaciones realizadas en este trabajo el viento se considera uniforme en el Río de la Plata, por lo que se ingresa un único valor de viento para todo el dominio. Pero también el modelo permite realizar simulaciones considerando vientos distribuidos no uniformemente en el espacio. En esos casos el modelo distribuye linealmente el campo de vientos en todo el dominio a partir de las series temporales del vector viento definidas en varios nodos de la malla. El principal problema es obtener series temporales de vientos en varias zonas del río durante un mismo período de tiempo. Debido a esto, no fue posible utilizar esta opción en las modelaciones realizadas.

6.4 - Condición inicial

Además de las condiciones de borde el modelo requiere la especificación de una condición inicial para las variables del sistema, que son el nivel de la superficie libre, las velocidades y 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. Para el campo de velocidades la condición inicial es el reposo.

En cuanto a la condición inicial de salinidad, la situación es más compleja. Es lógico pensar que en la frontera oceánica los valores de salinidad que se deben imponer sean valores cercanos a la salinidad en los océanos y que en la zona de descarga fluvial se deben imponer valores de salinidad cero, es decir agua dulce. El problema en este caso se presenta en la representación inicial de la zona de mezcla y se plantearon dos opciones distintas para resolverlo.

La primera opción fue imponer un valor alto de salinidad en todo el Río de la Plata. Es decir, imponer en todos los nodos del dominio un valor de salinidad igual a la salinidad en la frontera oceánica en el tiempo inicial. A partir de esa situación se modela la evolución de la descarga fluvial y por lo tanto la formación de la zona de mezcla. Al iniciar la simulación, el frente salino se desplaza hacia el exterior del Río de la Plata hasta que se establece una situación de régimen. La dificultad que se tuvo en este caso es que el desplazamiento del frente salino hasta una posición real implica la simulación de varios meses dependiendo del caudal descargado. De esta forma las simulaciones se vuelven demasiado largas y computacionalmente costosas.

La segunda opción planteada fue considerar directamente como condición inicial de la variable salinidad una situación más cercana a la realidad, buscando representar la variación de salinidad que se observa en la zona central del río. Para esto se realiza una simulación inicial en donde solamente se resuelve la ecuación de advección difusión de sal, considerando solo la difusión, esto es, sin velocidades en el dominio de cálculo. De esta forma, a partir de las condiciones de borde de salinidad apropiadas, es posible obtener una distribución inicial de salinidad más cercana a la real que la primera.

En la Figura 6.5 se observa la condición inicial resultante de esta corrida previa que además tiene la ventaja de ser corta y fácil de rehacer según la situación. Se observan las dos líneas de igual concentración impuestas, por un lado la línea con salinidad cero y por el otro la línea con

salinidad oceánica, así como también el gradiente de salinidades resultante alrededor de la línea Punta Piedras Montevideo.

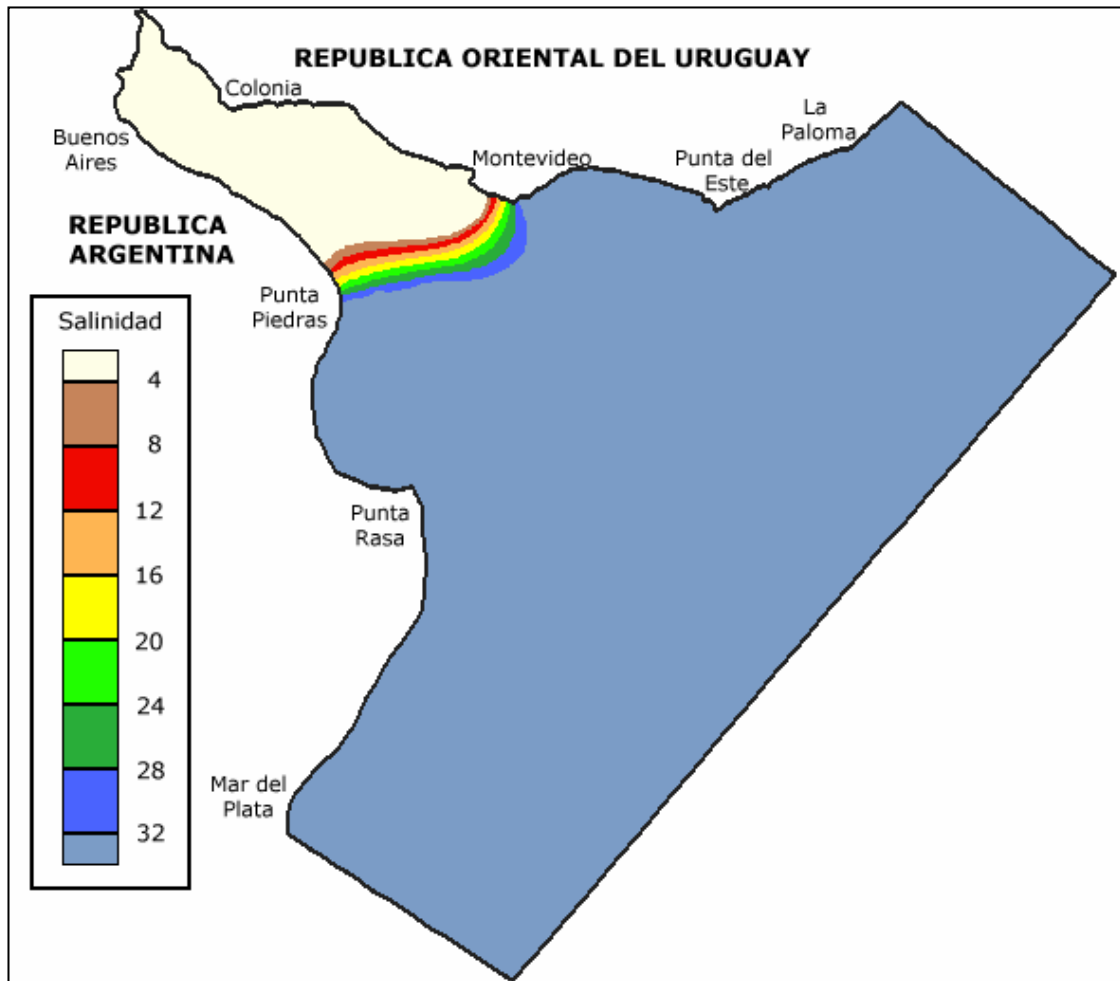


Figura 6.5: Condición inicial de salinidad en el dominio de cálculo.

6.5 - Simulación de prueba

En esta etapa de implementación del modelo se realizaron varios tipos de simulaciones para observar la influencia de los distintos forzantes sobre el campo salino en el Río de la Plata. De esta forma se utilizó el modelo como herramienta de estudio para conocer el comportamiento del campo salino frente a distintas situaciones. La mayoría de las situaciones modeladas no son representativas de situaciones reales, por lo que esta primera etapa no pretende ser un ajuste de la realidad.

En los casos que se describen a continuación se utilizó la malla global de baja resolución presentada en 6.1. El paso de tiempo fue de 30 minutos y el valor de salinidad oceánico impuesto como condición de borde en la frontera correspondiente fue de 34 ppm. Este análisis cualitativo del campo salino se realizó considerando diferentes casos. En el primer caso se consideró el aporte de los ríos Paraná y Uruguay como el único forzante del sistema. En segundo lugar se agregó el efecto

de la marea astronómica, y por último se agregó también el efecto del viento. Para analizar los resultados de las modelaciones se estudió la variación temporal de la salinidad en varios puntos del Río de la Plata, representativos de diferentes zonas del mismo. Los puntos seleccionados son representativos de las zonas cercanas a: Punta del Este, Montevideo, Punta Piedras, Bahía de Samborombón, Punta Rasa y la zona central del río. La ubicación de los puntos en la malla de cálculo y los correspondientes nodos se muestran en la Figura 6.6.

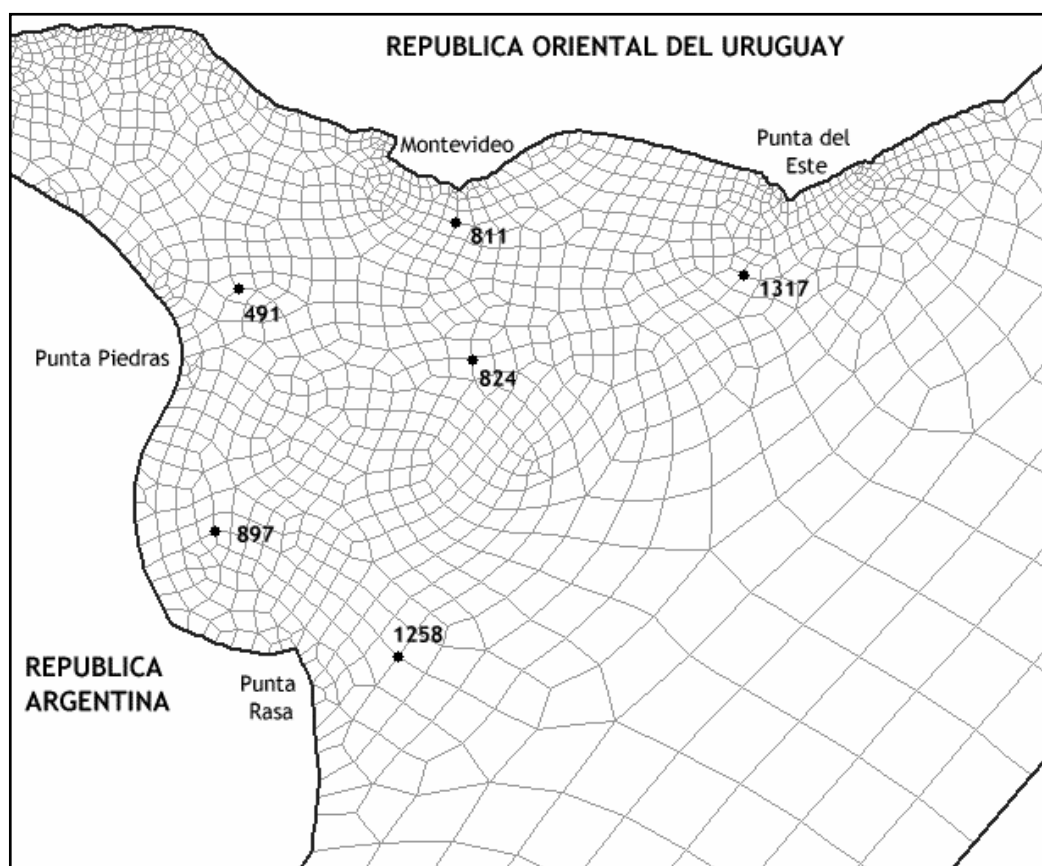


Figura 6.6: Ubicación de los seis puntos de análisis.

La modelación se inició a partir de las condiciones iniciales presentadas en 6.4. El período total de tiempo simulado fue de 200 días. El caudal fluvial aportado por los ríos Paraná y Uruguay se mantuvo constante durante todo el período de modelación, igual al valor determinado en el Capítulo 3 como el caudal fluvial medio, $24.000 \text{ m}^3/\text{s}$. La marea astronómica se representó a partir de los niveles astronómicos calculados a partir de las cinco componentes armónicas principales M_2 , O_1 , Q_1 , N_2 y S_2 y se incluyó su efecto en el modelo luego de 120 días de simulación, suficientes para estabilizar el sistema solo con caudal fluvial. El efecto del viento se incluyó luego de 40 días de simulación con marea astronómica y caudal fluvial. Se utilizaron 40 días de registros de viento medidos en Punta Brava para observar la variación temporal de la salinidad por el efecto del caudal, marea y viento.

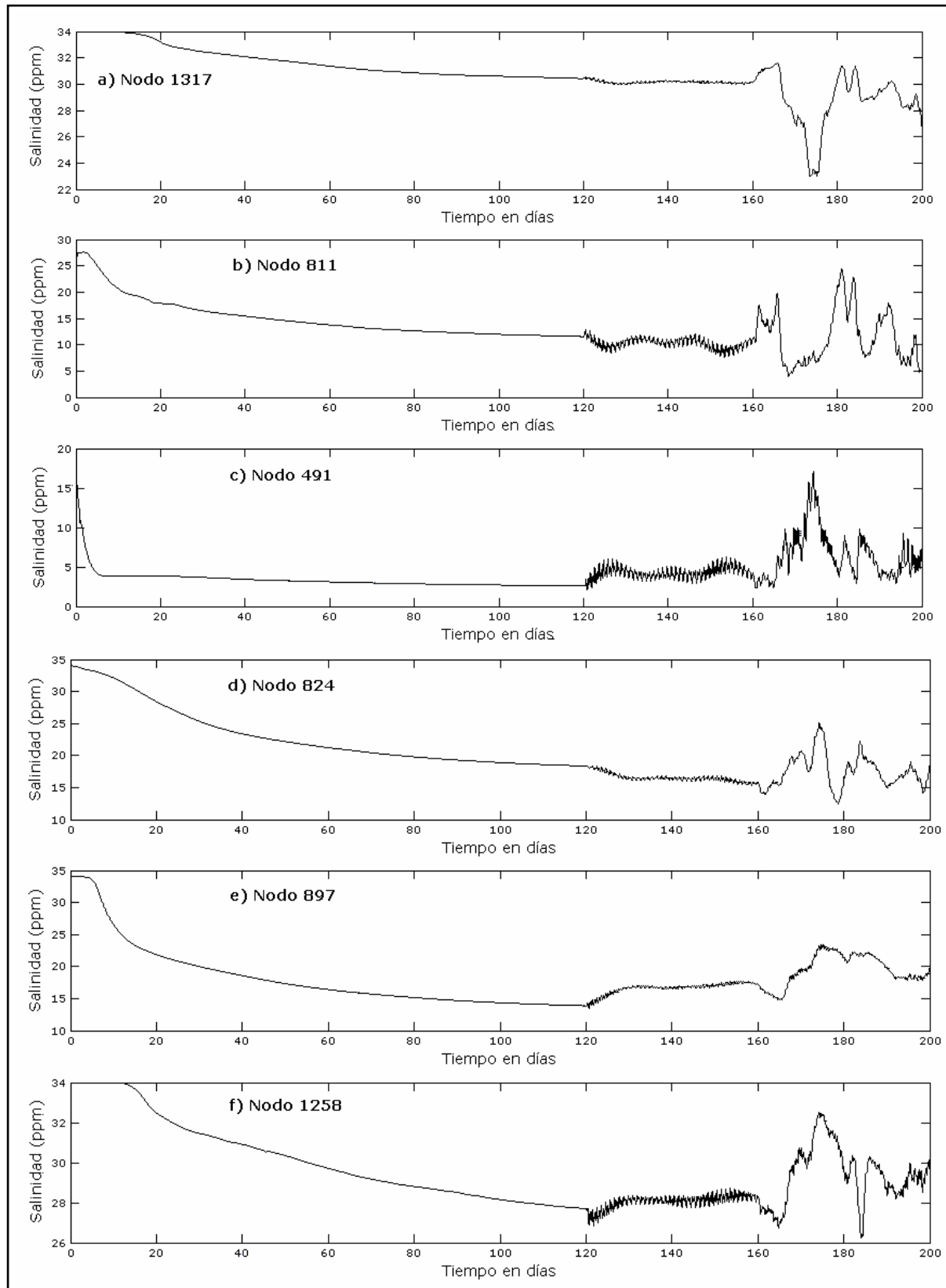


Figura 6.7: Evolución temporal de la salinidad durante todo el período de simulación en los puntos representativos de (a) Punta del Este, (b) Montevideo, (c) Punta Piedras, (d) Bahía de Samborombón, (e) Punta Rasa (f) zona central del río.

En la Figura 6.7 se muestra la variación temporal de la salinidad durante los 200 días simulados en los seis nodos ubicados en el Río de la Plata. Se observa en la misma que el comportamiento de la variación temporal de la salinidad es diferente en función de los diferentes forzantes utilizados. Inicialmente la salinidad en cada punto se modifica rápidamente y luego durante los primeros 120 días se observa una variación de salinidad decreciente a medida que transcurre la modelación. En el segundo período de tiempo, los 40 días donde se agrega la marea astronómica, se observa una respuesta oscilatoria de la salinidad, cuya amplitud depende de la zona del río donde está ubicado el nodo. Finalmente los últimos 40 días el efecto del viento modifica abruptamente la salinidad en cada punto, lo que muestra una gran influencia del viento.

Esta simulación de prueba nos permite conocer la variación temporal de la salinidad en un punto frente a distintos forzantes. Observamos que el caudal fluvial posiciona el campo salino de determinada manera en función de su magnitud y variación; la marea astronómica introduce una oscilación en el campo salino aproximadamente alrededor de la situación sin marea; por último el efecto del viento introduce grandes fluctuaciones de la salinidad en función de la magnitud y dirección del mismo. Con esto hemos verificado que la variación de salinidad en el Río de la Plata podría llegar a reproducirse considerando el efecto de éstos tres principales forzantes.

6.6 - Análisis del período de modelación previo

Antes de iniciar la calibración del modelo, fue necesaria la determinación del tiempo mínimo necesario para que los resultados del modelo sean independientes de la condición inicial utilizada, explicada en 6.4. Es necesario tener la certeza de que los resultados obtenidos a través de las diferentes simulaciones no dependan de la condición inicial elegida para la salinidad, de forma de poder extender los resultados obtenidos a otros casos diferentes. Para realizar esta determinación, es importante tener en cuenta que el campo de salinidad en el Río de la Plata tiene comportamientos diferentes según cuales sean los forzantes considerados en la modelación (ver 6.5). Es importante entonces en función de los forzantes y del tipo de simulación que se realice, conocer qué período real debe modelarse para obtener el resultado esperado, con la garantía de que la situación inicial numérica no haya sido determinante en los resultados.

Desde el punto de vista de la salinidad, se explicó en 6.4 la forma de disminuir el efecto transitorio del desarrollo del frente salino para disminuir el tiempo de cálculo de la condición inicial en cada modelación. Sin embargo, esto no es suficiente para asegurar una solución independiente de la condición inicial tomada para la distribución espacial de la salinidad. El objetivo de este estudio es determinar el tiempo de modelación que se requiere para que los valores obtenidos durante el período que se quiere reproducir sean independientes de los estos valores iniciales ficticios. Para esto se realizaron varias pruebas con las cuales se estudió la influencia del tiempo previo de simulación en los resultados finales.

6.6.1 - Pruebas realizadas

Para determinar el período mínimo de modelación necesario para independizarse de la condición inicial se tomó el mes de febrero de 1998 como mes de referencia y se hicieron varias pruebas variando la cantidad de tiempo previo simulado. El procedimiento consistió en ir aumentando el tiempo previo de simulación hasta que los valores de salinidad finales obtenidos con dos pruebas diferentes fueran iguales. En ese caso se podría afirmar que los resultados obtenidos son independientes de la condición inicial impuesta.

Estas simulaciones de prueba se realizaron utilizando la malla de baja resolución. Todas las simulaciones fueron realizadas considerando la variación en el tiempo del caudal fluvial, de la marea astronómica y del viento, correspondientes al período seleccionado. Las simulaciones realizadas fueron:

- 1) Modelación del mes de febrero de 1998.
- 2) Modelación de los meses de enero y febrero de 1998.
- 3) Modelación de los meses de diciembre de 1997 y enero y febrero de 1998.
- 4) Modelación de los meses de noviembre y diciembre de 1997 y enero y febrero de 1998.

Para cada una de las pruebas mencionadas, se compararon los valores de salinidad durante la última semana del mes de febrero de 1998 en cuatro puntos de control. En la Figura 6.8 se observa la posición de los mismos. Sobre la costa uruguaya hay un punto de control ubicado cerca de Punta del Este y otro cercano a Montevideo; sobre la costa argentina se ubican en la zona de Punta Piedras y en la Bahía de Samborombón.

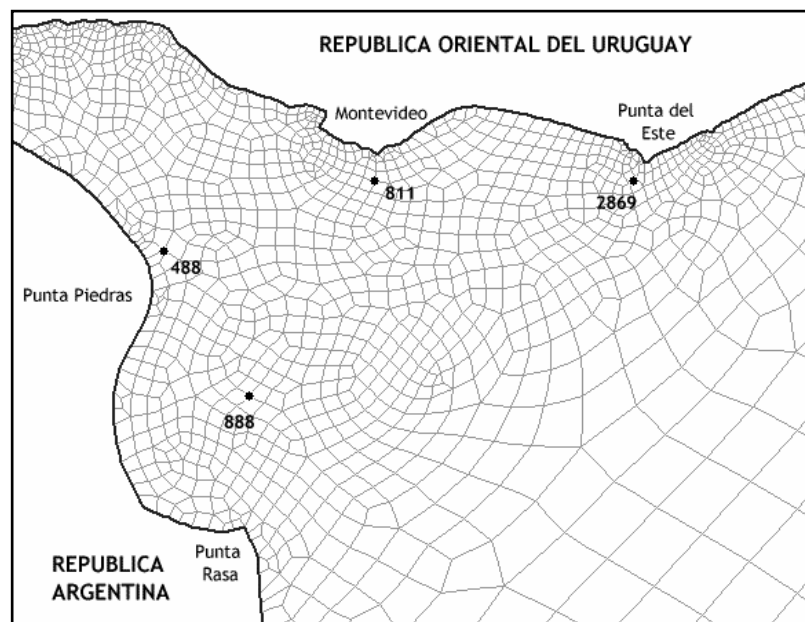


Figura 6.8: Ubicación de los cuatro puntos de control utilizados en el análisis del período de modelación previo.

El objetivo de esta comparación fue evaluar la diferencia que hay entre los valores de salinidad en cada zona del río según la cantidad de tiempo previo de simulación. Analizando estos resultados se evaluó la influencia de los valores iniciales en los resultados finales.

6.6.2 - Resultados obtenidos

En la Figura 6.9 se presenta la variación temporal de la salinidad durante la última semana de febrero de 1998, en las cuatro simulaciones mencionadas anteriormente, en los cuatro nodos considerados.

En los cuatro puntos de control se observan diferencias en los valores de salinidad durante este período seleccionado. Sin embargo, las máximas diferencias se observan en los nodos 2869 y 888, ubicados cerca de Punta del Este y en la Bahía de Samborombón, respectivamente. En todos los puntos de control la mayor diferencia de salinidades modeladas se obtiene entre las pruebas 1 y 2, lo cual es razonable ya que en la prueba 1 solamente se modelan 20 días previos al período de comparación, mientras que en la prueba 2 se modelan aproximadamente 50 días. Las diferencias promedio en los siete días entre estas dos pruebas fueron 3,2 en Punta del Este, 1,83 en Montevideo, 0,27 en Punta Piedras y 10,6 en la Bahía Samborombón. Las diferencias disminuyen entre las pruebas 2 y 3, es decir, entre modelar 50 días previos o casi tres meses previos (80 días). En el caso de Punta del Este la diferencia promedio en este caso es 2,6; en Montevideo 0,3; en Punta Piedras 0,07 y en la Bahía de Samborombón 3,01. Esto significa que aunque las diferencias obtenidas entre las dos simulaciones son menores que las diferencias obtenidas entre las simulaciones 1 y 2, existen aún diferencias promedio de 3 ppm en algunas zonas del río que indican una afectación de la condición inicial. Hace falta entonces aumentar el tiempo previo de simulación. Por último entre las simulaciones con casi tres meses previos y casi cuatro meses previos, los resultados obtenidos son similares aunque existen diferencias en algunos casos. En Punta del Este la diferencia promedio entre los valores de salinidad simulados es de 1,7 y en la Bahía de Samborombón es 1,4. En Montevideo y Punta Piedras en cambio las diferencias son 0,1 y 0,04 respectivamente.

Según los resultados obtenidos, la diferencia en la salinidad obtenida modelando un determinado período de tiempo considerando 80 días de modelación previa (prueba 3) y considerando 110 días de modelación previa (prueba 4), no es significativa. Sin embargo, la diferencia entre modelar con 80 días previos y 50 días; o entre 20 y 50 días si son importantes. Teniendo en cuenta además que en Montevideo la solución obtenida es casi la misma, y que las diferencias en las otras zonas del río no son mayores a 2 ppm, se considera suficiente la condición de modelación previa de tres meses para considerar los resultados independientes de la condición inicial.

Por otro lado se analizó la importancia de incluir el efecto del viento en las modelaciones previas. Para esto se eliminó el viento en el primer mes de la prueba 3 y en el primer mes de

modelación de la prueba 2. Los resultados muestran que considerar o no el viento en los primeros 30 días de 80 días previos de simulación, o durante los primeros 30 días de 50 días de simulación previa no genera resultados diferentes en la salinidad en los cuatro puntos de control. Debido a esto se considera necesaria la modelación de tres meses previos pero el efecto del viento es importante solamente en los 20 días previos al período que se quiere modelar.

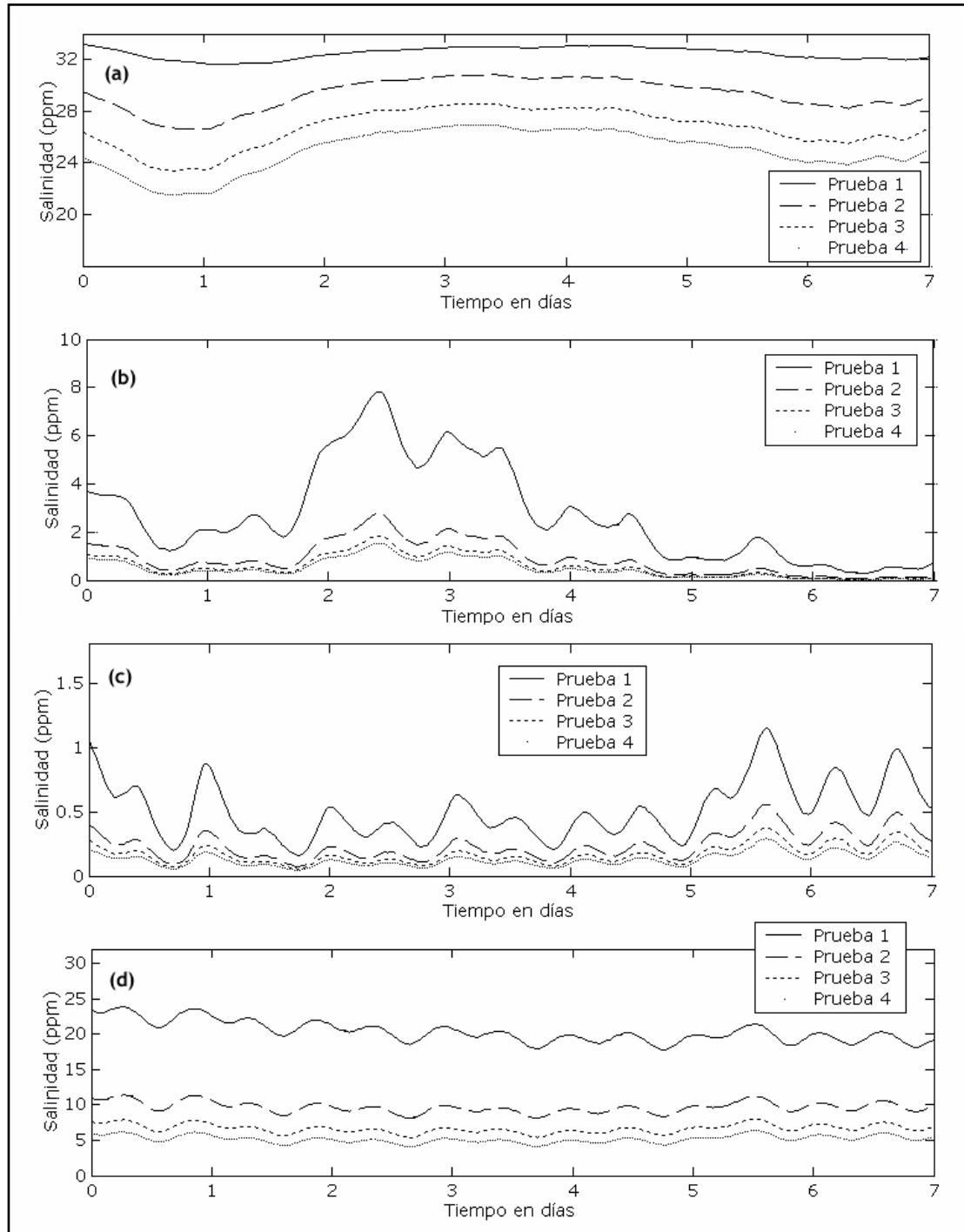


Figura 6.9: Variación temporal de salinidad durante las cuatro pruebas realizadas en (a) costa de Punta del Este (b) cerca de Montevideo (c) zona de Punta Piedras y (d) Bahía de Samborombón.

Capítulo 7

CALIBRACION DEL CAMPO SALINO

En este capítulo se presenta el procedimiento realizado y los resultados obtenidos durante la etapa de calibración del campo salino en el Río de la Plata utilizando el modelo RMA-10 en su modo bidimensional integrado en vertical. De esta forma, se considera una hipótesis de trabajo en la cual se supone que las variaciones en el plano horizontal del campo salino son más importantes que las variaciones verticales del mismo, lo que lleva a considerar una modelación bidimensional como aceptable. Muchas críticas pueden hacerse respecto a esta hipótesis, pero considerando la gran variedad de planteos técnicos en referencia al grado de estratificación salina vertical en la zona estuarina del río (Capítulo 2); la diversidad de resultados obtenidos a través de las mediciones de campo (Capítulo 3); y teniendo en cuenta que las mediciones de salinidad con las que se cuenta son insuficientes para ajustar un perfil vertical de salinidad, se considera aceptable realizar una modelación bidimensional del Río de la Plata como una primera etapa de trabajo, teniendo como objetivo principal alcanzar en otros estudios posteriores una representación tridimensional del campo salino y en definitiva del campo de velocidades.

7.1 - Características generales de la calibración

Como se mencionó anteriormente, desde hace varios años que se trabaja en el IMFIA con el conjunto de modelos numéricos RMA. En trabajos anteriores, el modelo en elementos finitos hidrodinámico bidimensional RMA-2 ha sido calibrado considerando un fluido homogéneo. En dicho proceso se determinó un coeficiente de rugosidad de fondo para todo el dominio de cálculo a partir de la comparación de niveles modelados y medidos en varios puntos costeros, considerando tanto la marea astronómica como la marea real. Se ajustaron también los coeficientes de viscosidad turbulenta horizontal, ajustando las corrientes modeladas con las corrientes medidas en la zona cercana a Montevideo. Una de las mallas utilizadas durante ese proceso es la malla presentada en 6.1. Este trabajo de modelación, anterior a este estudio, se tomó como punto de partida para estudiar el campo de salinidades en el Río de la Plata. Como se utilizó la misma malla de cálculo, el coeficiente de rugosidad obtenido para el modelo RMA-2 y los coeficientes horizontales de viscosidad se mantuvieron al trabajar con el modelo RMA-10, verificando que se mantuviera el ajuste de niveles obtenido.

A efectos de poder reproducir adecuadamente las características del campo de salinidad del Río de la Plata en distintas situaciones es necesario calibrar el modelo, lo cual implica ajustar los coeficientes del mismo. Durante la etapa de calibración del modelo RMA-10 se determinaron los factores de escala aplicados a los parámetros de difusión turbulenta del modelo (ver 4.10) y el coeficiente ψ que interviene en la formulación de la tensión del viento aplicada a la superficie de

agua (ver 4.8.1). El proceso de calibración finaliza cuando el modelo representa aceptablemente los valores medidos de salinidad y en ese caso ambos parámetros quedan determinados.

El proceso de calibración se realizó ajustando los parámetros a partir de la comparación entre valores modelados y medidos de salinidad. La mayor serie de datos de salinidad con la que se cuenta son las mediciones realizadas en varios puntos de la costa de Montevideo por la Intendencia Municipal de dicha ciudad. En 3.3 se presentó una descripción de las series de datos y un análisis estadístico de las mismas. Por otro lado se utilizaron también registros diarios de salinidad medidos en Punta Brava en Montevideo por el Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA). A partir de dicha serie de datos se seleccionaron dos períodos representativos de distintas situaciones para realizar la calibración.

Para realizar esta comparación entre los resultados del modelo y los registros reales de salinidad, se definieron cinco puntos de control ubicados sobre la costa de Montevideo pues solamente en dicha zona se tiene una cantidad suficiente de registros reales. Los puntos de control utilizados son ubicaciones representativas de la escollera Sarandí, playa Ramírez, Punta Brava, playa Pocitos y playa Verde. La calibración del modelo se llevó a cabo utilizando la malla de baja resolución presentada en 6.1 y en la Figura 7.1 se muestran los nodos representativos de dichas ubicaciones en dicha malla.

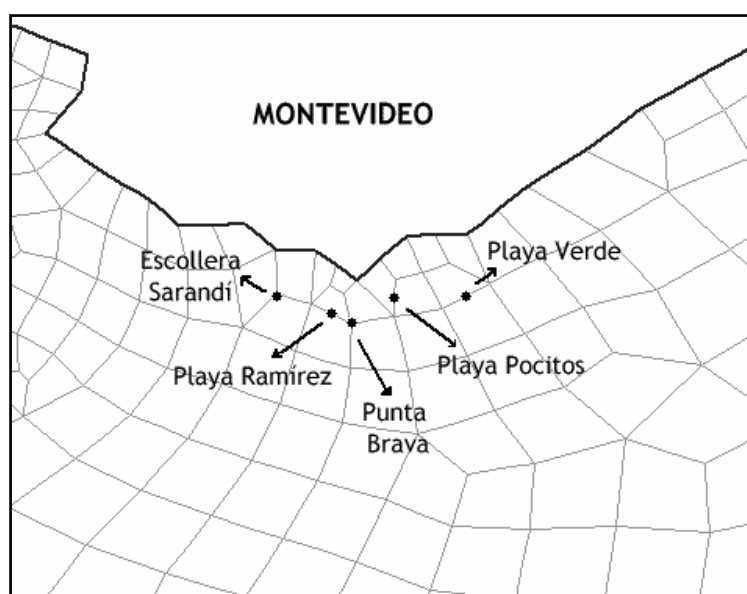


Figura 7.1: Ubicación de los puntos de control de salinidad en la malla de cálculo.

La calibración del modelo puede dividirse en dos calibraciones, ya que los parámetros se ajustaron considerando por un lado los vientos registrados en Punta Brava en Montevideo, y por otro lado los vientos registrados en Pontón Recalada. Como se mostró en 3.5 estas series de mediciones presentan características muy distintas, por lo que fueron necesarios parámetros de calibración diferentes para cada uno. De esta forma se obtuvieron dos versiones del modelo y se

tienen dos opciones a la hora de buscar los datos de vientos para representar determinado período. Como se observará en este capítulo, los resultados obtenidos son diferentes en ambos casos, y aunque los vientos de Pontón Recalada son más representativos del Río de la Plata por su ubicación, la utilización de los vientos de Punta Brava puede ser importante en determinadas situaciones.

Debido a que las condiciones hidrodinámicas fueron modificadas durante este proceso de calibración pues se modificaron algunos parámetros, los niveles de la superficie libre fueron controlados nuevamente. Este control se realizó comparando los niveles registrados y los niveles calculados con el modelo en cada simulación. Los puntos de control fueron ubicaciones representativas de las siguientes estaciones mareográficas costeras: La Paloma, Punta del Este, Montevideo, Colonia, Buenos Aires y Torre Oyarvide. La ubicación de los mismos en la malla de cálculo se presenta en la Figura 7.2. De esta forma el resultado obtenido garantiza una buena representación del campo salino y una buena representación de las variables hidrodinámicas del sistema.

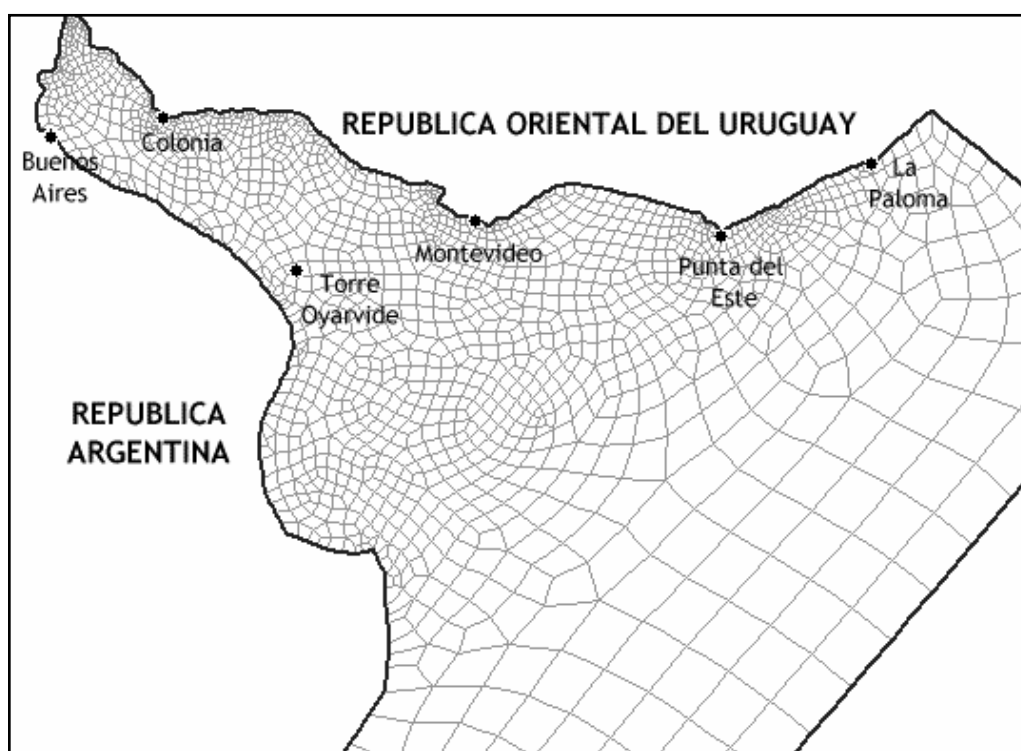


Figura 7.2: Ubicación de los puntos de control de niveles en la malla de cálculo.

7.2 - Definición de los escenarios de calibración

Como se mencionó en 3.3, los registros de salinidad muestran una gran variabilidad del campo salino en la zona cercana a Montevideo y una gran variabilidad del mismo a lo largo del año e interanual. Teniendo esto en cuenta, se consideraron dos situaciones distintas para modelar el campo de salinidad. El mes de marzo del 2000 como una situación representativa de valores altos

de salinidad en Montevideo y el mes de febrero de 1998 como una situación representativa de valores bajos de salinidad en Montevideo. En ambos casos la decisión estuvo condicionada por la cantidad de registros por mes, de forma de que la modelación se pueda comparar con la realidad lo mejor posible. En la Tabla 7.1 se presentan los valores medios mensuales de salinidad en los cinco puntos de control obtenidos a partir de las mediciones, para las dos situaciones que se utilizaron para realizar la calibración del modelo.

Punto Medición	Salinidad media mensual	
	Febrero 1998	Marzo 2000
Escollera Sarandí	2,5	21,0
Playa Ramírez	3,0	22,0
Punta Brava	5,0	23,0
Playa Pocitos	4,9	23,0
Playa Verde	7,0	24,0

Tabla 7.1: Valores medios mensuales de salinidad en los puntos de medición durante los meses utilizados para la calibración.

7.2.1 - Período de baja salinidad

El período de tiempo seleccionado como característico de una situación de registros bajos de salinidad en Montevideo es el mes de febrero de 1998. Aunque se consideró dicho mes como característico es importante aclarar que durante todo ese verano, entre diciembre de 1997 y marzo de 1998, el valor medio mensual de salinidad en Montevideo fue menor a 10 ppm.

En este punto se presenta una análisis de las mediciones diarias durante este período de tiempo. Se cuenta con mediciones de salinidad casi todos los días del mes, 26 en la Escollera Sarandí y 27 en las cuatro estaciones restantes. Esto es importante para obtener una mejor comparación entre los datos reales y las mediciones del modelo. Las mediciones en los diferentes puntos de control fueron realizadas en diferentes horarios durante la mañana, entre las 8:00 y las 12:00 horas.

En la Figura 7.3 se presentan los valores diarios de salinidad medidos durante febrero de 1998 en las estaciones analizadas, Escollera Sarandí, playa Ramírez, Punta Brava, playa Pocitos y playa Verde. Se observa en la misma la variación diaria de salinidad en cada punto y la variación de la salinidad a lo largo de la costa montevideana. Los datos diarios muestran que durante algunos días del mes la salinidad aumenta hacia el Este como se observó en el análisis de medias mensuales de salinidad (ver 3.3.2), pero en cambio en la mayoría de los días el comportamiento de los registros no presenta este comportamiento. Durante los días 14, 15, 16, 19 y 25 de febrero se observan salinidades mayores cuanto más al Este se ubique el punto de control. En los días 2, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 18, 20, 22, 24, 26, 27 y 28 de febrero el valor de salinidad registrado en Punta Brava es mayor al valor registrado en playa Pocitos o en playa Verde. En este caso influye la ubicación de ambas estaciones, mientras que las estaciones en las playas están en zonas

protegidas e influenciadas por circulaciones costeras, la estación de Punta Brava esta ubicada en una punta de la costa. En los otros días, 3, 4, 8, 17, 21 y 23, se registraron valores de salinidad mayores en puntos ubicados más al Oeste. En algunos casos este comportamiento diferente puede deberse a la diferencia de horario entre las mediciones o a corrientes costeras que afectan la circulación general de la zona.

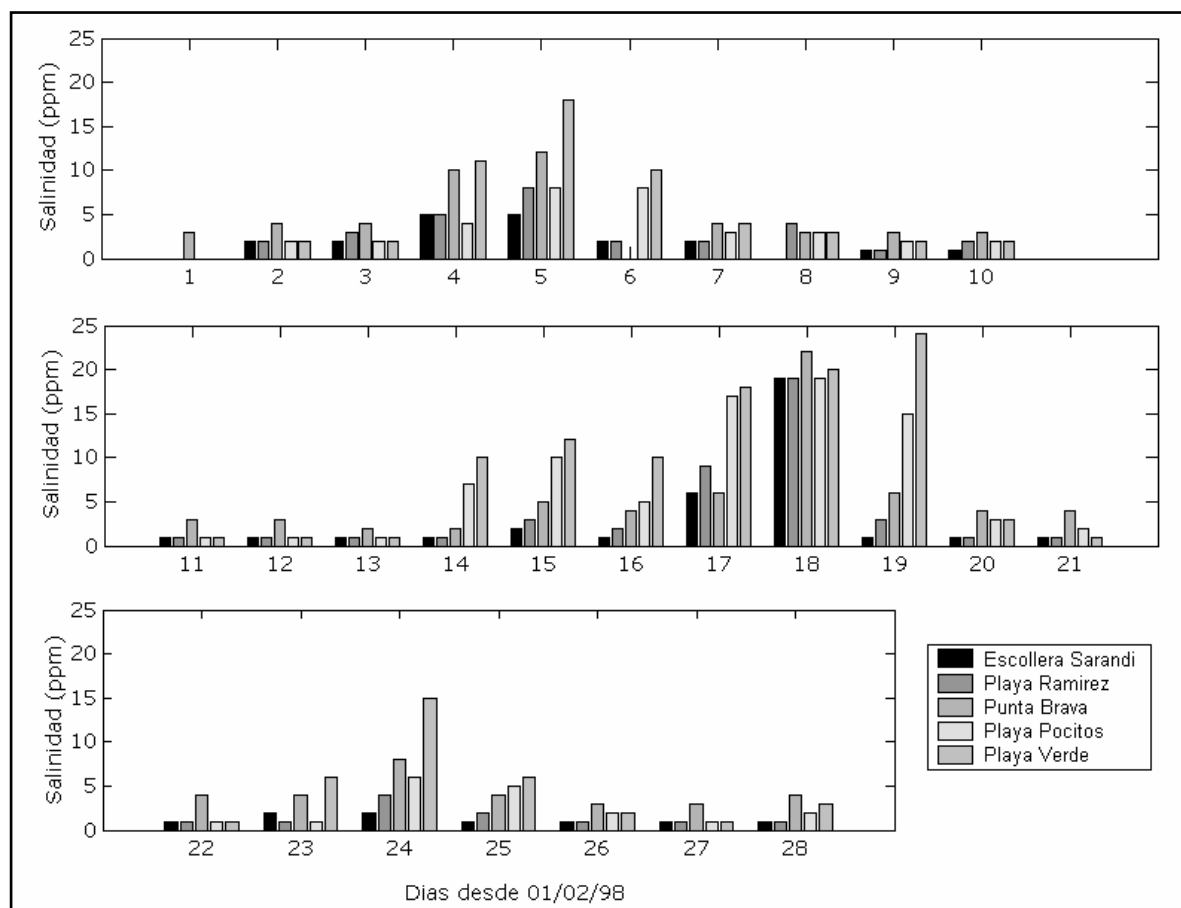


Figura 7.3: Registros diarios de salinidad obtenidos durante febrero de 1998 en cinco ubicaciones sobre la costa de Montevideo.

Por otro lado se observa que durante estos 28 días existen registros de salinidad menores a 5 ppm y mayores a 20 ppm el día 19. En general las salinidades son bajas pero existen tres picos de salinidad, uno entre los días 4 y 7, otro a partir del día 14 aproximadamente y hasta el día 19, y un tercer pico menor a los demás entre el día 23 y el 25, principalmente en playa Verde.

7.2.2 - Período de alta salinidad

El período seleccionado como representativo de registros altos de salinidad en la costa de Montevideo es el mes de marzo del año 2000. Los valores medios mensuales de salinidad en los puntos de control superan las 20 ppm. De igual forma que para el período de salinidad baja se utilizan los datos de los cuatro puntos de análisis costeros ya utilizados y las mediciones realizadas por el SOHMA en Punta Brava.

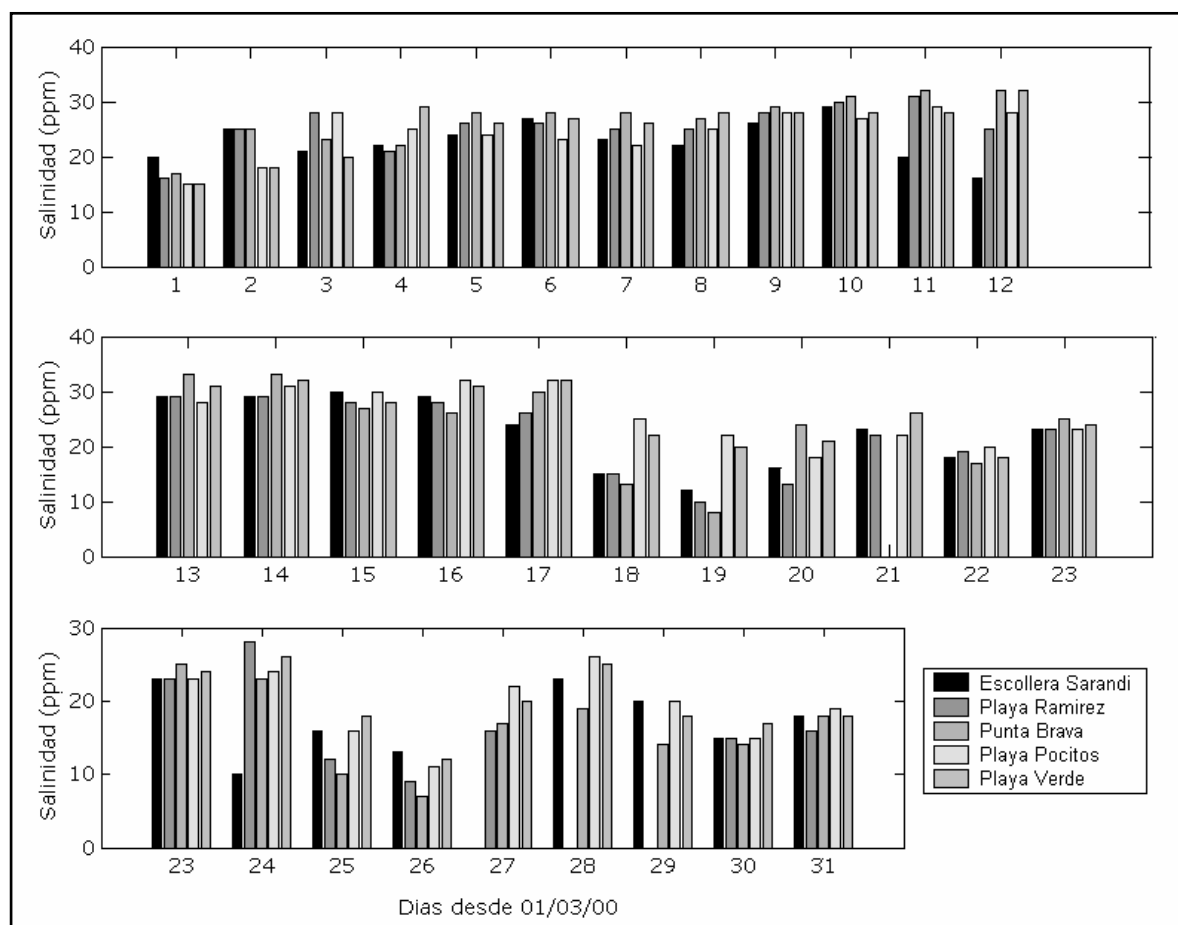


Figura 7.4: Registros diarios de salinidad obtenidos durante marzo del 2000 en cinco ubicaciones sobre la costa de Montevideo.

La cantidad de registros mensuales en este caso son 30 en la Escollera Sarandí y en Punta Brava, 29 en playa Ramírez, y 31 en las playas Pocitos y Verde. Durante este período las mediciones también fueron realizadas en distintos horarios durante las mañanas. En la Figura 7.4 se presentan los valores diarios de salinidad durante marzo del 2000 registrados en las estaciones analizadas, Escollera Sarandí, playa Ramírez, Punta Brava, playa Pocitos y playa Verde. Igual que en el caso anterior, se observa en la misma la variación diaria de salinidad en cada punto y la variación de la salinidad a lo largo de la costa montevideana. En este caso solamente el día 17 la salinidad aumenta hacia el Este según la posición del punto de control como ocurre con los valores medios mensuales.

Aunque la salinidad la mayor parte del mes muestra valores altos del orden de 20 ppm, se observan algunas variaciones de la misma en este período. Durante los primeros días se observa un aumento de la salinidad en todos los puntos de control y a partir del día 11 aproximadamente disminuye. Hasta el día 19 la salinidad decrece para luego aumentar aunque no se alcanzan salinidades tan altas como las de los primeros días. Luego a partir del día 24 la salinidad disminuye nuevamente alcanzando valores menores a 10 ppm y en dos días aumenta nuevamente a 20 ppm.

7.3 - Características de los escenarios

Como se mencionó anteriormente, los dos escenarios definidos para realizar la calibración del modelo son los meses de febrero de 1998 y marzo del 2000. Sin embargo, como se presentó en 6.6, las simulaciones necesitan un período de modelación previo mínimo de tres meses para obtener una solución independiente de la condición inicial de salinidad utilizada. Por otro lado, para modelar cualquier período de tiempo es necesario establecer las características del sistema representativas de ese determinado período. Teniendo esto en cuenta, la representación de cada uno de los escenarios está formada por un período de cuatro meses en total. Durante estos días previos al período estricto de calibración, la modelación se realizó considerando como forzantes del sistema al caudal fluvial y a la marea astronómica correspondientes a cada período. El viento real se simuló en algunos de los meses previos en función de la disponibilidad de datos. Se presentan a continuación las características de la descarga fluvial, marea astronómica y real, y vientos de los dos escenarios de calibración.

7.3.1 - Escenario de baja salinidad

Este escenario está definido por los meses de noviembre y diciembre de 1997, y los meses de enero y febrero de 1998. Esta situación se caracteriza por tener registros de salinidades bajas en la zona de Montevideo, con un valor promedio entre 3 y 7 ppm según la ubicación. Los caudales fluviales descargados en el Río de la Plata por los ríos Uruguay y Paraná durante este período fueron altos, mayores en total a 40.000 m³/s.

El período de modelación previa está formado por los tres primeros meses, por lo que la calibración del mes de febrero de 1998 se realizó a partir de las simulaciones del período noviembre 1997 – enero 1998. El mes de noviembre se simuló considerando el caudal fluvial y la marea astronómica correspondientes a cada paso de tiempo. Los meses de diciembre de 1997 y enero de 1998 se simularon considerando además de estos forzantes el viento real. Finalmente el mes de febrero de 1998 se simuló considerando la marea real a partir de las alturas de niveles de marea medidas en Mar del Plata y en La Paloma durante ese mes, además del caudal fluvial y el viento real correspondientes a dicho período.

En la Figura 7.5 se presentan los valores de caudal fluvial utilizados en la simulación de este período de alta salinidad. Dichos valores fueron interpolados linealmente por el modelo para cada instante de tiempo, a partir de los valores de descarga media mensual de cada tributario. Se observa que el caudal total es mayor a 40.000 m³/s durante todo el período, alcanzando valores de casi 50.000 m³/s. Estos valores altos de caudal se debieron a un evento La Niña ocurrido durante el año 1998, como se mencionó en 3.1. Cabe recordar que el ingreso de los caudales se efectúa por dos secciones diferentes. Una corresponde al ingreso de los ríos Uruguay y Paraná-Guazú (llamada LC1), mientras que la segunda corresponde al ingreso del río Paraná de las Palmas (llamada LC2).

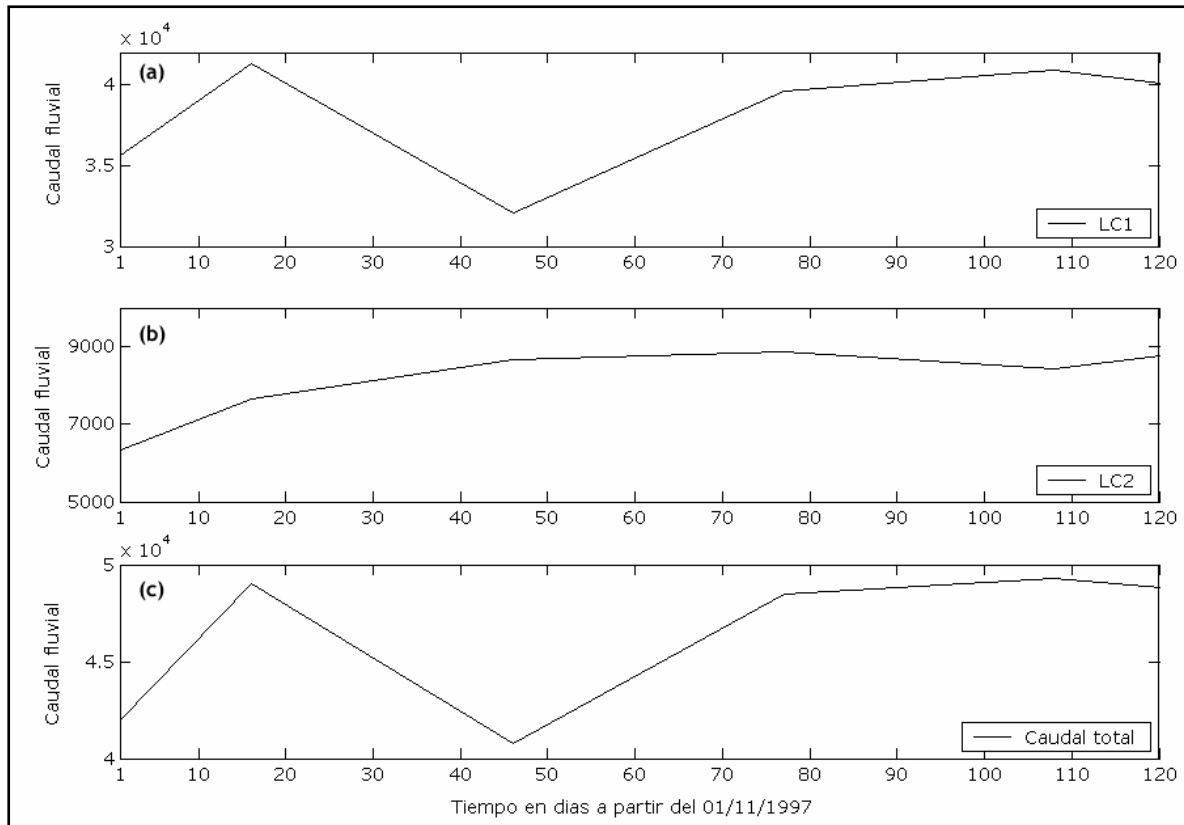


Figura 7.5: Caudal fluvial (m^3/s) ingresado al modelo en función del tiempo. (a) Caudal de los ríos Uruguay y Paraná-Guazú, (b) Caudal del río Paraná Las Palmas y (c) Caudal fluvial total.

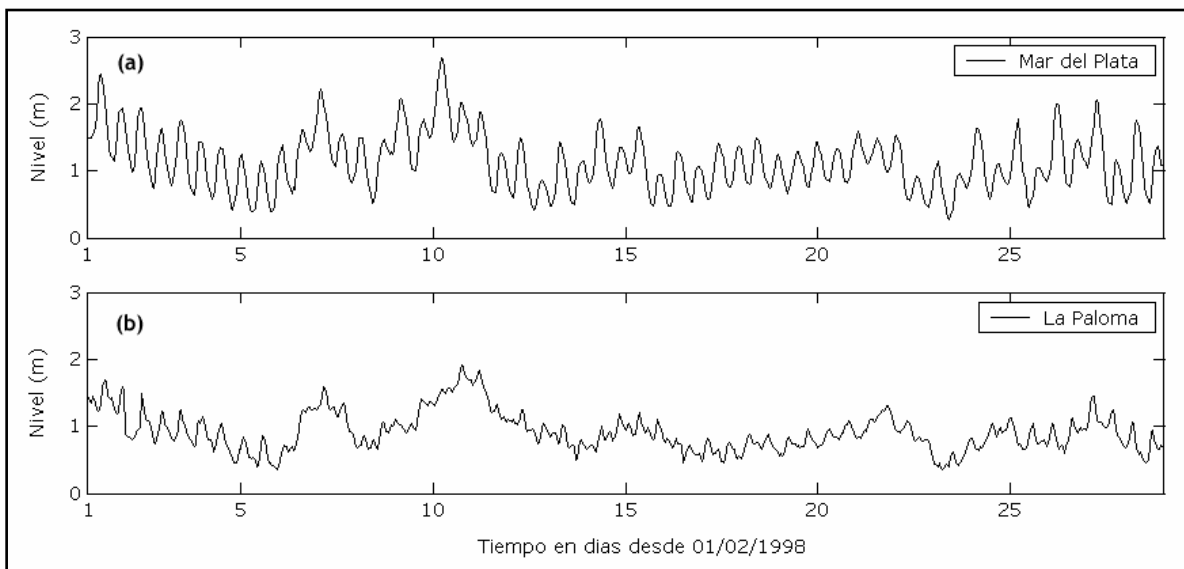


Figura 7.6: Niveles de marea registrados en (a) Mar del Plata y en (b) La Paloma durante febrero de 1998.

La marea astronómica se utilizó como forzante en la simulación de los tres primeros meses, pero en febrero de 1998 se consideró la marea real. En la Figura 7.6 se presentan los valores de niveles de marea medidos en las estaciones de Mar del Plata y La Paloma durante febrero de 1998. A partir de estas series de niveles se calcularon los niveles en toda la frontera oceánica, los cuales se establecieron como condición de borde durante toda la modelación de dicho mes. Ambas series

de niveles presentan diferentes características. La oscilación del nivel real en Mar del Plata es mayor que la oscilación en La Paloma. Los niveles registrados en Mar del Plata son mayores a 2 m mientras que los registrados en La Paloma no sobrepasan ese valor. Por otro lado ambas series presentan un comportamiento similar en lo que refiere a la oscilación media.

El otro forzante utilizado en las modelaciones es el viento real, el cual se incluyó en la modelación de los meses de diciembre de 1997, enero y febrero de 1998. Como se mencionó anteriormente la modelación del campo salino se realizó considerando por un lado el viento medido en Punta Brava y por otro lado el viento medido en Pontón Recalada, por lo que ambas series de datos correspondientes a este escenario se presentan a continuación.

En la Figura 7.7 se muestra la variación temporal del viento medido en Punta Brava durante los tres meses modelados con viento real. En la misma se observa como varía la dirección y la magnitud del viento a lo largo del período de modelación.

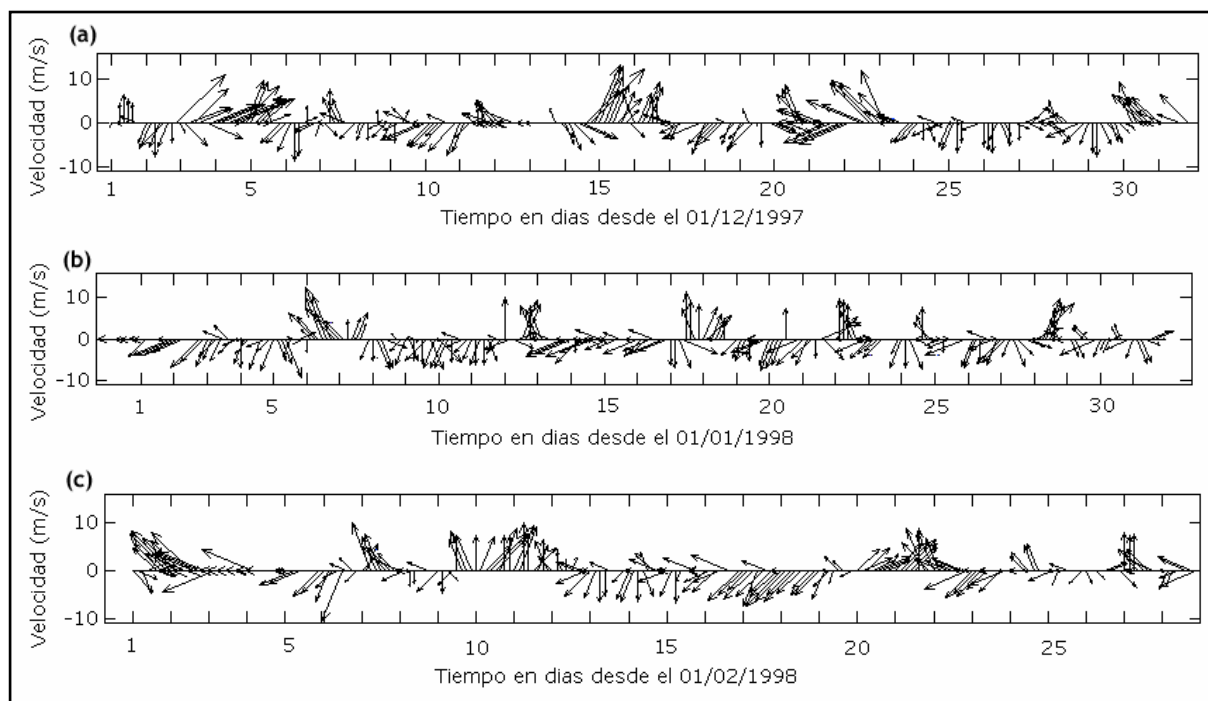


Figura 7.7: Velocidad y dirección del viento registrado en Punta Brava durante (a) diciembre de 1997, (b) enero de 1998 y (c) febrero de 1998.

Los vientos medidos en Punta Brava para el mes de febrero de 1998 muestran que durante los primeros días los vientos provienen del sector Este con intensidades bastante importantes. A partir del día 9 aproximadamente se observa un período con vientos provenientes del Sur, los cuales se invierten a partir del día 12 y hasta el día 20 se observan vientos del Noreste principalmente. Luego se registraron vientos del Suroeste y Sureste entre los días 20 y 24, donde aparecen los vientos del Este, los cuales se mantienen durante casi todos los últimos días del mes.

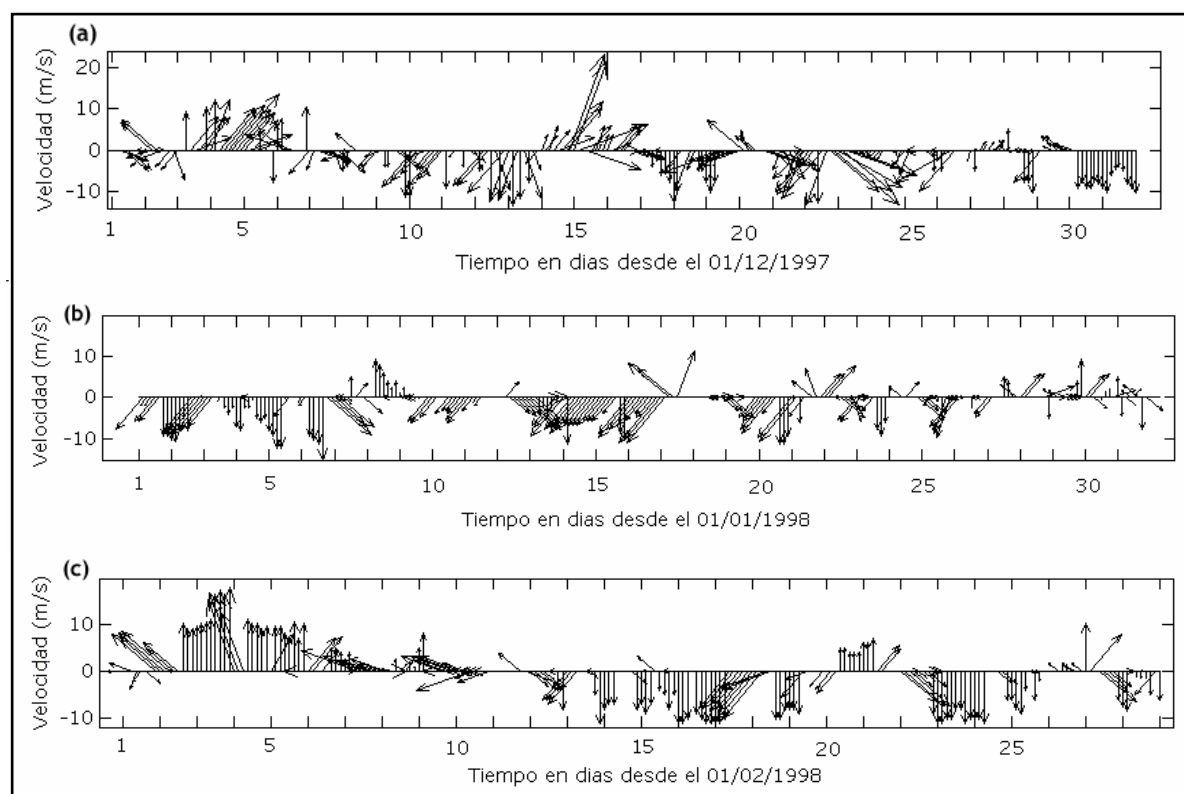


Figura 7.8: Velocidad y dirección del viento registrado en Pontón Recalada durante (a) diciembre de 1997, (b) enero de 1998 y (c) febrero de 1998.

En la Figura 7.8 se muestra la variación temporal del viento medido en Pontón Recalada durante los tres meses modelados con viento real. Se observa en la misma que durante febrero de 1998 los vientos provienen principalmente del sector Sur y Norte. Los primeros días los vientos son del Sureste y luego rotan hacia el Sur, manteniéndose los mismos aproximadamente hasta el día 6. Luego ocurren vientos variados pero principalmente del Este hasta el día 12 donde aparecen vientos del Norte, y del Noreste el día 17. Entre el 20 y 22 los vientos son del Sur y Suroeste y luego ocurren vientos del Noroeste y Norte nuevamente.

7.3.2 - Escenario de alta salinidad

El escenario de salinidades altas en la zona de Montevideo está formado por el período de tiempo comprendido entre los meses de diciembre de 1999 y marzo del 2000. Esta situación está caracterizada por valores promedios de salinidad en Montevideo mayores a 20 ppm y caudales de descarga de los ríos Paraná y Uruguay bajos, entre 10.000 y 15.000 m³/s.

Según lo determinado en 6.6 el período de modelación previa necesario es de tres meses, formado en este caso por los meses de diciembre de 1999, enero y febrero del 2000. Los primeros dos meses, diciembre de 1999 y enero del 2000, se simulaban considerando como forzantes el caudal fluvial y la marea astronómica. En la modelación de febrero del 2000 además de esos forzantes se agregó el efecto del viento real. Por último el período de tiempo en el cual se realizaron las comparaciones entre los valores medidos y modelados, marzo del 2000, se simuló

considerando los efectos del caudal fluvial, marea real y viento real, correspondientes a dicho período de tiempo.

En la Figura 7.9 se presentan los valores de caudal fluvial descargado en el Río de la Plata correspondientes al escenario de alta salinidad. Como se mencionó en 6.3.1 la serie temporal de caudales es calculada por el modelo a partir de los datos de caudal fluvial medio mensual. En este caso se utilizaron los valores medios mensuales de caudal correspondiente a los meses de noviembre y diciembre de 1999, y enero, febrero, marzo y abril del 2000. Se observa que aproximadamente hasta el día 90 (19/02/2000) el caudal fluvial total es menor a $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$, y luego empieza a aumentar hasta más de $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hacia finales de marzo. La sección LC1 se refiere al ingreso de los ríos Uruguay y Paraná-Guazú y la sección LC2 corresponde al ingreso del río Paraná Las Palmas. La variación del caudal fluvial con el tiempo en este caso es menor que el escenario de caudal fluvial alto.

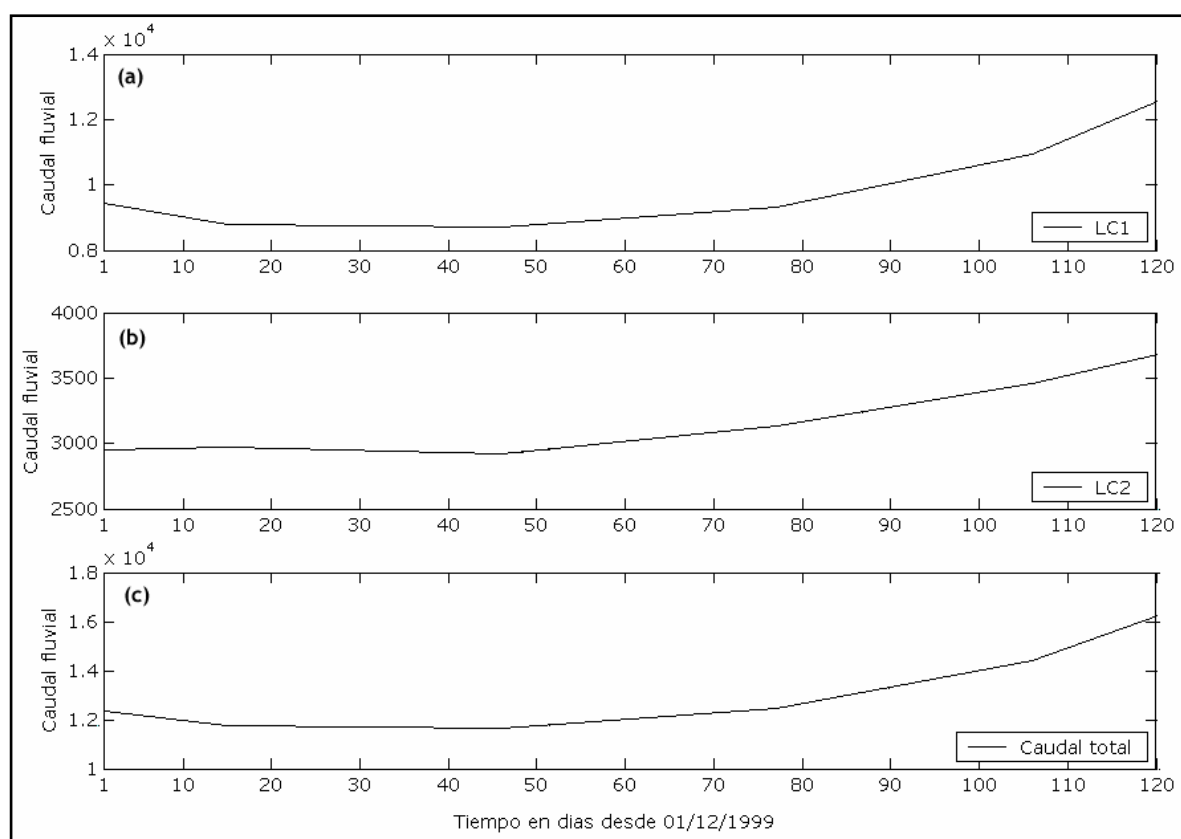


Figura 7.9: Caudal fluvial (m^3/s) ingresado al modelo en función del tiempo: (a) Caudal de los ríos Uruguay y Paraná-Guazú, (b) Caudal del río Paraná Las Palmas y (c) Caudal fluvial total.

La marea real se utilizó como forzante en la simulación del mes de marzo del 2000, habiéndose impuesto en las otras simulaciones la condición de borde oceánica de marea astronómica correspondiente a cada período. La marea real se simula ingresando las series de niveles registrados en las estaciones de Mar del Plata y La Paloma. Para conocer las características que tuvo el mes de marzo del 2000 en lo referente a la elevación de la superficie libre, se

presentan en la Figura 7.10 las series de niveles medidas en dichas estaciones. En la misma se observa que la amplitud de la marea real es mayor en el Sur que en el Norte del Río de la Plata, una de las características principales de la marea de la zona. En Mar del Plata se observan niveles mayores a los registrados en la Paloma, superándose en algunos casos los 2 m. Hasta el día 15 aproximadamente las series temporales de niveles en los dos puntos de medición muestran un comportamiento similar a la marea astronómica, mientras que a partir de la segunda quincena se observa un aumento del nivel medio de ambas oscilaciones, el cual debe estar asociado a fuertes vientos o gradientes de presión importantes.

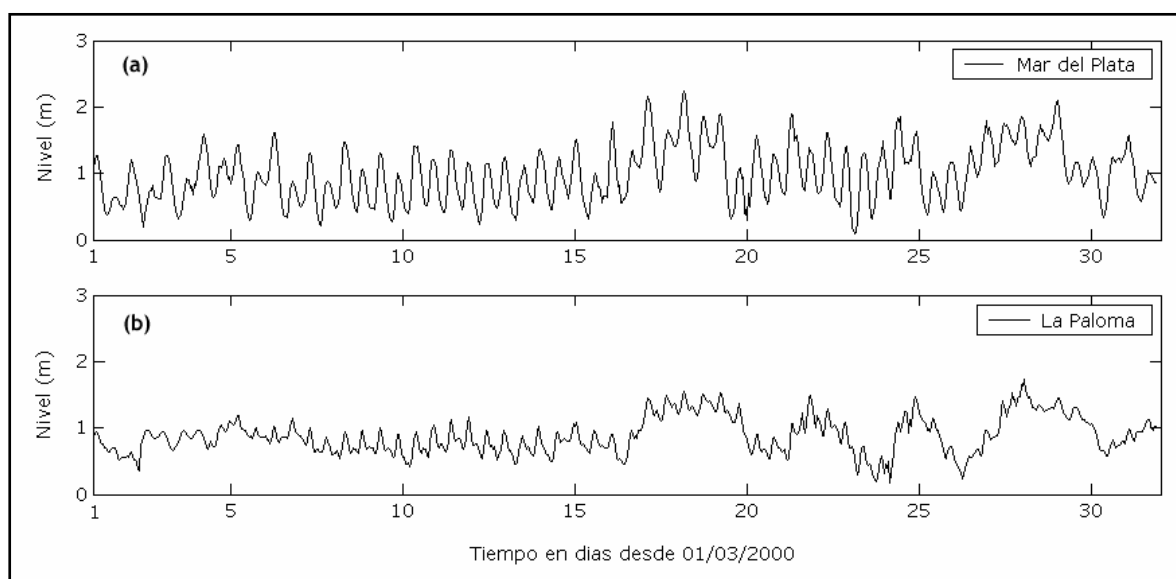


Figura 7.10: Niveles de marea registrados en (a) Mar del Plata y en (b) La Paloma durante marzo del 2000.

Por último se presentan los vientos medidos en las estaciones de Punta Brava y Pontón Recalada durante este escenario de salinidades altas en Montevideo y caudales fluviales bajos descargados en el Río de la Plata. Como se mencionó anteriormente se incluyó el efecto del viento real en las simulaciones correspondientes a los meses de febrero y marzo del 2000.

En la Figura 7.11 se presenta el viento ingresado al modelo durante febrero y marzo 2000 registrado en la estación de medición costera Punta Brava. En la misma se observa la velocidad y dirección del viento registrado en Punta Brava cada tres horas. Los vientos durante febrero provienen principalmente del sector Norte y Noreste, habiéndose registrado vientos del Sur, Sureste y Suroeste en el día 2, entre los días 13 a 15, alternadamente entre los días 22 y 24 pero con intensidades menores a 5 m/s, y hacia finales del mes. Durante marzo del 2000 los vientos provienen principalmente del sector Noreste. Durante los primeros días se registraron vientos fuertes del Noreste, entre los días 2 y 7 los vientos fueron moderados del sector Sureste y a partir del 8 al 16 los vientos fueron de los sectores Noreste y Norte. Los días 16 y 17 del mes los vientos son del Sur y Sureste, luego se invierten y nuevamente provienen del sector Noreste y Norte.

Finalmente hacia fines del mes a partir del día 28 se registraron fuertes vientos del sector Sur y Sureste.

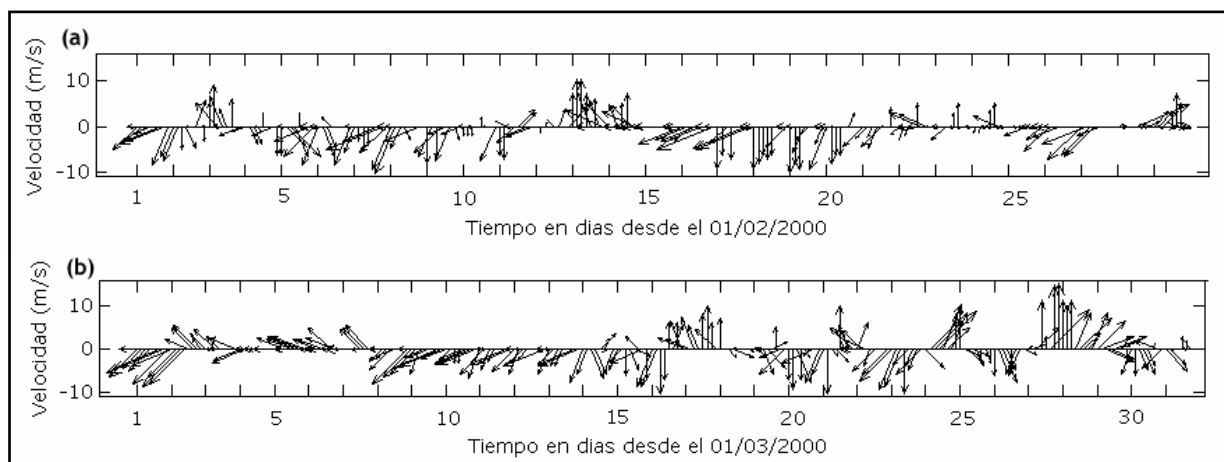


Figura 7.11: Velocidad y dirección del viento registrado en Punta Brava durante (a) febrero del 2000 y (b) marzo del 2000.

La variación temporal del viento registrado en Pontón Recalada durante los meses de febrero y marzo del 2000 se presenta en la Figura 7.12. Durante febrero del 2000 los vientos en la zona de Pontón Recalada provienen principalmente del sector Norte, Noreste y Noroeste. Solamente durante los días 3, 13 y hacia finales del mes se registraron vientos del sector Suroeste y Sur. Los vientos del sector Sureste también ocurren esporádicamente. Respecto a los vientos del mes de marzo del 2000 se observa que hasta el día 16 los vientos provienen del sector Norte, Noroeste y Noreste. Alrededor del día 18 se registraron vientos del Suroeste y Sureste. Luego los vientos fueron del sector Noreste principalmente hasta los días 24 y 25 que se registraron vientos del sector Sureste. Finalmente alrededor del día 28 se observan vientos del sector Suroeste y Oeste.

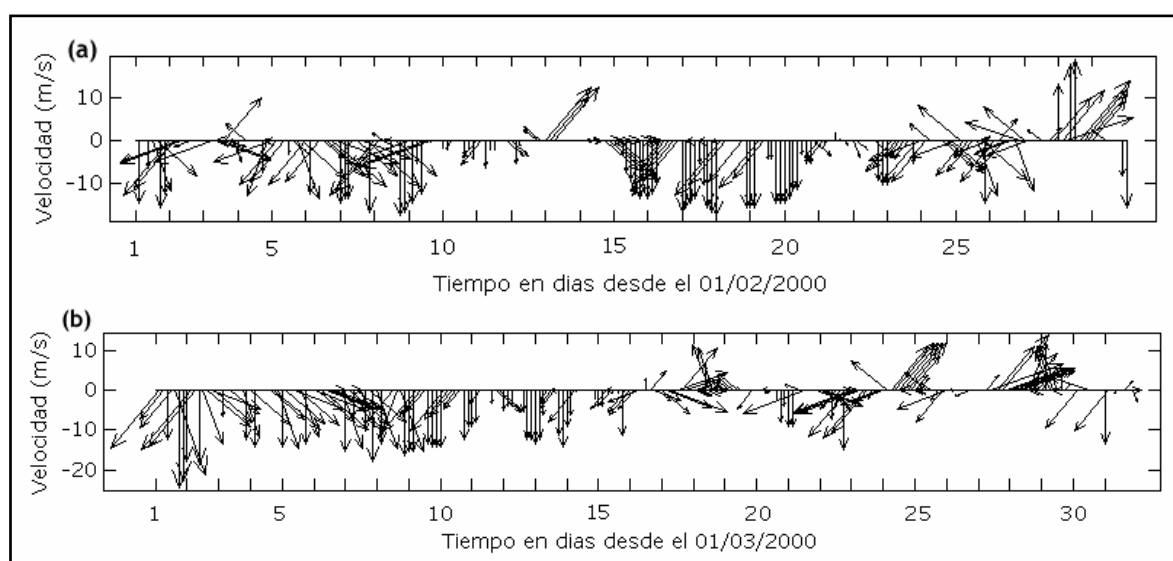


Figura 7.12: Velocidad y dirección del viento registrado en Pontón Recalada durante (a) febrero del 2000 y (b) marzo del 2000.

7.4 - Resultados obtenidos - Vientos Punta Brava

Se presenta en este punto el ajuste del campo salino obtenido considerando los datos de vientos medidos en la estación costera de Punta Brava ubicada en Montevideo. Como se mencionó anteriormente la calibración se realizó ajustando el parámetro ψ que interviene en la formulación de la tensión del viento en superficie, y el factor de escala β aplicado a la difusión en las direcciones x e y . Utilizando los vientos medidos en Punta Brava el ajuste de la salinidad se obtuvo para $\psi = 10 \times 10^{-06}$ y $\beta = 0,4 \text{ m}^2/\text{s}$. La presentación de los resultados se divide en cada uno de los escenarios.

7.4.1 - Escenario de baja salinidad

El ajuste del campo salino obtenido para febrero de 1998 a partir de la modelación del período previo noviembre 1997 – enero 1998 se presenta en la Figura 7.13. En la misma se observa la comparación entre los valores de salinidad medidos y modelados en las estaciones de control Escollera Sarandí, playa Ramírez, Punta Brava, playa Pocitos y playa Verde, correspondientes a dicho período. El comportamiento de la salinidad calculada por el modelo es muy similar en todos los puntos de control y el ajuste obtenido se considera aceptable, teniendo en cuenta que el modelo reproduce las grandes variaciones de salinidad existentes en este período.

En la Escollera Sarandí se observa un buen ajuste general de los valores de salinidad registrados. Los valores que no se reproducen aceptablemente son los correspondientes a la salinidad de los días 18, 19 y 20, pero el aumento de salinidad entre los días 17 y 18 es representado aceptablemente por el modelo.

En general en la playa Ramírez la variación de los datos es reproducida correctamente por el modelo y los máximos de salinidad registrados en el mes también. Los mayores errores se producen los días 7 y 19. En el primero el modelo calcula valores de salinidad de 10 ppm y la medición indica 2 ppm y en el segundo el modelo calcula valores del orden de 15 ppm y el dato indica 3 ppm.

En Punta Brava el modelo la mayoría del mes representa la variación registrada en los datos. Por ejemplo los días 4 y 5 los datos muestran un aumento de salinidad que el modelo reproduce casi exactamente. El día 18 se produce un registro de salinidad de 15 ppm más que el del día anterior y el modelo reproduce este aumento de salinidad aunque no reproduce el valor exacto. Sin embargo nuevamente el día 19 el modelo calcula un valor alto de salinidad, de más de 20 ppm y el dato real indica un valor cercano a 5 ppm. Hacia finales del mes el modelo representa nuevamente de forma aceptable el aumento leve de salinidad registrado el día 24.

En la playa Pocitos se observa un ajuste general similar al obtenido en los otros puntos de control. Los primeros días el modelo reproduce un aumento de salinidad mayor que el registrado en la realidad y entre los días 14 y 18 los datos muestran salinidades mayores que las del modelo.

Sin embargo la mayor diferencia entre el modelo y los datos es de aproximadamente 7 ppm, menor a la registrada en otros puntos de control.

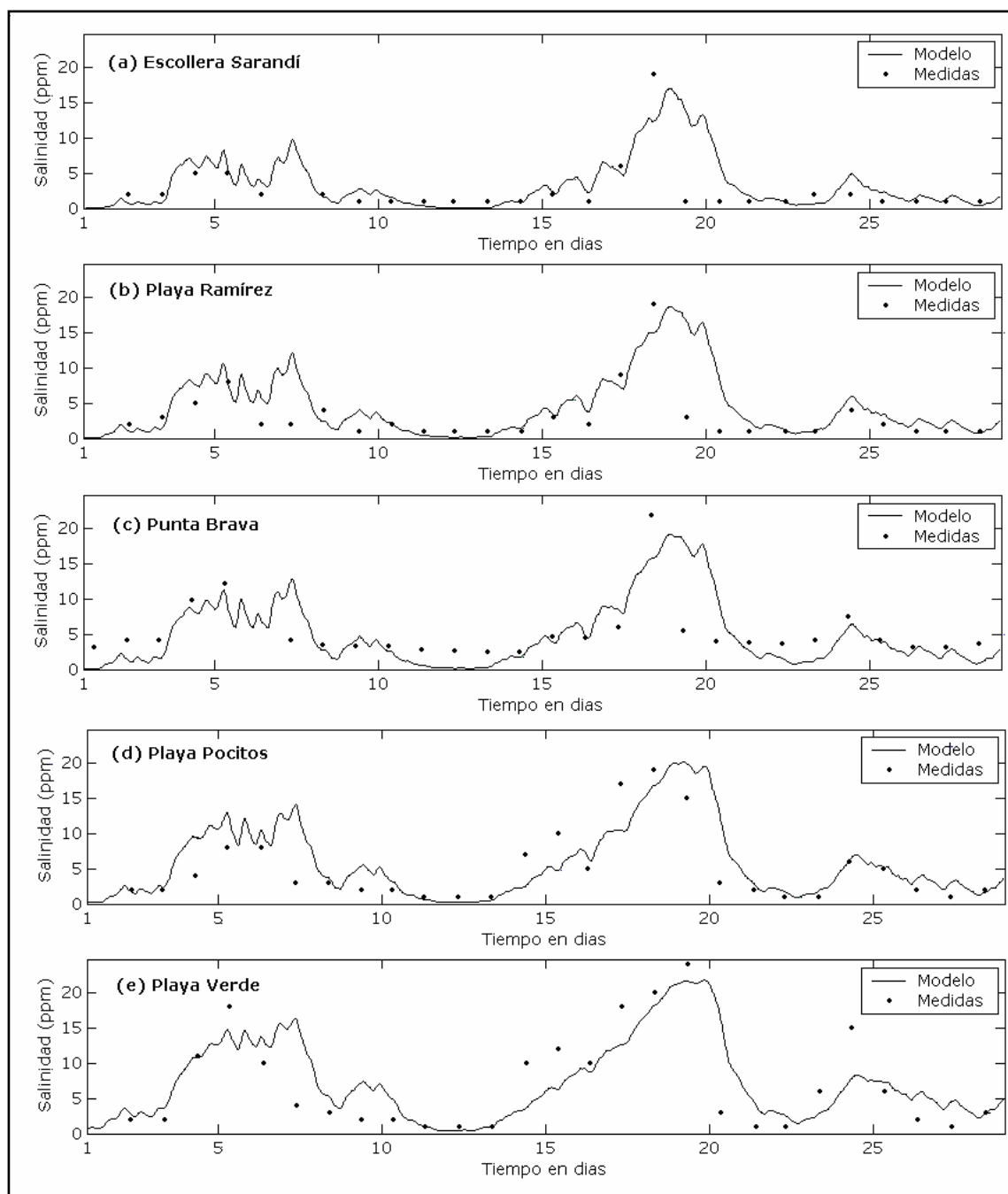


Figura 7.13: Comparación entre los valores de salinidad medidos y calculados por el modelo con vientos de Punta Brava en (a) Esollera Sarandí, (b) playa Ramírez, (c) Punta Brava, (d) playa Pocitos y (e) playa Verde, durante febrero de 1998.

En playa Verde durante los primeros días del mes los registros aumentan desde 1 ppm hasta 18 ppm y el modelo reproduce este aumento correctamente. Luego los días 6 y 7 las diferencias son mayores a 5 ppm pero luego la salinidad vuelve a aumentar en este punto alrededor del día 15 y el modelo lo representa, aunque sin ajustar exactamente todos los valores. Finalmente el día 24 los registros muestran un aumento de salinidad que el modelo no reproduce correctamente.

Punto Medición	Salinidad media mensual	
	Medidas	Modelo
Esollera Sarandí	2,5	3,4
Playa Ramírez	3,0	4,5
Punta Brava	5,0	4,9
Playa Pocitos	4,9	5,8
Playa Verde	7,0	7,3

Tabla 7.2: Valores medios de salinidad durante febrero de 1998 registrados y obtenidos con el modelo con vientos de Punta Brava para cada punto de control.

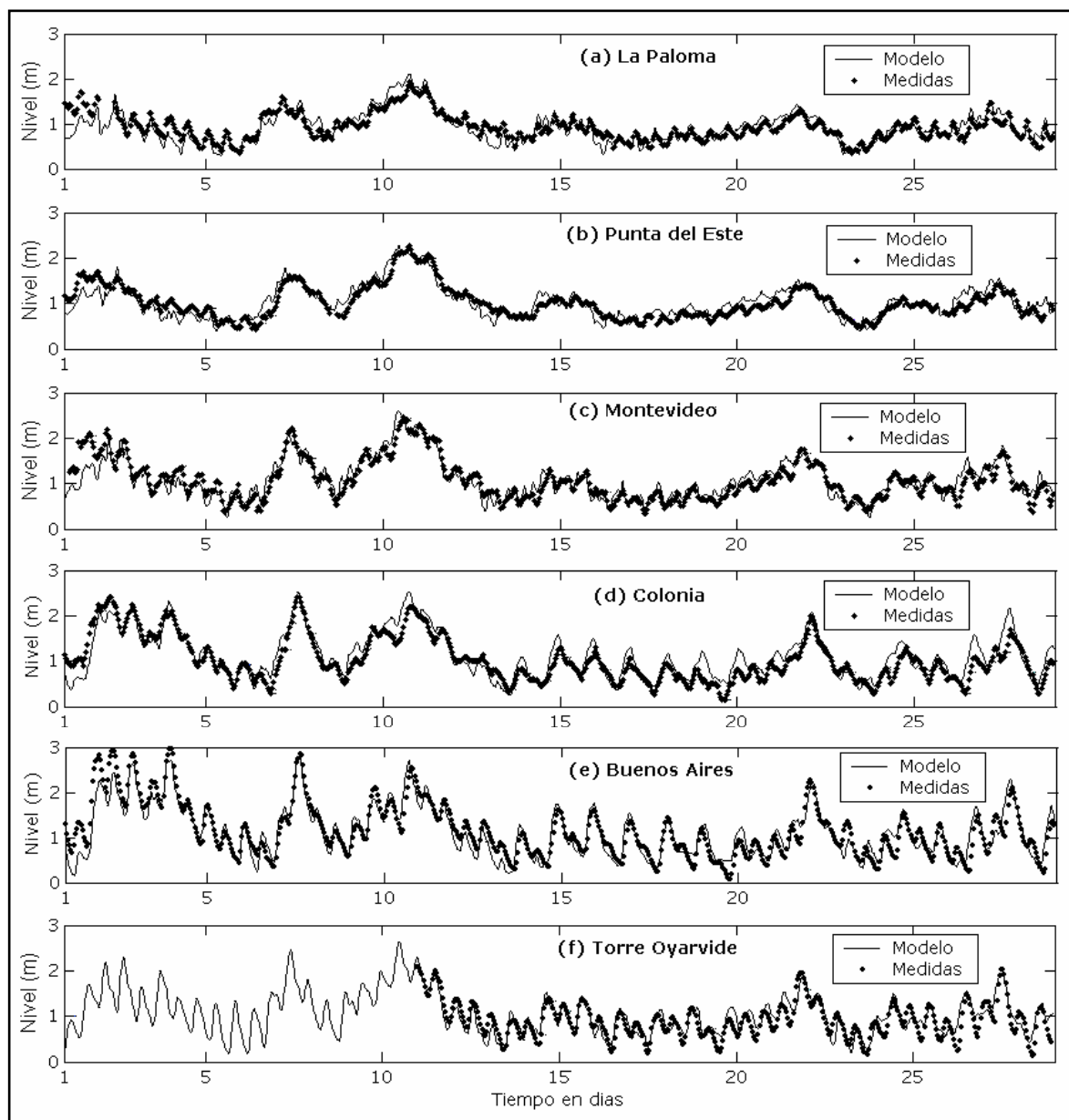


Figura 7.14: Niveles calculados por el modelo con vientos de Punta Brava y niveles medidos durante febrero de 1998 en las estaciones de control (a) La Paloma, (b) Punta del Este, (c) Montevideo, (d) Colonia, (e) Buenos Aires y (f) Torre Oyarvide.

En la Tabla 7.2 se muestra la salinidad media mensual correspondiente al mes de febrero de 1998, calculada a partir de los datos y con los resultados obtenidos con el modelo. Como se

observa en la misma, en todos los puntos de control el valor medio calculado con el modelo es similar al que muestran los registros, siendo la diferencia entre los valores medios mayor a 1 ppm solamente en playa Ramírez.

De forma de verificar el ajuste hidrodinámico obtenido durante este período utilizado para la calibración hidrodinámica, se presenta en la Figura 7.14 la comparación entre niveles modelados y registrados en las seis estaciones de control de niveles definidas en el punto 7.1. En la estación de Torre Oyarvide hasta el día 12 no se obtuvieron los datos y por eso no se presentan. Hay que aclarar que en las comparaciones de niveles modelados con niveles registrados se realiza un ajuste del nivel medio de los niveles modelados con el nivel medio de las series medidas.

Como se observa el ajuste de los niveles registrados en estas seis estaciones de medición es aceptable. Se reproducen correctamente los períodos de aumento y disminución de niveles, así como también la variación temporal de los mismos.

7.4.2 - Escenario de alta salinidad

A continuación se presenta el ajuste del campo salino obtenido para el segundo escenario de calibración, el mes de marzo del 2000, modelado a partir de la modelación del período previo diciembre 1999 – febrero 2000. En la Figura 7.15 se observa la comparación entre los valores de salinidad medidos y modelados para las estaciones de control Escollera Sarandí, playa Ramírez, Punta Brava, playa Pocitos y playa Verde, durante marzo del 2000.

En la Escollera Sarandí se observa en general una representación aceptable de los valores de salinidad medidos, aunque existen variaciones en los datos que el modelo no reproduce. Desde el inicio del mes hasta el día 10 se observa un muy buen ajuste de los datos y en algunos casos el modelo representa casi el valor exacto. Los días 11 y 12 los valores reales indican salinidades de 20 y 16 ppm, mientras que los valores del modelo son del entorno de 30 ppm. La diferencia entre el modelo y los datos disminuye los días siguientes pero nuevamente hacia finales del mes, los días 24 y del 27 al 30, se registran diferencias importantes de casi 10 ppm.

En playa Ramírez se observa que la variación de la salinidad calculada por el modelo es similar a la registrada en la escollera Sarandí pero los valores son mayores y el ajuste obtenido es mejor. En este caso hasta el día 16 se obtiene una muy buena representación de los valores reales con diferencias menores a 2 ppm salvo el día 12 que se registró una disminución de salinidad que el modelo no fue capaz de reproducir. Los valores reales durante los días 17, 18 y 19 son menores a los representados por el modelo, existiendo diferencias del orden de los 8 ppm. Los últimos 10 días del mes el modelo reproduce aceptablemente los aumentos y disminuciones de salinidades en este punto de control siendo las diferencias pequeñas, menores a 5 ppm.

En Punta Brava el modelo ajusta casi perfectamente los valores medidos los primeros 17 días del mes, exceptuando los días 3 y 4. Nuevamente los mayores errores se registran durante los días 18, 19, 20, 22, 25 y 26, siendo los mismos del orden de 10 ppm.

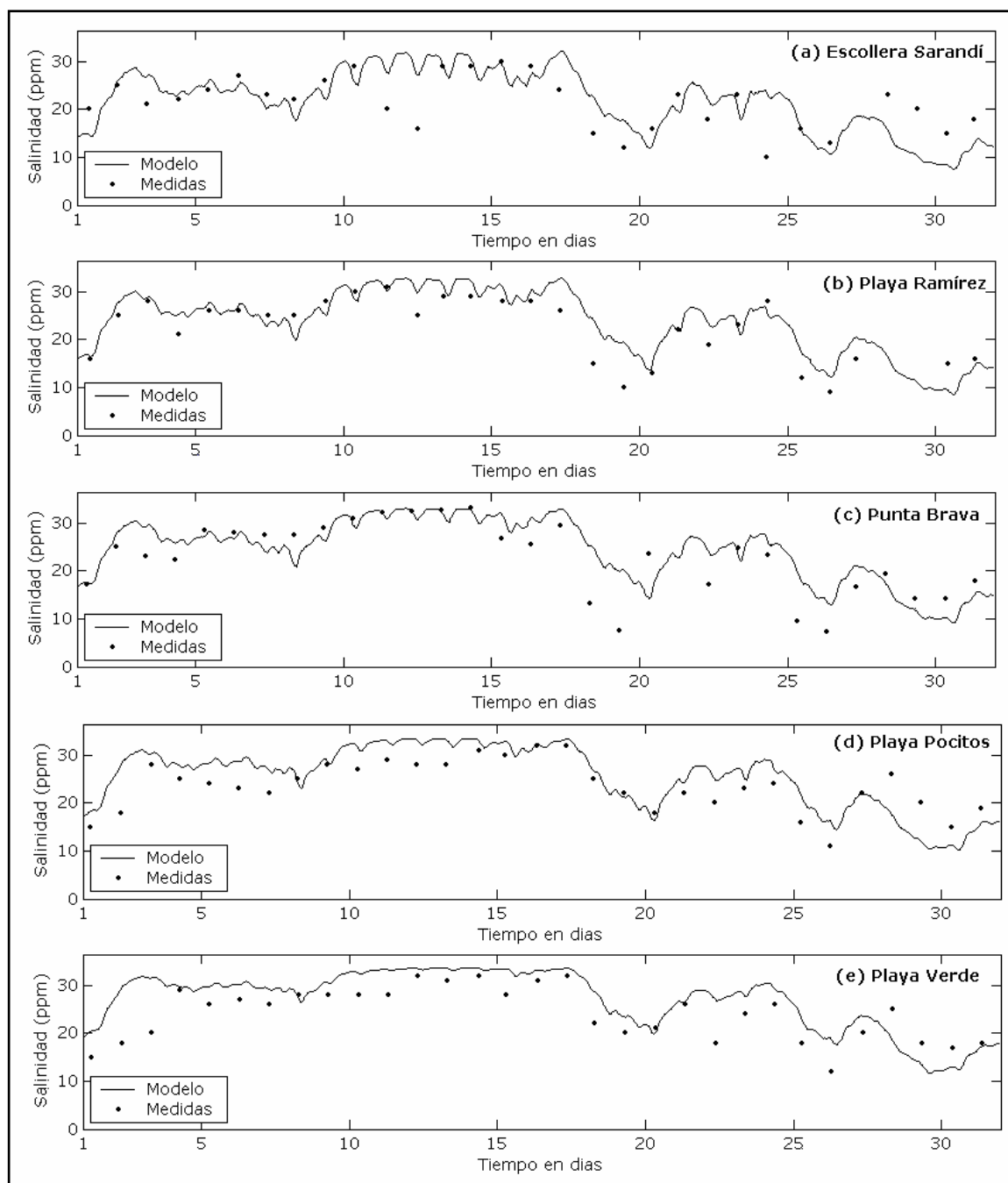


Figura 7.15: Comparación entre los valores de salinidad medidos y calculados por el modelo con vientos de Punta Brava en (a) Escollera Sarandí, (b) playa Ramírez, (c) Punta Brava, (d) playa Pocitos y (e) playa Verde, durante marzo del 2000.

En la playa Pocitos se puede observar que la variación temporal de la salinidad calculada con el modelo y la variación temporal de los datos es muy similar, aunque no se reproducen en general los valores exactos. Hasta el día 15 los valores obtenidos con el modelo son mayores a los valores registrados y las diferencias mayores en este período son del entorno de 6 ppm. Desde el día 16 hasta el 20 el modelo reproduce perfectamente la variación de los datos de salinidad, simulando una variación de 30 ppm a 15 ppm en cuatro días. Durante los últimos 10 días del mes el ajuste es similar a los casos anteriores con diferencias del orden de 5 ppm o más, aunque se representa la variación temporal de los datos.

Punto Medición	Salinidad media mensual	
	Medidas	Modelo
Esollera Sarandí	21,0	21,9
Playa Ramírez	22,0	23,7
Punta Brava	23,0	24,3
Playa Pocitos	23,0	25,1
Playa Verde	24,0	27,1

Tabla 7.3: Valores medios de salinidad durante marzo del 2000 registrados y obtenidos con el modelo con vientos de Punta Brava para cada punto de control.

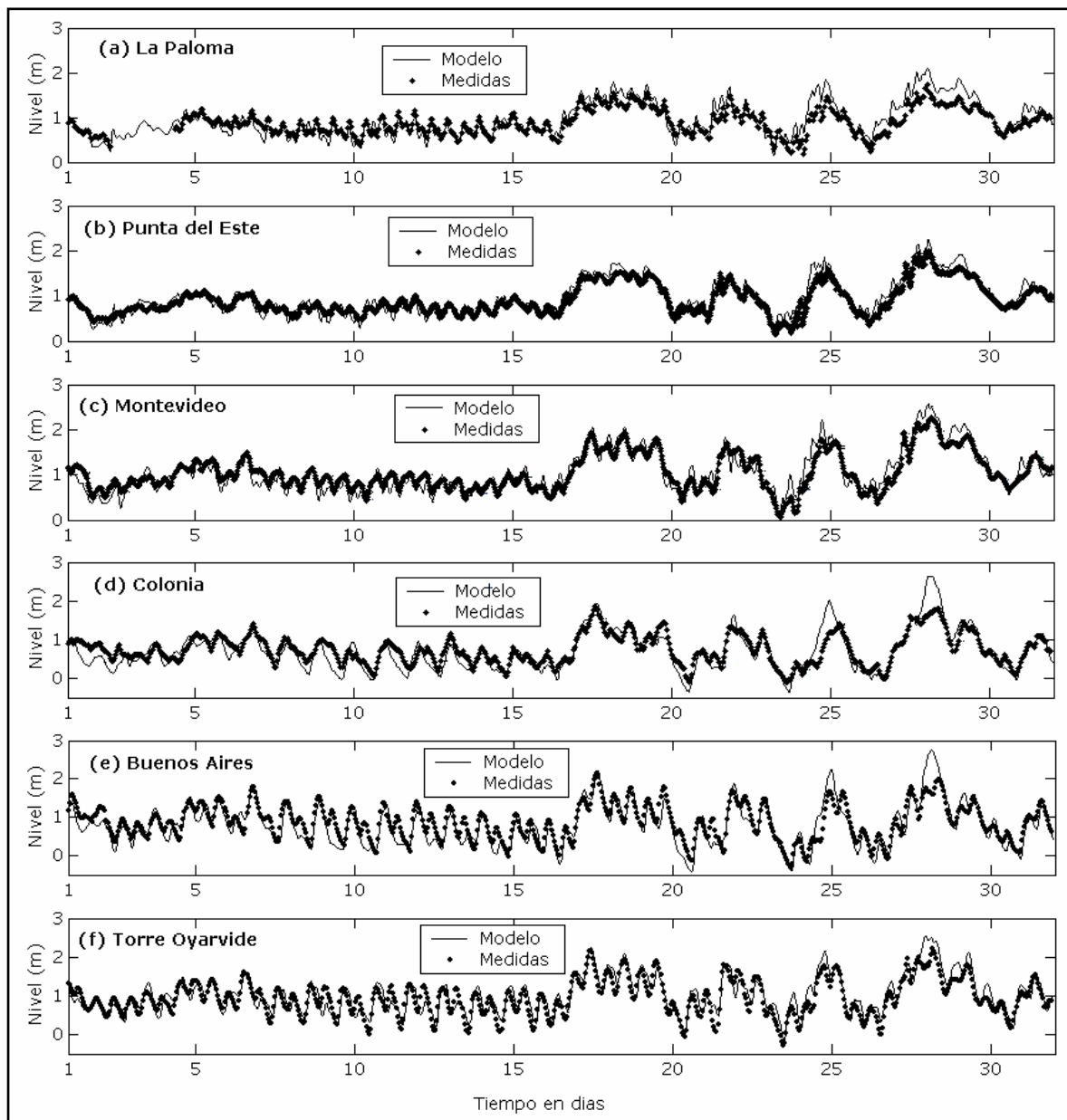


Figura 7.16: Niveles calculados por el modelo con vientos de Punta Brava y niveles medidos durante marzo del 2000 en las estaciones de control (a) La Paloma, (b) Punta del Este, (c) Montevideo, (d) Colonia, (e) Buenos Aires y (f) Torre Oyarvide.

Por último en playa Verde los resultados obtenidos son similares a los señalados en playa Pocitos. En este caso hasta el día 20 los valores reales son menores a los modelados con diferencias del orden de 5 ppm, salvo el día 3. Durante el resto del mes el modelo reproduce la variación en los registros y las máximas diferencias se registran los días 22 y 26.

Los valores de salinidad calculados en los cinco puntos de control para el mes de marzo del 2000 presentan valores medios mensuales mayores a los determinados por las mediciones. Esto se observa en la Tabla 7.3 donde se muestran las salinidades medias mensuales modeladas y registradas. Cuando se analizó la variación temporal de la salinidad se observó que en la playa Pocitos y en la playa Verde la salinidad modelada era mayor que la salinidad medida la mayoría de los días del mes. Los valores medios también muestran este resultado, pues en dichas estaciones es donde las diferencias entre los valores medios son mayores, 2,1 y 3,1 ppm respectivamente.

Nuevamente en este caso se realizó la comparación entre los niveles calculados por el modelo y los niveles registrados en varias estaciones mareográficas del Río de la Plata para controlar el ajuste hidrodinámico durante este período de tiempo. Se presentan en la Figura 7.16 los resultados obtenidos durante esta comparación y se observa que también en este caso el ajuste de la elevación de la superficie de agua en general es bueno. Sin embargo, el modelo reproduce elevaciones mayores a las registradas hacia finales del mes, principalmente en las estaciones de La Paloma, Colonia y Buenos Aires.

7.5 - Resultados obtenidos - Vientos Pontón Recalada

Como se mencionó anteriormente la calibración del campo salino se realizó también considerando los vientos registrados en la estación no costera de Pontón Recalada. Un análisis de los registros de esta estación de medición y una comparación con los registros simultáneos de la estación Punta Brava fue presentado en 3.5. Los parámetros que fueron ajustados de forma de calibrar la salinidad son los mismos que en el caso anterior, el parámetro ψ que interviene en la formulación de la tensión del viento en superficie, y el factor β aplicado a la difusión en las direcciones x e y . En este caso el ajuste que se presenta se obtuvo para un valor $\psi = 8 \times 10^{-06}$ y $\beta = 0,2 \text{ m}^2/\text{s}$. En este caso el parámetro ψ es menor que el obtenido para los vientos de Punta Brava, lo cual es consistente con el hecho de que los vientos registrados en Pontón Recalada son más intensos que los registrados en Punta Brava. A continuación se presenta el ajuste de salinidad obtenido luego del proceso de calibración y al comparar estos resultados con los presentados en 7.4 se observan varias diferencias que se comentan más adelante en este capítulo.

7.5.1 - Escenario de baja salinidad

El ajuste del campo salino obtenido para febrero de 1998 considerando los vientos medidos en Pontón Recalada se presenta en la Figura 7. 17. En la misma se observa la comparación entre los valores de salinidad medidos y modelados para las estaciones de control Escollera Sarandí,

playa Ramírez, Punta Brava, playa Pocitos y playa Verde, correspondientes a dicho período. En ésta comparación se observa que el ajuste obtenido en los cinco puntos de control es muy similar y aunque no es perfecto es considerado aceptable.

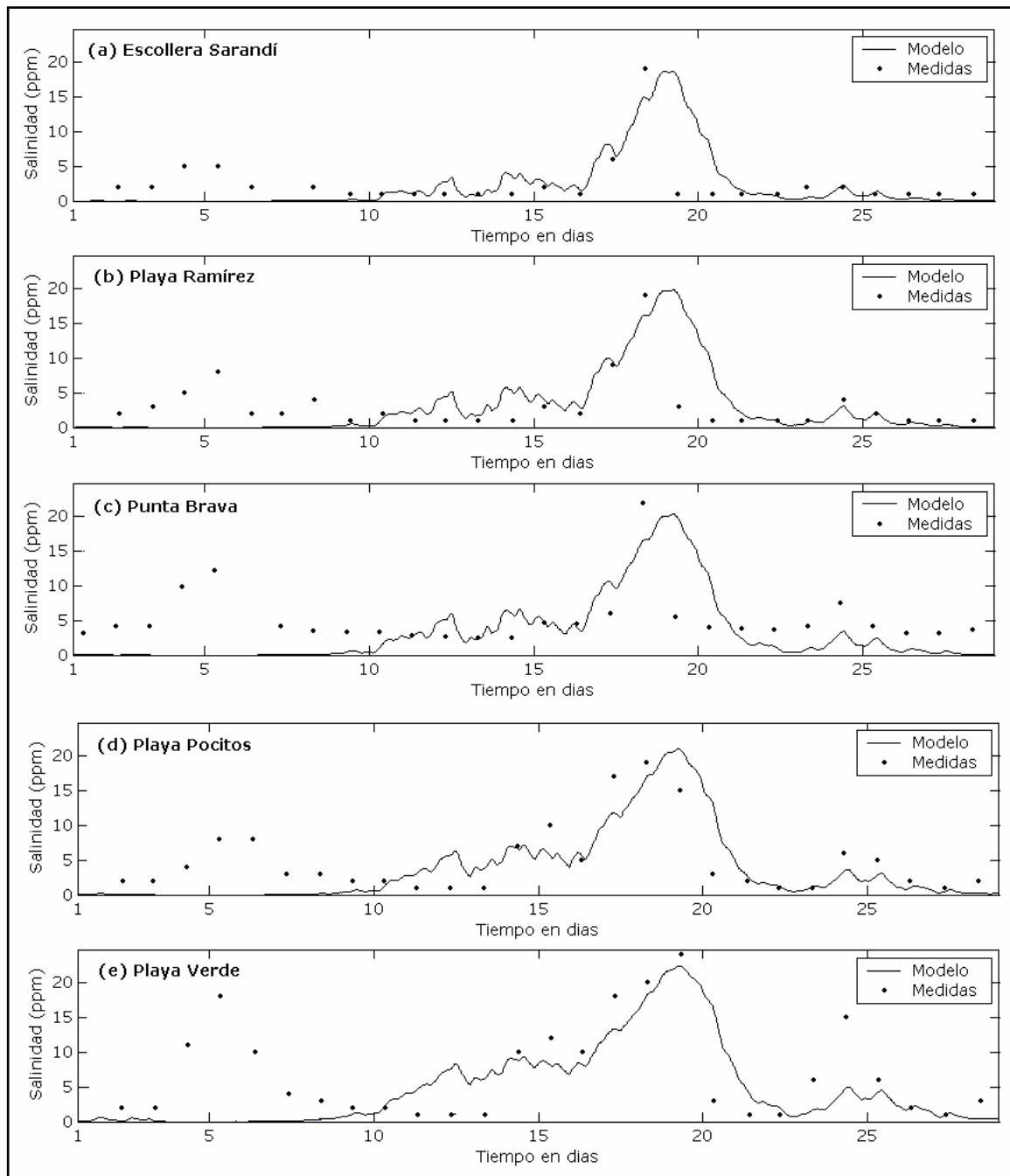


Figura 7. 17: Comparación entre los valores de salinidad medidos y calculados por el modelo con vientos de Pontón Recalada en (a) Escollera Sarandí, (b) playa Ramírez, (c) Punta Brava, (d) playa Pocitos y (e) playa Verde, durante febrero de 1998.

En la Escollera Sarandí se observa un aumento de salinidad en los datos durante los primeros días que el modelo no es capaz de reproducir. A partir del día 10 y hasta el día 15 el modelo representa los valores bajos de salinidad registrados. Entre los días 16 y 18 la salinidad en esta zona aumentó más de 15 ppm y el modelo reproduce casi perfectamente este aumento. Los

días 19 y 20 el modelo sigue mostrando valores altos de salinidad decrecientes pero los datos muestran nuevamente valores bajos. Los últimos días del mes el modelo representa las salinidades bajas registradas.

En playa Ramírez la comparación entre los valores medidos y modelados de salinidad es similar a la mencionada para el caso Escollera Sarandí. Los primeros días el modelo no representa la variación de salinidad registrada en este punto, luego existe un período de ajuste aceptable, con la posterior representación del aumento de salinidad registrado entre los días 16 y 18. Nuevamente los días 19 y 20 el modelo reproduce valores mayores a los registrados y finalmente los últimos días del mes la salinidad modelada es similar a los valores medidos.

En Punta Brava el período de mejor aproximación del modelo a los datos es entre los días 10 y 18, aunque en este caso el aumento de salinidad registrado al final de este período no se representa exactamente. A diferencia de los otros dos puntos de control ya analizados, durante los últimos días del mes el modelo calcula salinidades menores a las registradas, no obteniéndose durante estos días un buen ajuste.

En la playa Pocitos nuevamente los primeros días del mes los datos muestran salinidades de hasta casi 10 ppm y el modelo calcula salinidad cero. Entre los días 11 y 13 el modelo reproduce valores un poco mayores a los registrados y a partir del día 14 el modelo reproduce aceptablemente el aumento de salinidad registrado aunque los valores exactos que se calculan son escasos. Desde el día 21 y hasta finales del mes el modelo representa aceptablemente la variación de la salinidad medida en este punto de control.

Finalmente en playa Verde se observa que hasta el día 13 el modelo no reproduce la variación de salinidad medida. Por otro lado entre el 14 y el 19 el modelo ajusta aceptablemente el aumento de salinidad registrado. Sin embargo los últimos días del mes los datos muestran un aumento y luego una disminución de la salinidad y el modelo representa un comportamiento similar pero con salinidades menores a las registradas.

En la Tabla 7.4 se muestran las salinidades medias mensuales calculadas con los valores de salinidad registrados y modelados. Como era de esperar en función del ajuste obtenido en este caso, los valores medios obtenidos con el modelo presentan diferencias respecto a los valores medios mensuales de los datos. Las mayores diferencias se dan en Punta Brava y en playa Ramírez.

En la Figura 7.18 se muestra la comparación entre los niveles medidos y modelados en varios puntos de control durante este período de modelación. Se observa en la misma que en Colonia y en Buenos Aires el modelo no ajusta correctamente los niveles registrados en dichas estaciones durante los primeros quince días del mes. En las otras estaciones el ajuste durante esos días no es perfecto pero muestra una mejor calidad. A partir del día 15 los niveles modelados

aproximan correctamente la elevación de la superficie de agua en todos los puntos de control de nivel utilizados.

Punto Medición	Salinidad media mensual	
	Medidas	Modelo
Esollera Sarandí	2,5	2,3
Playa Ramírez	3,0	3,0
Punta Brava	5,0	3,3
Playa Pocitos	4,9	3,7
Playa Verde	7,0	4,8

Tabla 7.4: Valores medios de salinidad registrados y obtenidos con el modelo con vientos de Pontón Recalada durante febrero de 1998 para cada punto de control.

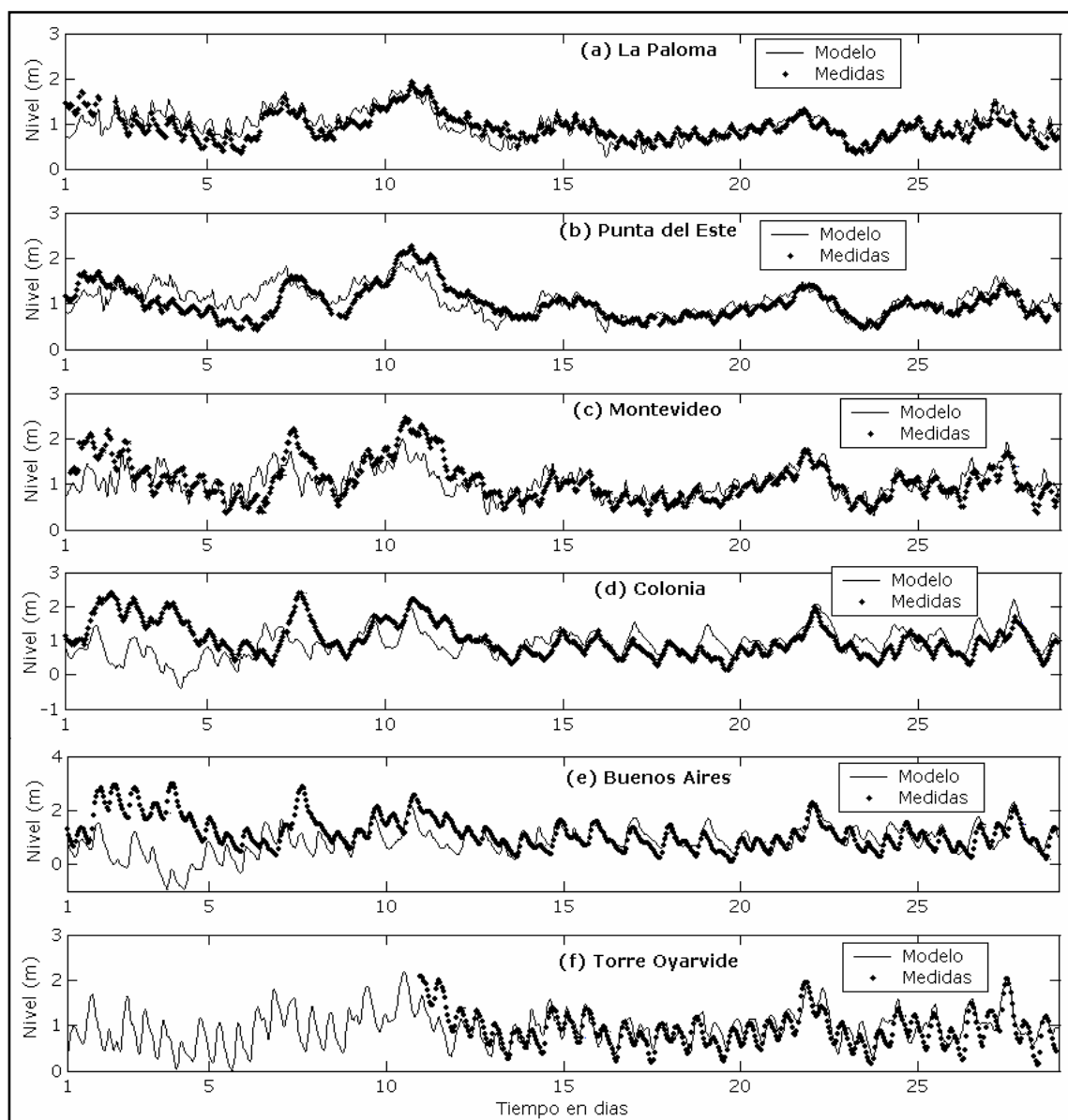


Figura 7.18: Niveles calculados por el modelo con vientos de Pontón Recalada y niveles medidos durante febrero de 1998 en las estaciones de control (a) La Paloma, (b) Punta del Este, (c) Montevideo, (d) Colonia, (e) Buenos Aires y (f) Torre Oyarvide.

7.5.2 - Escenario de alta salinidad

La comparación entre los valores de salinidad medidos y modelados para las estaciones de control Escollera Sarandí, playa Ramírez, Punta Brava, playa Pocitos y playa Verde, durante el mes de marzo del 2000 utilizando en el modelo los vientos registrados en Pontón Recalada se presenta en la Figura 7.19.

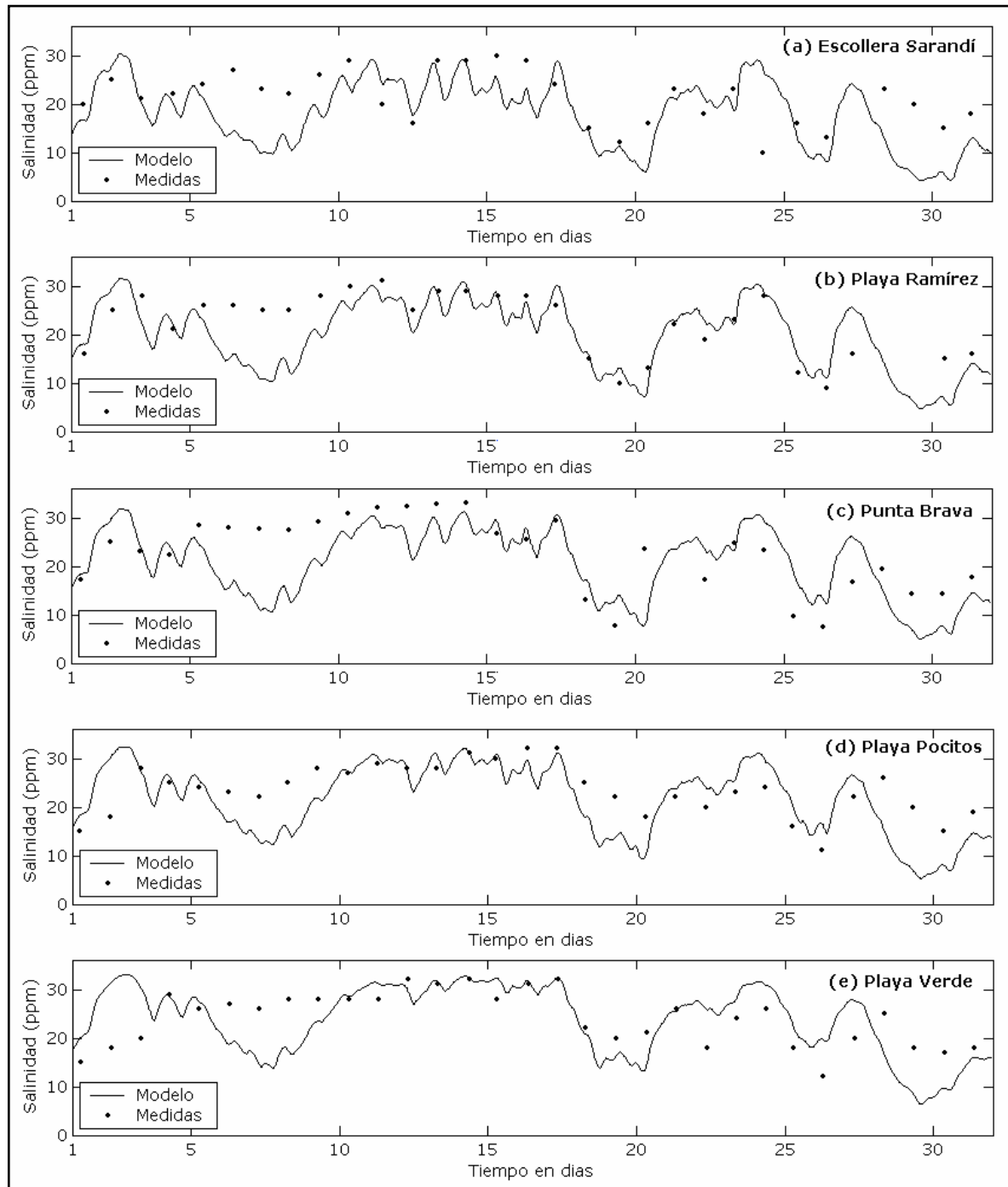


Figura 7.19: Comparación entre los valores de salinidad medidos y calculados por el modelo con vientos de Pontón Recalada en (a) Escollera Sarandí, (b) playa Ramírez, (c) Punta Brava, (d) playa Pocitos y (e) playa Verde, durante marzo del 2000.

En la Escollera Sarandí se observa que el modelo representa en general correctamente la variación temporal de la salinidad. Los primeros 5 días del mes el modelo reproduce la salinidad medida, y luego hasta el día 10 calcula valores de salinidad menores a los medidos, existiendo diferencias de 10 ppm entre el modelo y los datos. Entre el 10 y el 16 de marzo el modelo representa el comportamiento de la salinidad registrada, calculando valores exactos algunos días y valores aproximados en otros. Entre los días 17 y 23 el modelo reproduce casi perfectamente una disminución de salinidad medida y un posterior aumento. Los últimos días el modelo reproduce el comportamiento de la salinidad registrada pero con valores de salinidad menores.

En playa Ramírez se observa también una buena representación de la salinidad medida. Durante los primeros cinco días el modelo reproduce aceptablemente la variación de los datos. Entre los días 5 y 9 de marzo, los valores de salinidad medidos son mayores a los que reproduce el modelo, con una diferencia importante de más de 10 ppm. Entre los días 10 y 26 de este período el modelo representa casi perfectamente los valores registrados de salinidad. Este período incluye una disminución de salinidad desde valores cercanos a 30 ppm hasta valores menores a 10 ppm y otro período de aumento y posterior disminución de la salinidad, los cuales son reproducidos por el modelo. Los últimos días del mes existen pocos datos de salinidad en este punto de control pero se observa un ajuste aceptable.

En Punta Brava no se observa un ajuste tan perfecto como el obtenido en playa Ramírez pero el modelo en general reproduce aceptablemente la variación de salinidad del mes. De igual manera que en los casos anteriores el modelo entre los días 5 y 10 calcula valores menores de salinidad que los registrados, y entre los días 15 y 20 representa casi perfectamente la gran disminución de salinidad registrada. Los últimos días el modelo reproduce la variación general de la salinidad medida pero con diferencias de hasta 5 ppm.

Por último, los resultados obtenidos en playa Pocitos y en playa Verde muestran nuevamente un muy buen ajuste. La variación general de la salinidad se representa correctamente con el modelo, salvo entre los días 6 y 9, y durante los últimos días del mes. En ambos casos el modelo calcula valores menores a los registrados.

En la Tabla 7.5 se muestran los valores medios mensuales de salinidad obtenidos a partir de las mediciones de salinidad y a partir de los resultados del modelo. En la misma se observa que en todos los puntos de control la salinidad media calculada con el modelo es menor a la salinidad media registrada, con diferencias de hasta 3 ppm como se observa en la Escollera Sarandí. Esta diferencia en los valores medios se debe a que en todas las estaciones existen dos períodos de tiempo (entre los días 6 y 9; y a fines del mes, aproximadamente) en los cuales el modelo calcula valores menores de salinidad. De todas formas la variación temporal de salinidad nos muestra que el ajuste obtenido es muy bueno, lo cual confirma que los valores medios deben utilizarse como una referencia.

Punto Medición	Salinidad media mensual	
	Medidas	Modelo
Esollera Sarandí	21,0	18,0
Playa Ramírez	22,0	20,0
Punta Brava	23,0	20,7
Playa Pocitos	23,0	21,7
Playa Verde	24,0	23,8

Tabla 7.5: Valores medios de salinidad registrados y obtenidos con el modelo con vientos de Pontón Recalada durante febrero de 1998 para cada punto de control.

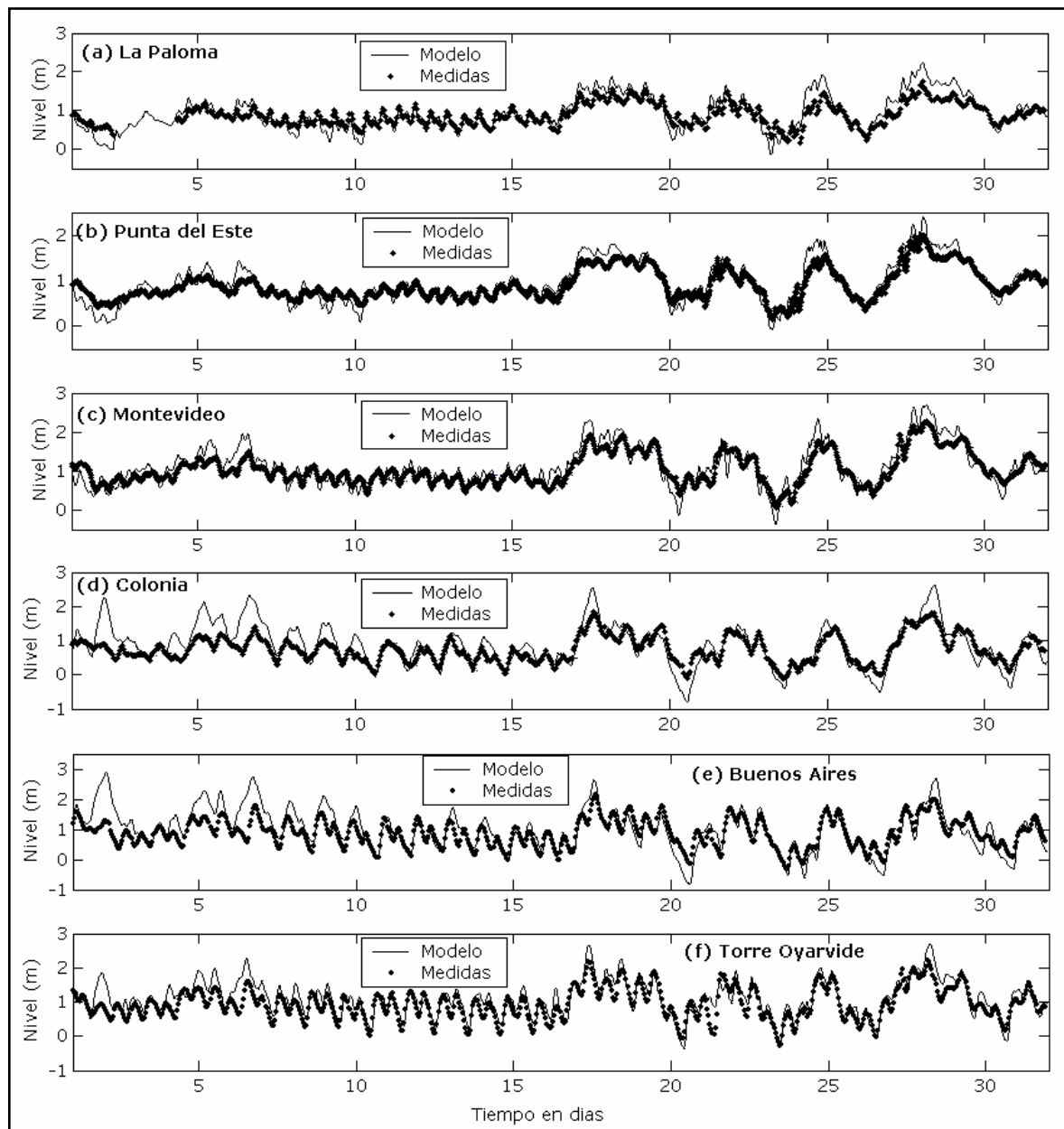


Figura 7.20: Niveles calculados por el modelo con vientos de Pontón Recalada y niveles medidos durante marzo del 2000 en las estaciones de control (a) La Paloma, (b) Punta del Este, (c) Montevideo, (d) Colonia, (e) Buenos Aires y (f) Torre Oyarvide.

Hay que destacar en este caso la buena representación de las grandes variaciones de salinidad registradas en los datos. Esto indica que el modelo es capaz de reproducir confiablemente el campo salino durante el mes de marzo del 2000 utilizando los vientos medidos en Pontón Recalada.

La comparación entre los niveles de agua medidos y modelados en los puntos de control de niveles definidos se muestra en la Figura 7.20. El ajuste de los niveles es aceptable en todos los puntos de control, siendo Buenos Aires y Colonia las estaciones de control en donde los valores modelados se apartan más de los niveles registrados en algunos períodos del mes, principalmente durante los primeros días.

7.6 - Comparación de resultados

Hemos presentado en este capítulo la calibración del modelo numérico considerando por un lado los vientos medidos en Punta Brava y por otro lado los vientos medidos en Pontón Recalada. Los parámetros de cada calibración son diferentes, así como también el ajuste y la representación del campo salino y de la elevación de agua, en cada uno de los dos escenarios utilizados para la calibración. Esto confirma la importancia que tiene el viento en la variabilidad de la salinidad, siendo imprescindible su implementación en cualquier simulación en la cual se pretenda representar la variación diaria de la salinidad.

Para poder analizar las diferencias que se observan en los campos salinos obtenidos con cada una de las versiones del modelo durante el período de baja salinidad, se muestran en la Figura 7.21(a) los vientos medidos en ambas estaciones y en la Figura 7.21(b) la salinidad obtenida con el modelo utilizando ambos vientos, en el punto de control playa Ramírez durante febrero de 1998.

Se puede observar que durante los primeros 10 días del mes la salinidad modelada considerando los vientos de Punta Brava muestra un aumento y una disminución de la misma, mientras que la salinidad modelada con los vientos de Pontón Recalada permanece constante y casi igual a cero. Los datos en cambio muestran un aumento de salinidad, aunque el comportamiento no es exactamente igual al determinado por el modelo al utilizar los vientos de Punta Brava. Por otro lado la comparación de los vientos nos muestra que desde el día 2 en adelante los vientos registrados en Punta Brava provienen del Este y Noreste, mientras que los registrados en Pontón Recalada provienen del Sur. Esto significa que los vientos registrados estos días en ambas estaciones son muy diferentes, lo que sin duda influye en el campo salino modelado y en la aproximación de los datos medidos en ambos casos. Entre los días 10 y 15 aproximadamente la salinidad calculada con los vientos de Pontón Recalada es un poco mayor a la calculada con los vientos de Punta Brava. Los vientos durante ese período muestran direcciones hacia el Norte en Punta Brava y vientos hacia el Este en Pontón Recalada, lo que sin duda afecta la salinidad y por eso las diferencias en los modelos. Entre el 15 y el 20 de febrero de 1998 se midió un aumento de salinidad y una posterior disminución que es representada por los dos modelos. En este caso se

observa que en ambas estaciones de medición se registraron en este período fuertes vientos provenientes del sector Noreste principalmente. Hacia fines del mes existen algunas diferencias en los vientos que producen salinidades modeladas con algunas diferencias, siendo la salinidad calculada con los vientos de Punta Brava mayor a la calculada con los vientos de Pontón Recalada.

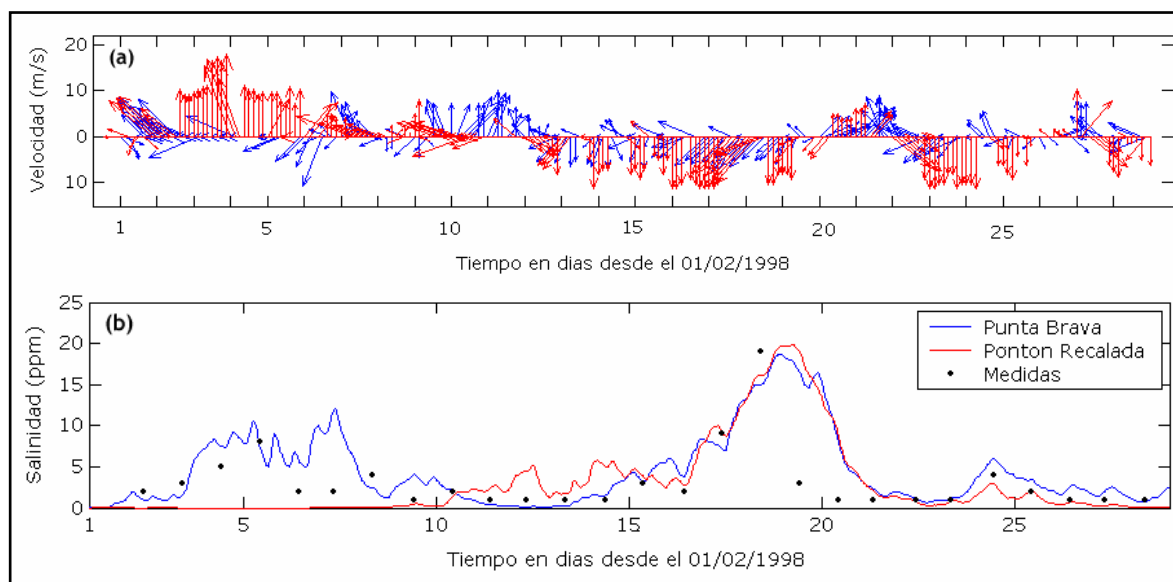


Figura 7.21: Comparación entre (a) los vientos registrados en Punta Brava y Pontón Recalada y (b) la salinidad modelada con ambos vientos en playa Ramírez, durante febrero de 1998.

La comparación de la salinidad modelada utilizando uno u otro viento en las restantes estaciones de control muestra un comportamiento similar al que se observa en playa Ramírez. Las mediciones de viento de Punta Brava favorecen la representación del campo salino en la costa uruguaya durante los primeros días del mes, frente a los registros de Pontón Recalada. Esto indica que durante la primer parte del mes el campo salino en esta zona estuvo afectado principalmente por vientos del sector Este, como muestran los vientos de Punta Brava. Durante el resto del mes las diferencias en los registros no son tan amplias y el campo salino es representado correctamente a partir de las dos series de vientos. A partir de esta comparación se puede afirmar también que la incorrecta representación del campo salino durante los primeros días del mes utilizando los vientos registrados en Pontón Recalada no es un problema de la calibración sino de los datos de vientos ingresados al modelo. A partir de dicha serie de datos hemos visto que es imposible obtener un comportamiento como el que muestran los datos imponiendo en el modelo vientos del sector Sur, sino que dicho comportamiento se obtiene utilizando vientos provenientes del Este.

Respecto a la aproximación de los niveles registrados en los puntos de control considerados se mencionó anteriormente a partir de la Figura 7.14 que el ajuste obtenido con los vientos de Punta Brava fue aceptable. Por otro lado, se observa en la Figura 7.18 que al utilizar los vientos de Pontón Recalada la aproximación de los niveles reales durante los primeros quince días del mes presenta algunas diferencias con los valores registrados, siendo la aproximación durante el resto

del mes aceptable y similar a la obtenida al utilizar los vientos de Punta Brava. Durante dicho período los vientos registrados en las dos estaciones son diferentes, lo cual se observa en la Figura 7.21(a). Parece ser entonces que los vientos fuertes de hasta 20 m/s del sector Sur registrados en Pontón Recalada durante los primeros días del mes sean los causantes de que los niveles calculados por el modelo se aparten de los niveles medidos. Aunque las series temporales de niveles impuestas al modelo fueron las mismas en ambas simulaciones, los vientos de Pontón Recalada tuvieron una afectación desfavorable en la elevación de la superficie de agua los primeros días del mes.

En el escenario de salinidades altas formado por el mes de marzo del 2000, la comparación de la salinidad calculada con el modelo utilizando los vientos de Punta Brava y utilizando los vientos de Pontón Recalada muestra también en algunos casos algunas diferencias. En la Figura 7.22(a) se muestran los vientos medidos en ambas estaciones y en la Figura 7.22(b) se muestra la salinidad obtenida con el modelo en playa Ramírez utilizando ambos vientos durante marzo del 2000.

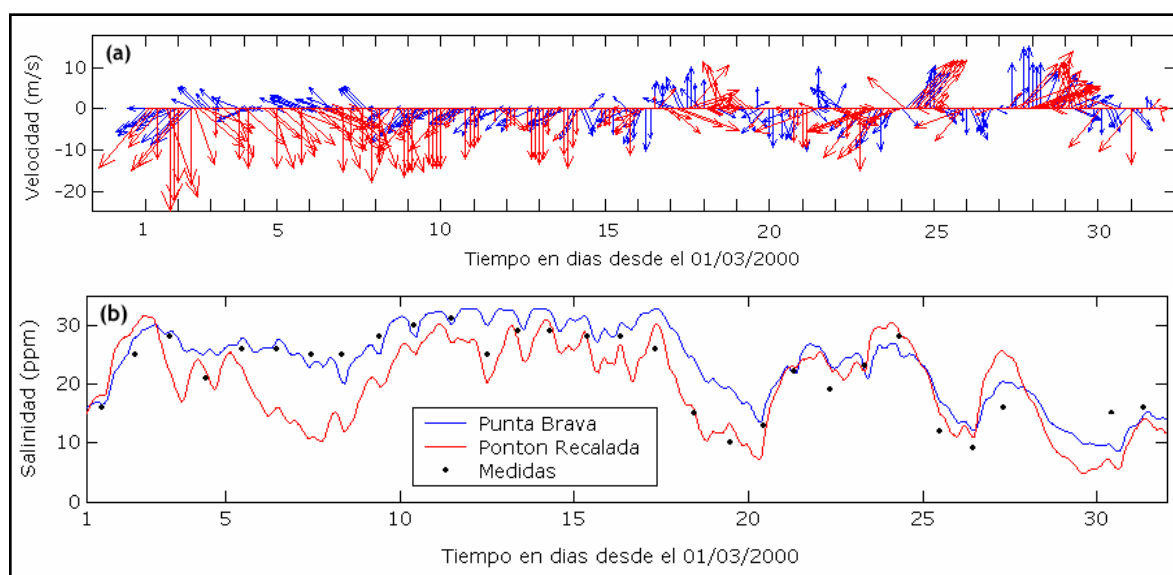


Figura 7.22: Comparación entre (a) los vientos registrados en Punta Brava y Pontón Recalada y (b) la salinidad modelada con ambos vientos en playa Ramírez, durante marzo del 2000.

Se observa en este punto de control que la salinidad calculada con el modelo es distinta según el viento utilizado y que en algunos casos se aproxima mejor la salinidad con los vientos de Punta Brava y en otros casos con los vientos de Pontón Recalada. Estas diferencias en el campo salino se explican a partir de la comparación de las series de vientos, donde se observa que los vientos de dirección predominante Sur registrados en Pontón Recalada durante los primeros días generan salinidades menores en la costa uruguaya que los vientos del sector Este registrados en Punta Brava durante esos días. Esto genera que la modelación con los vientos de Punta Brava represente las salinidades medidas entre los días 6 y 9, mientras que con los vientos de Pontón Recalada las diferencias en ese período entre el modelo y los datos son del orden de 10 ppm. Por

otro lado se observa que los vientos del sector Oeste registrados en Pontón Recalada entre los días 17 y 20 del mes aproximan perfectamente la disminución de la salinidad que se observa en los datos esos días. En Punta Brava los vientos durante ese período fueron del sector Sur y generaron salinidades mayores a las registradas. Entre los días 20 y 28 en este punto de control las dos simulaciones aproximan correctamente las variaciones de salinidad. Sin embargo cuando se comparan los resultados obtenidos para los restantes puntos de medición (Figura 7.15 y Figura 7.19) se observa que aunque ambas representaciones son aceptables, la variación de la salinidad esos días se representa mejor utilizando los vientos de Pontón Recalada. Los últimos días del mes en cambio los vientos de Pontón Recalada generan salinidades menores a las registradas y se aproximan mejor los valores obtenidos utilizando los vientos de Punta Brava.

El ajuste de los niveles reales medidos en las estaciones de control obtenido utilizando los vientos de Punta Brava (Figura 7.16) y con los vientos de Pontón Recalada (Figura 7.20) son aceptables y similares entre sí. A diferencia del caso anterior, aunque los vientos registrados en ambas estaciones no son iguales, los mismos no tuvieron grandes afectaciones en los niveles modelados y se obtuvo una representación aceptable en ambos casos.

Capítulo 8

VERIFICACION DEL MODELO

Durante la etapa de calibración los parámetros del modelo fueron ajustados para representar correctamente las variables del sistema. En la etapa de verificación o validación del modelo, no se modifican los parámetros anteriormente determinados y se evalúa la representación de la realidad obtenida con el modelo en una situación distinta a las consideradas durante la calibración. De esta forma, si la calibración del modelo es correcta, los valores reales deberán ser correctamente reproducidos por el modelo. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la verificación de las dos versiones calibradas del modelo.

8.1 - Características generales de la verificación

El proceso de verificación de las dos versiones calibradas del modelo, con los vientos de Punta Brava y los vientos de Pontón Recalada, se realizó simulando dos períodos de tiempo y comparando los valores de salinidad modelados y medidos. A partir de esta comparación se evaluó la validez de la aproximación numérica. Los dos períodos de tiempo seleccionados fueron los meses de junio de 1997 y enero de 1999. La elección de estos dos escenarios estuvo condicionada principalmente por la disponibilidad de los datos reales necesarios para realizar una simulación.

Se utilizaron nuevamente los registros de salinidad de la Intendencia Municipal de Montevideo en la Escollera Sarandí, playa Ramírez, playa Pocitos y playa Verde, para comparar con los resultados del modelo. En esta etapa no se utilizaron mediciones de salinidad en Punta Brava ya que no se pudo acceder a los registros correspondientes a los períodos seleccionados. Los puntos de control utilizados son los mismos que se utilizaron en la etapa de calibración, cuya ubicación en la malla de cálculo se presentó en la Figura 7.1.

La etapa de verificación se realizó por un lado considerando los vientos de Punta Brava y los parámetros determinados en la calibración; y por otro lado con los vientos de Pontón Recalada y sus parámetros correspondientes. Cada período fue simulado teniendo en cuenta el período mínimo de modelación previa de tres meses. Aunque la modelación de los períodos seleccionados se realizó considerando la marea real, no se presenta una comparación de los niveles medidos y modelados porque no se tuvo acceso a los niveles medidos en las estaciones costeras durante estos períodos. Teniendo esto en cuenta la verificación que se presenta a continuación es una validación de la calibración del campo salino, aunque se puede suponer a partir de los resultados que la modelación hidrodinámica sigue siendo correcta.

De forma similar a lo observado en otros períodos de tiempo, los valores de salinidad registrados en Montevideo durante los dos períodos utilizados en la verificación muestran una

variabilidad mensual. En la Tabla 8.1 se presentan los valores medios mensuales de salinidad en los cuatro puntos de control, obtenidos a partir de las mediciones, para las dos situaciones que se utilizaron para realizar la verificación del modelo. Durante junio de 1997 se registraron salinidades mínimas de 3 ppm y máximas de 20 ppm. En el mes de enero de 1999 la salinidad mínima registrada fue 2 ppm en playa Ramírez y la máxima 30 ppm en playa Verde.

Punto Medición	Salinidad media mensual	
	Junio 1997	Enero 1999
Escollera Sarandí	8,9	14,3
Playa Ramírez	8,8	14,8
Playa Pocitos	11,5	15,7
Playa Verde	11,2	18,2

Tabla 8.1: Valores medios mensuales de salinidad en los puntos de medición durante los meses utilizados para la verificación.

Durante el invierno las mediciones diarias de salinidad de la IMM se realizan con menos frecuencia que en verano. Por esto para comparar los resultados de junio de 1997 solamente se cuenta con 20 registros y en cambio para enero de 1999 se tienen 28 datos. Esto influye en la evaluación que se haga sobre la representación del modelo de la situación de junio de 1997, pues se tienen menos valores para comparar en relación a los otros casos. No obstante, este período de verificación fue utilizado de forma de evaluar el modelo en una situación de invierno, a diferencia de los otros períodos modelados que corresponden a meses de verano.

Por otro lado se realizó una verificación de las versiones calibradas del modelo utilizando los registros de salinidad que se obtuvieron en diferentes campañas de medición a lo largo de varias transectas en el Río de la Plata. Los resultados obtenidos se presentan en el Anexo 3.

8.2 - Características de los períodos de verificación

Los dos períodos de tiempo definidos para realizar la verificación o validación del modelo calibrado son los meses de junio de 1997 y enero de 1999. Sin embargo, como se presentó en 6.6, las simulaciones necesitan un período de modelación previo mínimo de tres meses para obtener una solución independiente de la condición inicial de salinidad utilizada. Debido a esto, la representación de cada uno de los escenarios está formada por un período total de modelación de cuatro meses. Durante los días previos al período estricto de validación, la modelación se realizó considerando el caudal fluvial y la marea astronómica correspondientes a cada período. El viento real se simuló en el tercer mes previo al mes utilizado en la verificación y en la modelación del propio mes de comparación, en el cual se simuló también la marea real. Se presentan a continuación las características de los forzantes durante los dos períodos de tiempo utilizados en la etapa de verificación.

8.2.1 - Período Junio 1997

El período junio de 1997 está definido por los meses de marzo, abril, mayo y junio de 1997. Este período de tiempo está caracterizado por valores de salinidades medias a bajas en la zona de Montevideo, con un valor promedio entre 7 y 10 ppm según la ubicación. Los caudales fluviales descargados en el Río de la Plata por los ríos Uruguay y Paraná durante este período corresponden a valores medios, siendo el promedio total del caudal igual a $25.0000 \text{ m}^3/\text{s}$.

El período de modelación previa está formado por los tres primeros meses, es decir el período marzo – mayo de 1997. Los meses de marzo y abril se simularon considerando el caudal fluvial y la marea astronómica correspondientes a cada paso de tiempo. El mes de Mayo de 1997 se simuló considerando además de estos forzantes, el viento real. Finalmente el mes de junio de 1997 se simuló considerando la marea real a partir de las alturas de niveles de marea medidas en Mar del Plata y en La Paloma durante ese mes, además del caudal fluvial y viento real correspondientes a dicho período.

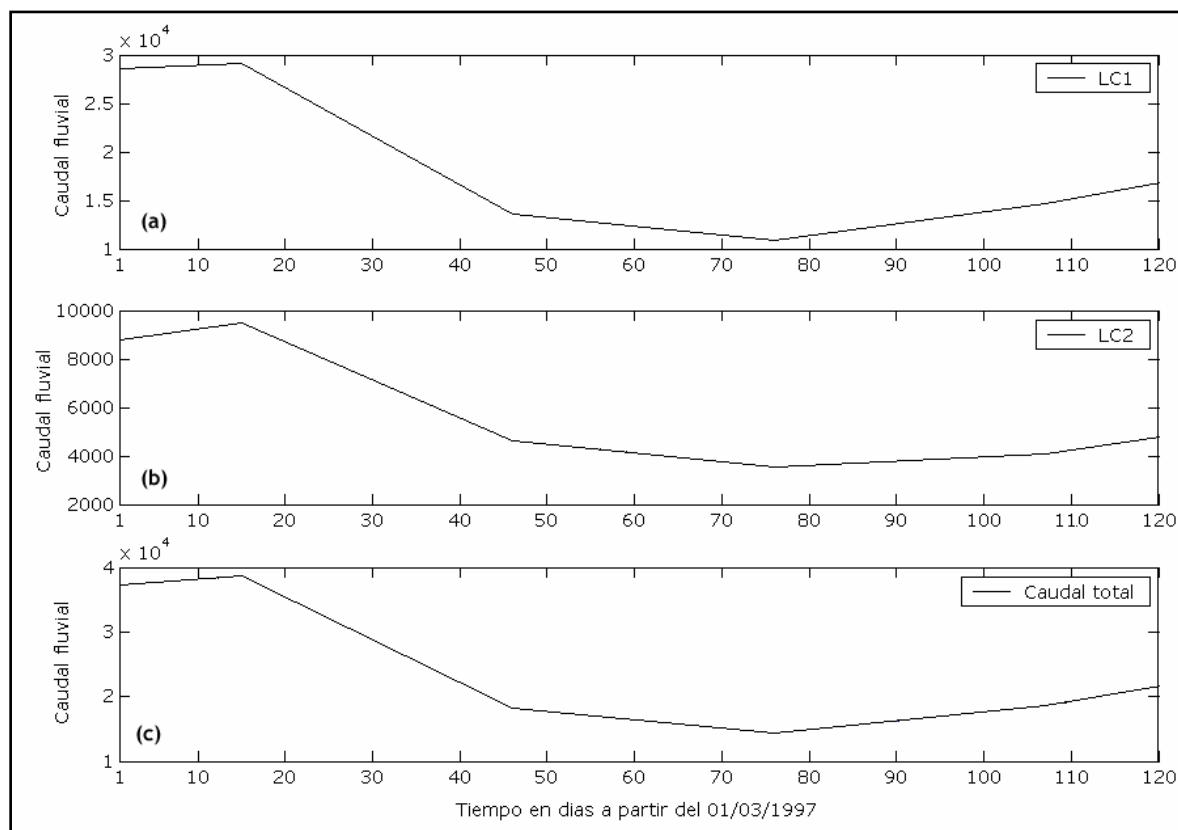


Figura 8.1: Caudal fluvial (m^3/s) ingresado al modelo en función del tiempo durante el período de verificación junio 1997. (a) Caudal de los ríos Uruguay y Paraná-Guazú, (b) Caudal del río Paraná Las Palmas y (c) Caudal fluvial total.

La variación temporal del caudal fluvial ingresado al modelo correspondiente a este período de simulación se presenta en la Figura 8.1. Como se mencionó anteriormente el modelo interpola linealmente a partir de los caudales medios mensuales. Se observa en la Figura 8.1 que durante los primeros cuarenta días del período ocurre una disminución del caudal fluvial, desde valores

cercanos a $38.000 \text{ m}^3/\text{s}$ a valores menores a $20.000 \text{ m}^3/\text{s}$. El resto del período el caudal fluvial se mantiene bajo con un aumento leve hacia finales del período. Se puede observar también que el comportamiento del caudal fluvial en los dos puntos de ingreso al Río de la Plata es similar.

Durante este período de modelación la marea real se utilizó como forzante en el mes de junio de 1997 y se impuso en las otras simulaciones la condición de borde oceánica de marea astronómica correspondiente a cada período. La marea real se simula ingresando las series de niveles registrados durante este mes en las estaciones de Mar del Plata y La Paloma, las cuales se presentan en la Figura 8.2. En la misma se observa que los niveles y la amplitud de los mismos son mayores en Mar del Plata que en La Paloma como se ha observado en otros períodos. La variación temporal durante este mes muestra un aumento del nivel medio hacia fines del mes, en las dos estaciones de medición.

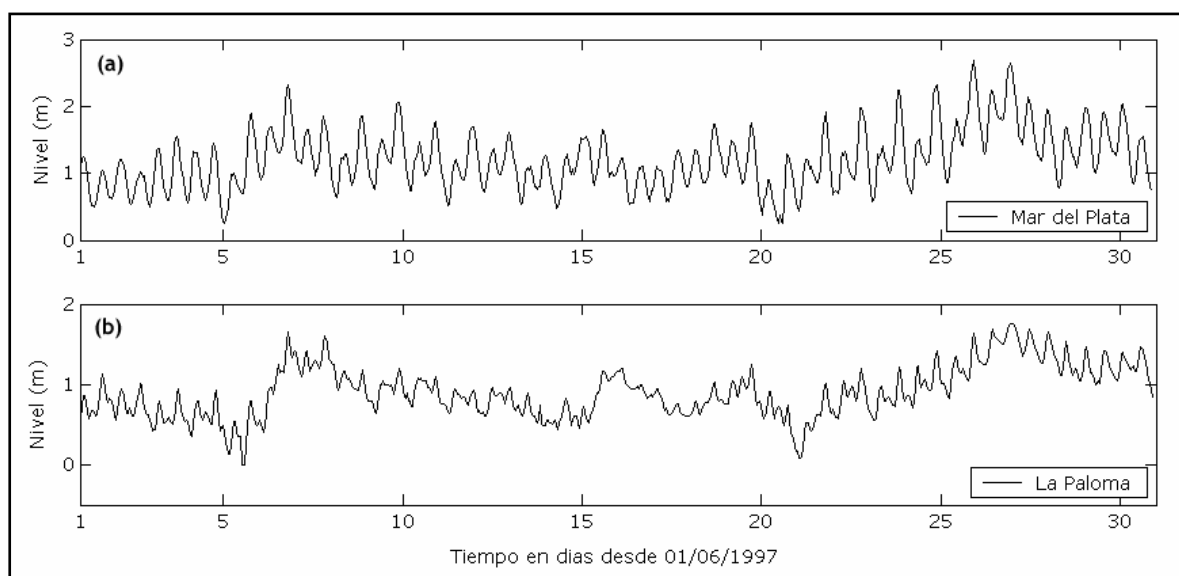


Figura 8.2: Niveles de marea registrados en (a) Mar del Plata y en (b) La Paloma durante junio de 1997.

Los vientos correspondientes a los meses de mayo y junio de 1997 medidos en Punta Brava ingresados al modelo durante esta etapa de verificación del modelo se presentan en la Figura 8.3. Se observa en la misma que los vientos durante mayo de 1997 provienen principalmente del sector Norte, existiendo dos períodos marcados de vientos provenientes del sector Suroeste de intensidad importante. Durante el mes de junio de 1997 los vientos son más variados, existiendo períodos con vientos provenientes del sector Noroeste, Norte y Noreste, pero también se registraron vientos fuertes del sector Suroeste y Sur.

Para realizar la verificación de la versión del modelo que utiliza los vientos medidos en Pontón Recalada se utilizaron los vientos registrados en dicha estación durante mayo y junio de 1997. La variación temporal de la dirección y magnitud de éstos vientos a lo largo de estos dos meses se presenta en la Figura 8.4.

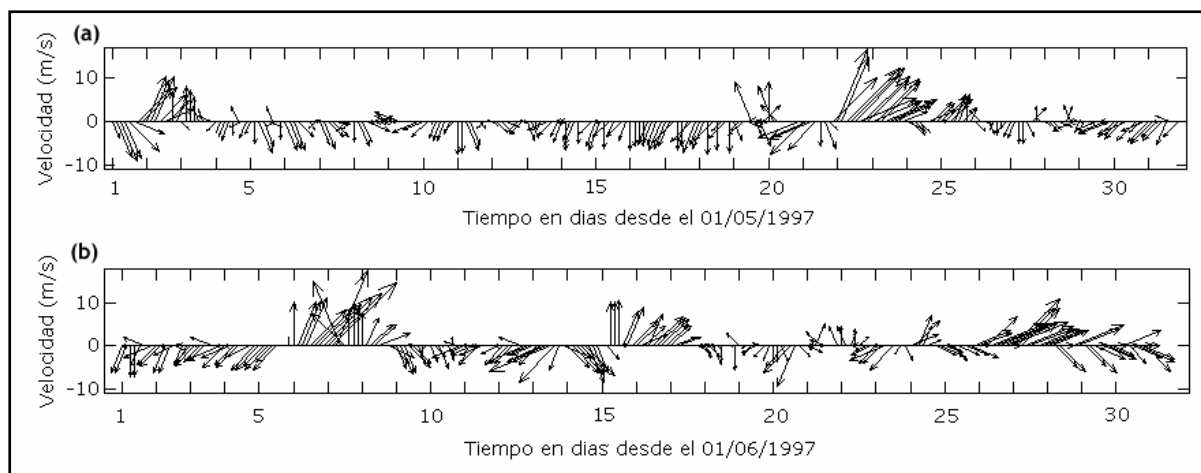


Figura 8.3: Velocidad y dirección del viento registrado en Punta Brava durante (a) mayo de 1997 y (b) junio de 1997.

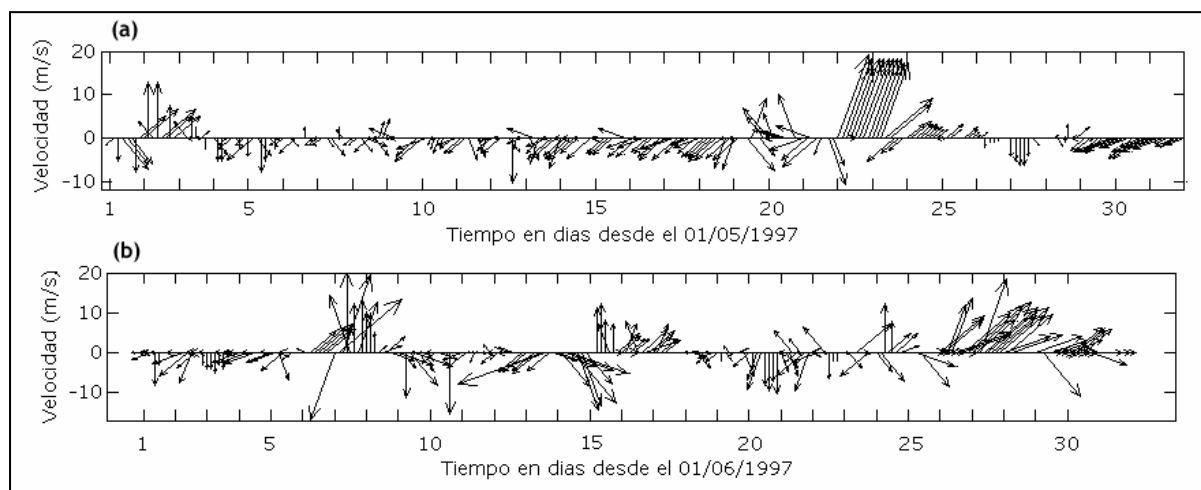


Figura 8.4: Velocidad y dirección del viento registrado en Pontón Recalada durante (a) mayo de 1997 y (b) junio de 1997.

Los vientos registrados en Pontón Recalada muestran para mayo de 1997 un comportamiento similar a los vientos registrados en Punta Brava. Durante este mes los vientos principalmente provienen del sector Norte y Noreste, con un evento extremo registrado alrededor del día 22, donde ocurrieron fuertes vientos del Sector Sur-Suroeste. Durante el mes de junio de 1997 la variación temporal de los vientos es similar a la registrada en la estación de medición Punta Brava, aunque las intensidades registradas fueron mayores, como sucede habitualmente entre estas dos estaciones de medición según se discutió en 3.5.

8.2.2 - Período Enero 1999

El período enero de 1999 está definido por los meses de octubre, noviembre y diciembre de 1998 y enero de 1999. Este período de tiempo está caracterizado por valores de salinidades medias registradas en la costa de Montevideo un poco mayores a las del período anterior, entre 9 y 14 ppm, en función de la ubicación. Por otro lado el caudal fluvial total que ingresa al Río de la Plata durante este período tiene una media de aproximadamente 27.000 m³/s.

El período de modelación previa está formado por los tres primeros meses, es decir el período octubre - diciembre de 1998. Los primeros dos meses, octubre y noviembre, se simularon considerando el caudal fluvial y la marea astronómica correspondientes a dicho período. En la modelación de los meses de diciembre de 1998 y enero de 1999 se consideró además del caudal fluvial y la marea astronómica el viento real. En este caso no fue posible realizar la simulación del mes de enero de 1999 con marea real ya que durante ese período el Servicio de Hidrografía Naval Argentino (SHN) no cuenta con mediciones de niveles en Mar del Plata.

En este caso se ingresaron al modelo los caudales medios mensuales correspondientes a setiembre, octubre, noviembre y diciembre de 1998, y enero y febrero de 1999. El modelo a partir de éstos valores calculó el caudal fluvial para cada instante de tiempo utilizando una interpolación lineal. En la Figura 8.5 se muestra la variación temporal de las descargas fluviales en el Río de la Plata calculadas de esta forma, durante el período de verificación enero 1999. Se observa en la misma que durante los primeros dos meses el caudal total es mayor a $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$ y disminuye hasta valores cercanos a los $15.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Durante enero de 1999 el caudal fluvial total es bajo, menor a $20.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

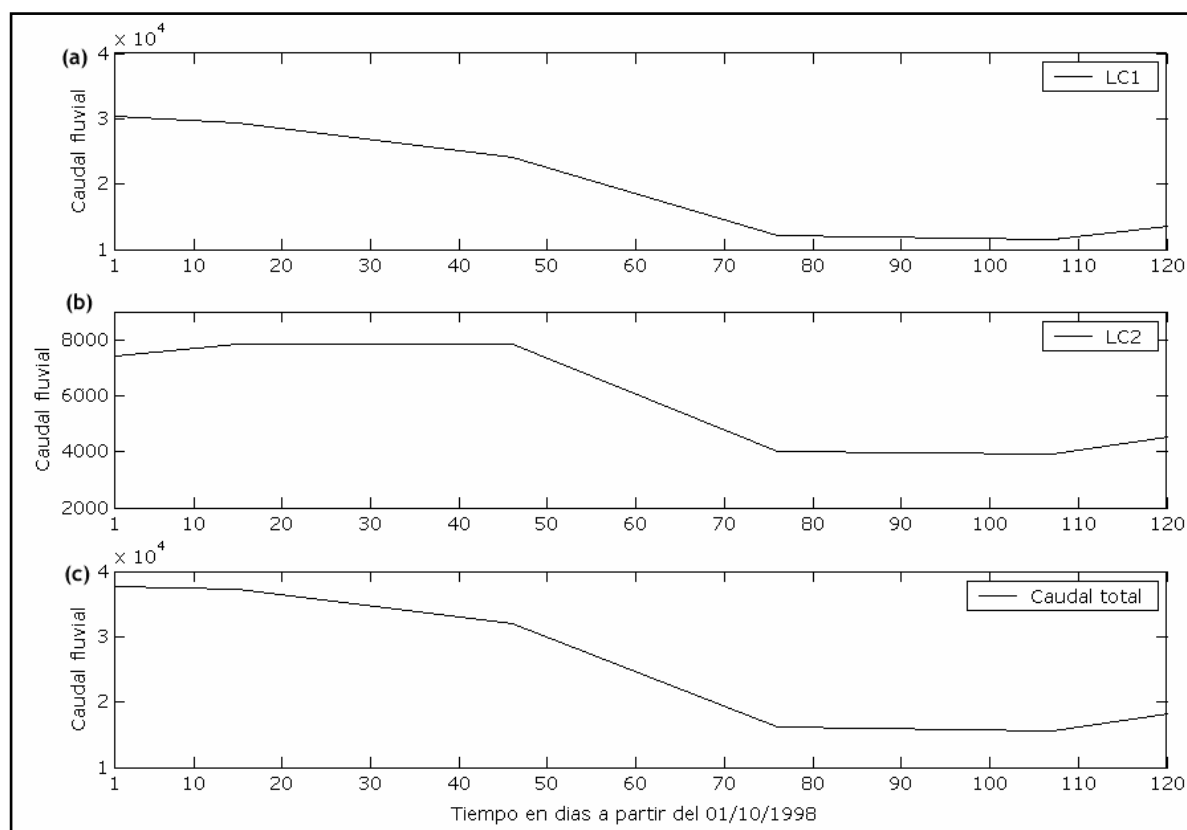


Figura 8.5: Caudal fluvial (m^3/s) ingresado al modelo en función del tiempo durante el período de verificación enero 1999. (a) Caudal de los ríos Uruguay y Paraná-Guazú, (b) Caudal del río Paraná Las Palmas y (c) Caudal fluvial total.

Como se mencionó anteriormente los meses de diciembre de 1998 y enero de 1999 se simularon considerando el efecto del viento real. En la Figura 8.6 se muestra la variación temporal

del viento medido en Punta Brava durante estos dos meses. Se observa en la misma que durante diciembre de 1998 y enero de 1999 no hubieron direcciones preponderantes del viento y que hubieron períodos de vientos fuertes del sector Sur, Suroeste y Sureste.

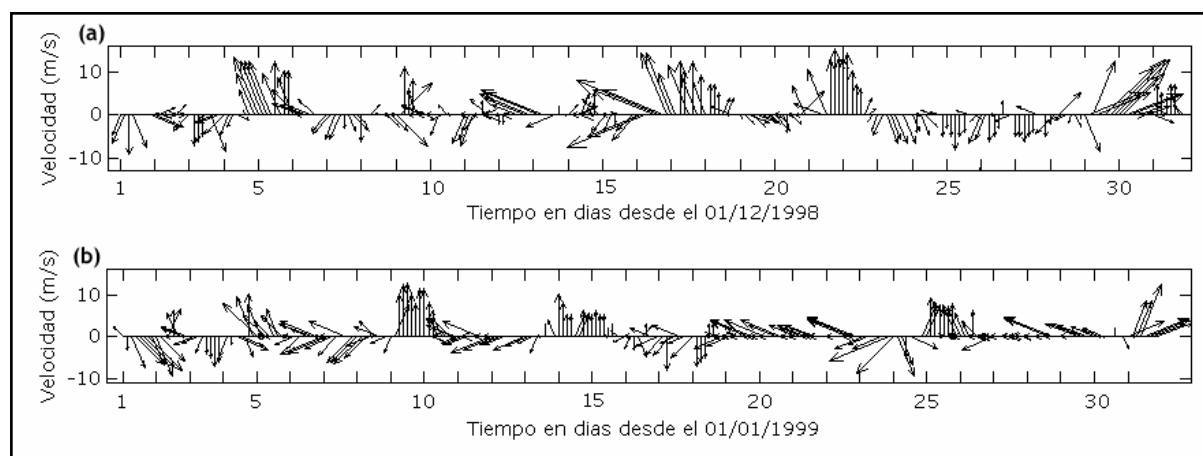


Figura 8.6: Velocidad y dirección del viento registrado en Punta Brava durante (a) diciembre de 1998 y (b) enero de 1999.

La variación temporal del viento registrado en Pontón Recalada durante los meses de diciembre de 1998 y enero de 1999 se presentan en la Figura 8.7. Estos registros de viento muestran una gran variabilidad a lo largo de los dos meses presentados y una gran intensidad, existiendo en algunos casos intensidades mayores a 20 m/s.

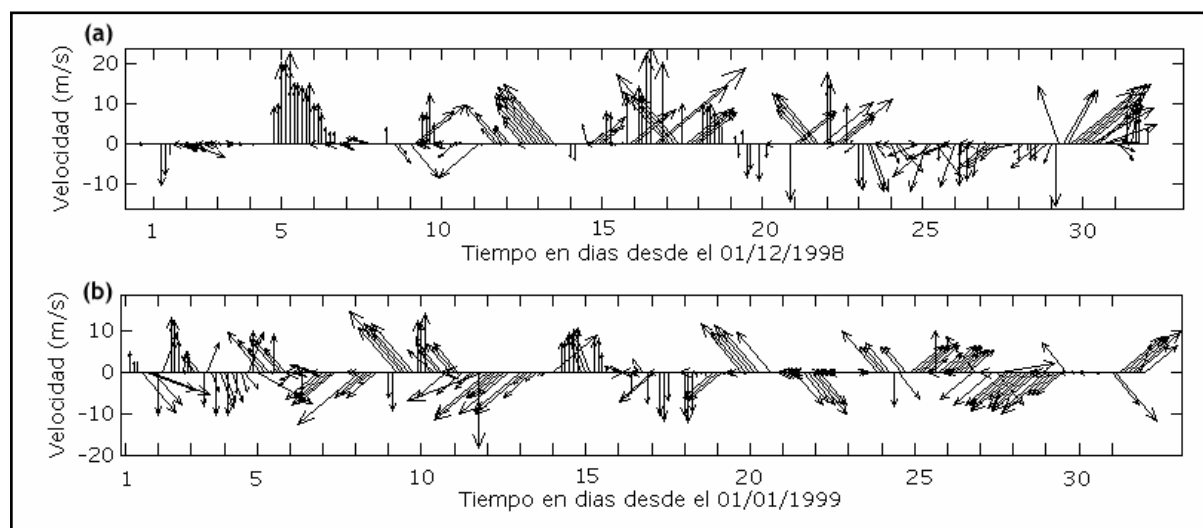


Figura 8.7: Velocidad y dirección del viento registrado en Pontón Recalada durante (a) diciembre de 1998 y (b) enero de 1999.

8.3 - Resultados obtenidos – Vientos Punta Brava

En este punto se presentan los resultados obtenidos en la verificación de la versión del modelo que utiliza los vientos medidos en Punta Brava como forzante. En el Capítulo 7 se presentaron los resultados obtenidos durante la calibración del mismo y los parámetros de ajuste

determinados durante dicho proceso. En esta etapa se comparan los valores de salinidad modelados y medidos en la costa de Montevideo para cada uno de los períodos anteriormente definidos. Como se observa a continuación, los resultados obtenidos en esta etapa de verificación del modelo que utiliza los vientos de Punta Brava son aceptables, pues el modelo reproduce correctamente la variación temporal de los registros de salinidad en los cuatro puntos de control utilizados en los dos períodos seleccionados para realizar esta etapa.

8.3.1 - Período Junio 1997

Luego de realizar la simulación total de cuatro meses considerando los forzantes definidos en 8.2.1 se obtuvieron los resultados que se compararon con las salinidad medidas en la costa de Montevideo y que se muestran en la Figura 8.8.

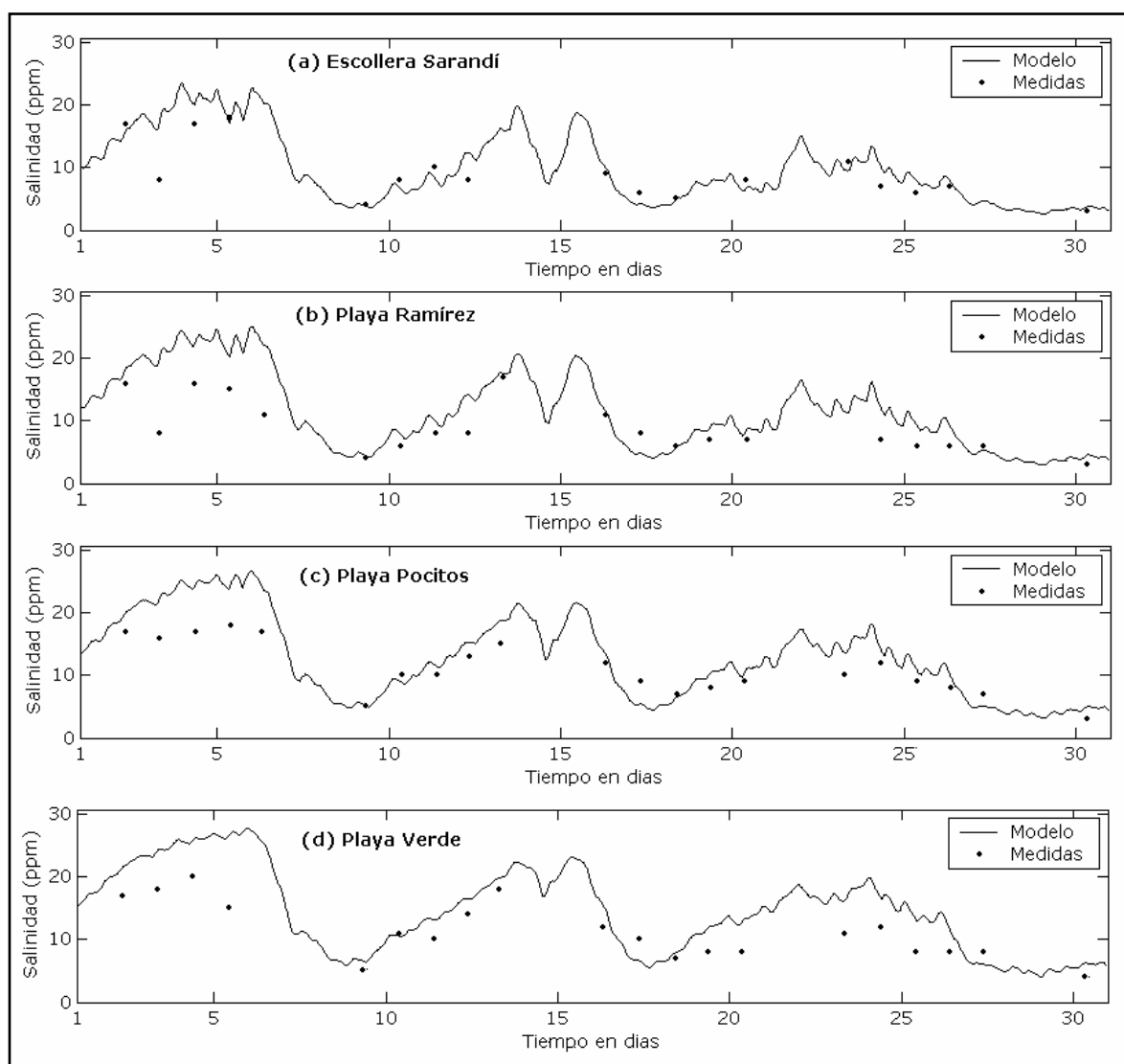


Figura 8.8: Comparación entre los valores de salinidad medidos y calculados por el modelo con vientos de Punta Brava en (a) Escollera Sarandí, (b) Playa Ramírez, (c) Playa Pocitos y (d) Playa Verde, durante junio de 1997.

En general se observa en la Figura 8.8 que los valores de salinidad obtenidos con el modelo reproducen la variación temporal de los datos en los puntos de control. La etapa de verificación de este período es considerada entonces aceptable y es importante recordar que durante este período el número de datos disponible es chico. En definitiva, los resultados presentados muestran que la representación del modelo con vientos de Punta Brava de los valores de salinidad registrados durante junio de 1997 es muy satisfactoria.

En la Escollera Sarandí se puede observar que solamente el día 3 los resultados del modelo se apartan considerablemente de los datos, aproximadamente 10 ppm. Durante el resto del mes los valores modelados reproducen perfectamente las salinidades medidas.

En la playa Ramírez el ajuste de los datos durante los primeros días del mes es de menor calidad que en la Escollera Sarandí. Aunque el día 3 nuevamente se registra la mayor diferencia entre el modelo y los datos, durante los días 4, 5 y 6 las diferencias son mayores a 5 ppm. Por otro lado, entre los días 9 y 14 el modelo reproduce casi perfectamente el aumento de salinidad registrado en los datos. El resto del mes la salinidad calculada con el modelo se aproxima a las salinidades medidas.

En playa Pocitos los resultados son similares a los obtenidos en playa Ramírez. Los primeros días el modelo calcula salinidades mayores a las registradas, pero entre los días 9 y 13 reproduce perfectamente un aumento de salinidad registrado de más de 10 ppm. Los últimos 15 días del mes el modelo reproduce muy aceptablemente las variaciones que muestran los datos.

Por último en playa Verde la aproximación de la salinidad obtenida con el modelo es de menor calidad que en los otros puntos de control. No solamente los primeros días el modelo calcula salinidades mayores a las medidas sino que también a partir del día 19 las diferencias entre el modelo y los datos son del orden de 5 ppm. Sin embargo el modelo reproduce la variación de salinidad registrada alrededor del día 10.

Punto Medición	Salinidad media mensual	
	Medidas	Modelo
Escollera Sarandí	8,9	9,9
Playa Ramírez	8,8	11,5
Playa Pocitos	11,5	12,9
Playa Verde	11,2	14,6

Tabla 8.2: Valores medios de salinidad durante junio de 1997 registrados y obtenidos con el modelo con vientos de Punta Brava para cada punto de control.

En la Tabla 8.2 se muestran los valores medios mensuales de salinidad para junio de 1997 calculados con los datos y con los resultados del modelo. Se observa que en los cuatro puntos de control el valor medio mensual calculado con el modelo es mayor al valor determinado con los

datos, siendo la mayor diferencia de 3 ppm en Playa Verde. En este punto de control fue donde se observó el peor ajuste de los datos.

8.3.2 - Período Enero 1999

La comparación de la salinidad medida y obtenida con el modelo en los cuatro puntos de control para el mes de enero de 1999 se presenta en la Figura 8.9. En términos generales el modelo reproduce muy aceptablemente la alta variación de los datos a lo largo del mes.

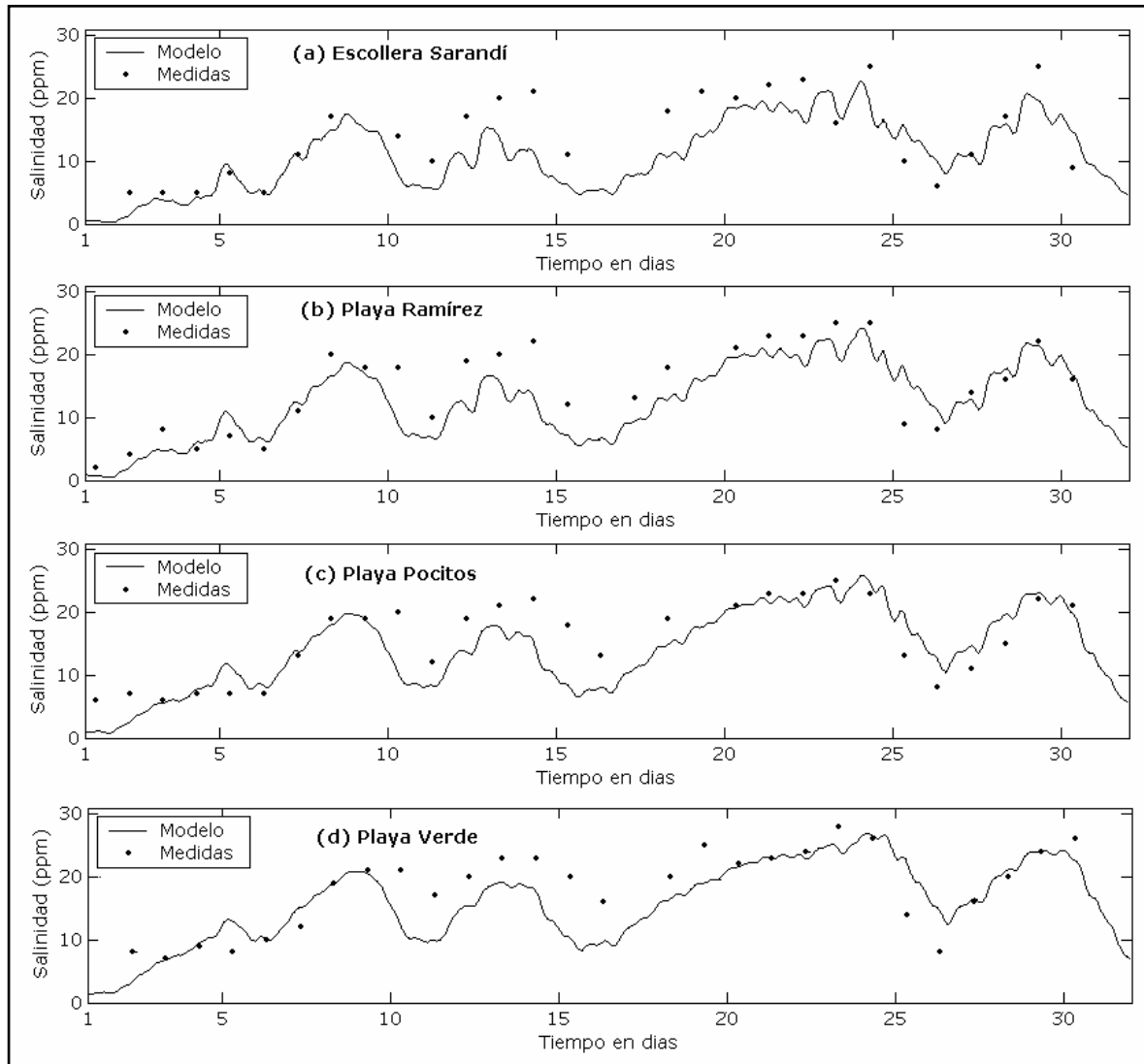


Figura 8.9: Comparación entre los valores de salinidad medidos y calculados por el modelo con vientos de Punta Brava en (a) Escollera Sarandí, (b) Playa Ramírez, (c) Playa Pocitos y (d) Playa Verde, durante enero de 1999.

En la Escollera Sarandí hasta el día 8 el modelo reproduce perfectamente el aumento de salinidad de más de 15 ppm. Entre el 10 y el 20 el comportamiento de los valores modelados es el mismo que el determinado por los datos, aunque se reproducen valores menores de salinidad. Los últimos días del mes el modelo reproduce la variación de salinidad y algunos valores exactos.

En playa Ramírez durante los primeros días el modelo representa correctamente el aumento de salinidad registrado en los datos. Entre los días 10 y 18 el modelo calcula salinidades un poco menores a los datos, pero el comportamiento de los datos se representa correctamente. Los últimos diez días del mes el modelo representa casi perfectamente la variación de los datos, reproduciendo variaciones registradas de más de 15 ppm.

En playa Pocitos el ajuste obtenido es muy similar al de Playa Ramírez. El modelo reproduce correctamente la variación de los datos de salinidad salvo entre los días 10 y 16 donde reproduce valores un poco menores a los registrados.

Por último en playa Verde aunque el modelo reproduce el comportamiento de los datos medidos en este punto, en algunos casos representa valores menores a los registrados (período entre los días 10 y 19) y en otros calcula valores mayores (días 25 y 26).

Estos resultados se observan también en la comparación de las salinidades medias mensuales que se presentan en la Tabla 8.3. Los valores medios calculados con los resultados del modelo son menores a los determinados con los datos en todos los puntos de control, siendo la mayor diferencia 3,3 ppm en la Escollera Sarandí.

Punto Medición	Salinidad media mensual	
	Medidas	Modelo
Escollera Sarandí	14,3	11,0
Playa Ramírez	14,8	12,6
Playa Pocitos	15,7	14,2
Playa Verde	18,2	15,8

Tabla 8.3: Valores medios de salinidad durante enero de 1999 registrados y obtenidos con el modelo con vientos de Punta Brava para cada punto de control.

8.4 - Resultados obtenidos – Vientos Pontón Recalada

El ajuste de salinidad obtenido durante la verificación del modelo utilizando los vientos de Pontón Recalada se presenta a continuación. La aproximación de los datos durante los dos períodos utilizados para esta etapa es aceptable, por lo que se considera como válido el ajuste del modelo. El modelo con los parámetros ajustados durante la calibración es capaz de reproducir el comportamiento del campo salino medido en la costa de Montevideo.

8.4.1 - Período Junio 1997

En la Figura 8.10 se presenta la comparación entre los valores de salinidad modelados y medidos en los cuatro puntos de control durante junio de 1997 utilizando los vientos registrados en Pontón Recalada y sus parámetros correspondientes. La aproximación de los datos que se obtuvo con el modelo es buena, pues se representan las variaciones de salinidad de los datos, aunque en algunos casos el modelo reproduce valores menores a los medidos.

En la Escollera Sarandí se observa que durante los primeros días se representan los datos aceptablemente salvo el día 3. A partir del día 10 y hasta el 20 los valores calculados por el modelo son levemente mayores a los medidos, siendo la mayor diferencia de más de 5 ppm el día 20. Los últimos días el modelo reproduce algunos valores exactos pero en general calcula valores menores.

En playa Ramírez la mayor diferencia, mayor a 10 ppm, entre el modelo y los datos se observa el día 3. Los primeros días la aproximación es aceptable aunque el modelo calcula salinidades mayores, pero entre los días 9 y 14 se registró un aumento de salinidad importante que es representado por el modelo. El resto del mes la salinidad modelada es en general menor a la registrada por los datos.

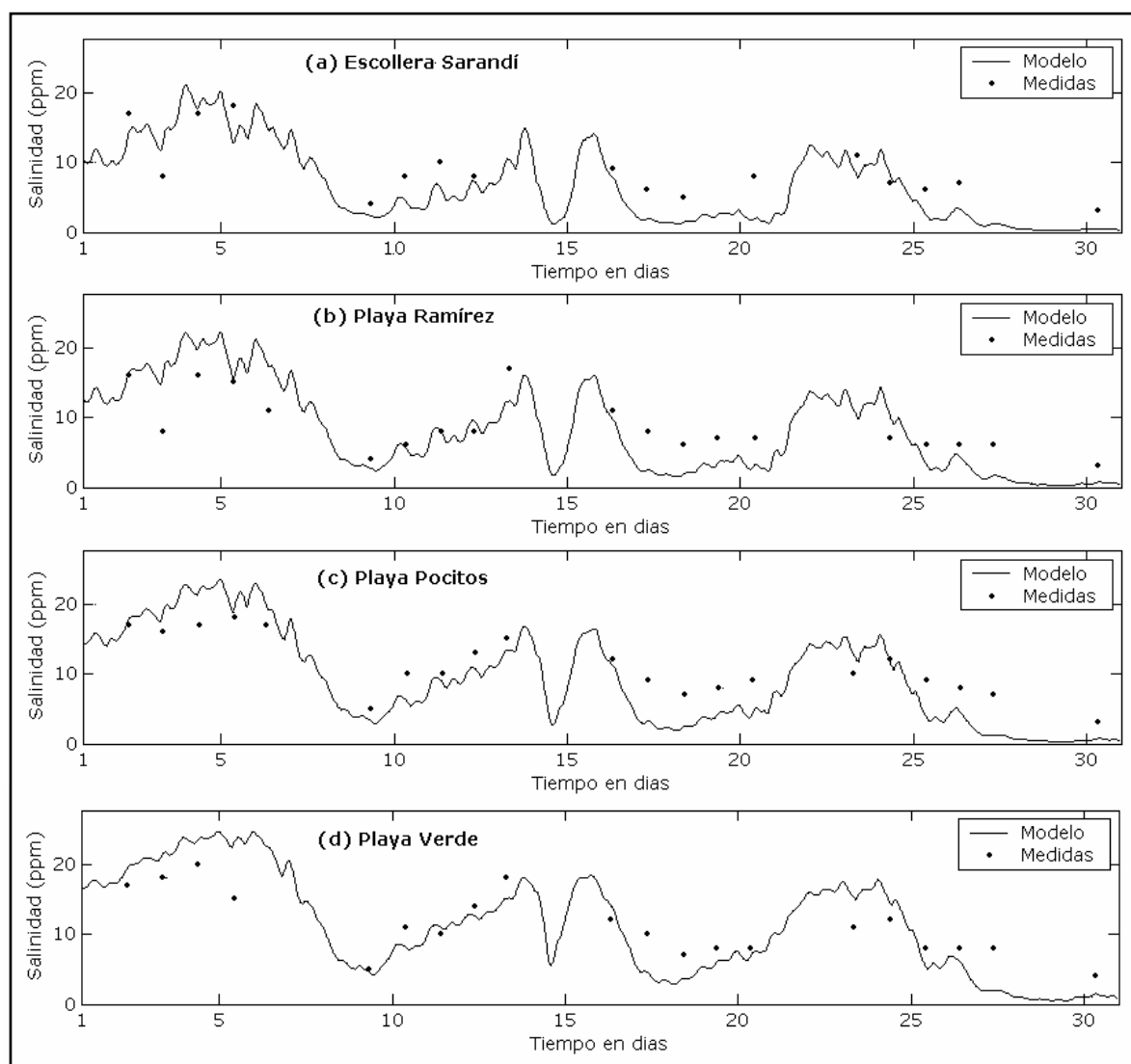


Figura 8.10: Comparación entre los valores de salinidad medidos y calculados por el modelo con vientos de Pontón Recalada en (a) Escollera Sarandí, (b) Playa Ramírez, (c) Playa Pocitos y (d) Playa Verde, durante junio de 1997.

En playa Pocitos los primeros días del mes el modelo representa aceptablemente los datos, con valores de salinidad un poco mayores a los valores registrados algunos días del mes. El

aumento de salinidad que se registró a partir del día 9 también fue reproducido aceptablemente por el modelo. El comportamiento de los valores de salinidad modelados durante el resto del mes es similar al que se obtuvo para playa Ramírez, en algunos casos se reproducen valores exactos, pero en general los valores modelados son menores a los registrados, con diferencias del orden de 5 ppm.

En playa Verde la aproximación de los datos es similar a la obtenida en playa Pocitos. En general las diferencias entre el modelo y los datos es menor a 5 ppm, salvo el día 5 que es cercana a los 10 ppm. Sin embargo se representa correctamente la variación registrada en los datos.

Considerando el promedio mensual de salinidad el modelo reproduce valores cercanos a los calculados con los datos, como se puede observar en la Tabla 8.4. Salvo en playa Verde, donde la salinidad media mensual se representa casi exactamente, en todos los puntos de control los valores medios obtenidos con el modelo son menores a los calculados con los datos.

Punto Medición	Salinidad media mensual	
	Medidas	Modelo
Escollera Sarandí	8,9	6,7
Playa Ramírez	8,8	8,2
Playa Pocitos	11,0	9,4
Playa Verde	11,2	11,3

Tabla 8.4: Valores medios de salinidad durante junio de 1997 registrados y obtenidos con el modelo con vientos de Pontón Recalada para cada punto de control.

8.4.2 - Período Enero 1999

La comparación entre los valores de salinidad modelados y medidos durante enero de 1999 en los puntos de control se presenta en la Figura 8.11. Como se observa en la misma el comportamiento de los registros es reproducido por el modelo, aunque en algunos casos se calculan salinidades menores a las registradas.

En la Escollera Sarandí se observa que durante los primeros días el modelo reproduce el comportamiento de los datos aunque calcula valores un poco menores. Entre los días 10 y 15 el ajuste de los datos es perfecto, reproduciendo el aumento y disminución de la salinidad registrada en los datos. Los días 21, 22 y 24 el modelo calcula valores mucho menores a los registrados y las diferencias son mayores a 10 ppm. Los últimos días del mes el modelo reproduce la variación de los datos pero desfasado en el tiempo.

En playa Ramírez el ajuste de los datos es similar al de la Escollera Sarandí. Hasta el día 8 el modelo representa el comportamiento de los datos pero con valores levemente menores. Entre los días 9 y 20 la representación de la variación de los datos es casi perfecta, aunque luego hasta el 24 el modelo reproduce valores mucho menores que los datos.

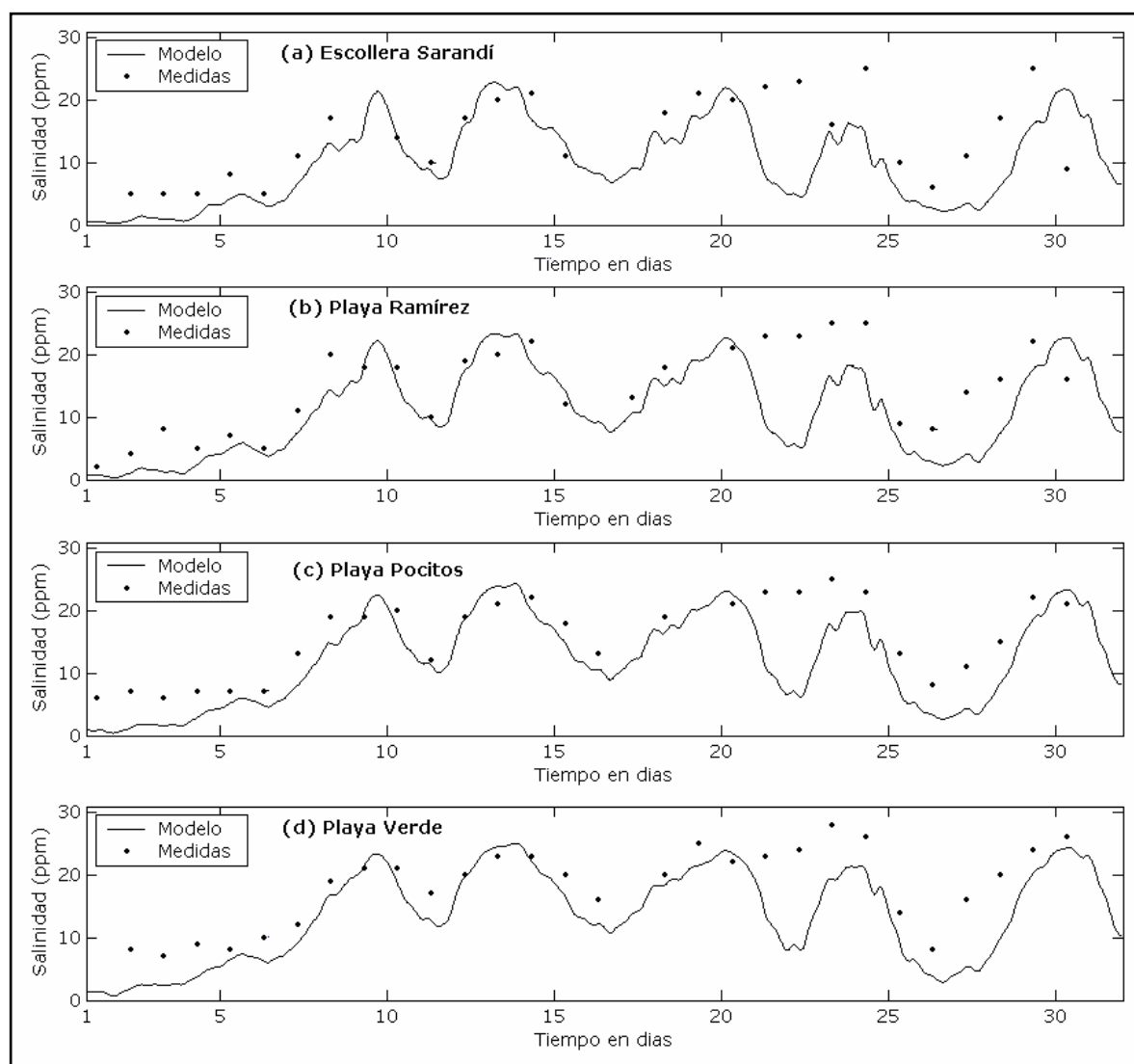


Figura 8.11: Comparación entre los valores de salinidad medidos y calculados por el modelo con vientos de Pontón Recalada en (a) Escollera Sarandí, (b) Playa Ramírez, (c) Playa Pocitos y (d) Playa Verde, durante enero de 1999.

En playa Pocitos los primeros días del mes existen diferencias menores a 5 ppm entre los datos y los valores determinados con el modelo. Sin embargo entre el día 5 y el día 20 el modelo representa casi perfectamente las variaciones de salinidad registradas en este punto de control. Nuevamente los últimos días el modelo calcula valores de salinidad menores a los registrados.

En playa Verde la salinidad calculada con el modelo presenta un comportamiento muy similar al determinado por los datos, sobre todo entre el día 5 y el día 20. Durante los primeros días y a partir del día 20 el modelo calcula valores menores a los registrados.

Teniendo en cuenta los resultados presentados en la Figura 8.11 es esperable que la salinidad media mensual calculada por el modelo sea menor a la salinidad media mensual determinada por los datos. Este resultado se observa en la Tabla 8.5. En este caso las diferencias

entre los valores medios son mayores a 3 ppm en todos los puntos de control, siendo la mayor igual a 4,4 ppm en Playa Verde.

Punto Medición	Salinidad media mensual	
	Medidas	Modelo
Escollera Sarandí	14,3	10,2
Playa Ramírez	14,8	11,3
Playa Pocitos	15,7	12,3
Playa Verde	18,2	13,8

Tabla 8.5: Valores medios de salinidad durante enero de 1999 registrados y obtenidos con el modelo con vientos de Pontón Recalada para cada punto de control.

8.5 - Comparación de resultados

Se realizó la verificación de la calibración del modelo en las dos versiones, considerando los vientos medidos en Punta Brava y considerando los vientos medidos en Pontón Recalada. En el Capítulo 7 se presentó una comparación de los resultados obtenidos con cada una de las versiones. A continuación se realiza un análisis similar para los períodos utilizados en esta etapa de verificación, observando la influencia que tiene el viento en los resultados.

Para poder analizar las diferencias obtenidas en los campos de salinidades modelados con cada uno de los vientos durante el período junio de 1997 se muestran en la Figura 8.12(a) los vientos medidos en ambas estaciones y en la Figura 8.12(b) la salinidad obtenida con cada versión en el punto de control playa Ramírez durante dicho mes. En los otros puntos de control la comparación entre los resultados del modelo con ambas versiones es similar a la obtenida en playa Ramírez.

Como se observa en la Figura 8.12(b) el comportamiento de la salinidad calculada utilizando los vientos de Punta Brava y utilizando los vientos de Pontón Recalada es similar. Es decir que los picos de salinidad y los mínimos son representados en general utilizando ambos vientos. Esto es consistente con que a lo largo del mes los vientos registrados en ambas estaciones de medición no tienen direcciones muy diferentes durante varias horas, lo cual se observa en la Figura 8.12(a).

La mayor diferencia en la comparación de la salinidad modelada es que la salinidad calculada utilizando los vientos de Punta Brava es mayor en general a la que se obtiene con los vientos de Pontón Recalada. Esto puede relacionarse con la mayor intensidad de los vientos de Pontón Recalada, que generan un mayor transporte de salinidad aunque las direcciones de los vientos medidos en ambas estaciones sean iguales. Por ejemplo entre los días 14 y 15 ambos vientos provienen del sector Noroeste y con las dos modelaciones se obtiene un descenso de la salinidad. Sin embargo los vientos más intensos de Pontón Recalada producen una mayor variación de salinidad que los vientos de Punta Brava. De forma similar, a partir del día 25 los vientos son fuertes y del sector Suroeste principalmente, pero de mayor magnitud los de Pontón Recalada. La

salinidad calculada en cada una de las modelaciones durante esos días muestra que el descenso es mayor en la modelación que utiliza los vientos de Pontón Recalada.

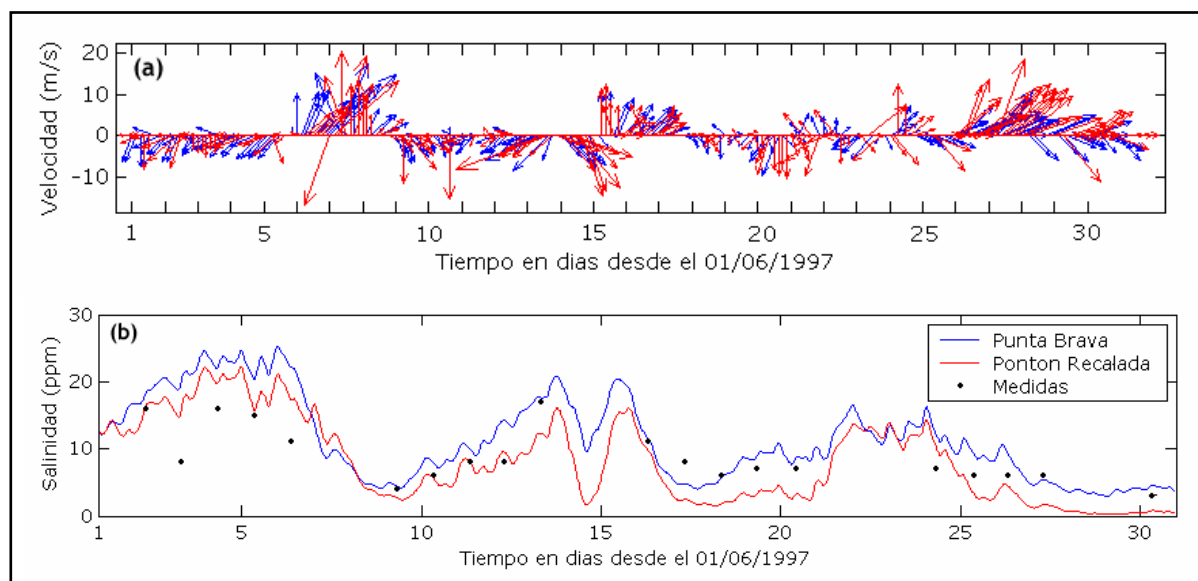


Figura 8.12: Comparación entre (a) los vientos registrados en Punta Brava y Pontón Recalada y (b) la salinidad modelada con ambos vientos en Playa Ramírez, durante junio de 1997.

Considerando el mes de enero de 1999, la comparación de los vientos registrados durante ese período en Punta Brava y en Pontón Recalada, y la comparación de la salinidad calculada con el modelo en Playa Ramírez utilizando ambos vientos se presentan en la Figura 8.13. Como se observa en la Figura 8.13(b) la variación temporal de la salinidad es diferente según la versión del modelo utilizada para la modelación.

Hasta el día 9 la salinidad calculada con los vientos de Pontón Recalada es menor a la calculada con los vientos de Punta Brava pero el comportamiento de ambas curvas de salinidad es similar. Los vientos durante estos días provienen de la misma dirección aunque la intensidad de los vientos de Pontón Recalada es mayor, lo que puede ser el causante de los valores más bajos de salinidad. El día 9 la salinidad calculada con Pontón Recalada presenta un máximo debido a vientos del Sureste que se registraron en dicha estación. Entre los días 12 y 15 las dos curvas de salinidad muestran un aumento y una posterior disminución, pero la salinidad calculada con vientos de Pontón Recalada es considerablemente mayor que la calculada con vientos de Punta Brava. Los vientos durante estos días provienen del sector Este y Noreste en las dos estaciones pero los vientos de Pontón Recalada son de mayor intensidad.

Por otro lado se observan algunas diferencias en las curvas de salinidad que se explican de otra forma. Por ejemplo entre los días 20 y 24 el comportamiento de las dos curvas de salinidad es similar pero la salinidad calculada con Pontón Recalada presenta una disminución y un aumento que no muestra la salinidad calculada con Punta Brava. Esto se debe a que los vientos medidos en ambas estaciones durante estos días fueron diferentes, lo cual se observa en la Figura 8.13(a). Los

vientos medidos en Pontón Recalada durante esos días fueron del Noroeste mientras que en Punta Brava los vientos registrados fueron del sector Este. Los últimos días del mes la salinidad calculada con los vientos de Pontón Recalada es menor a la calculada con los vientos de Punta Brava, aunque el comportamiento de ambas curvas es similar. En este caso los vientos registrados en Pontón Recalada fueron del sector Noreste mientras que los registrados en Punta Brava tuvieron una dirección preferencial Oeste.

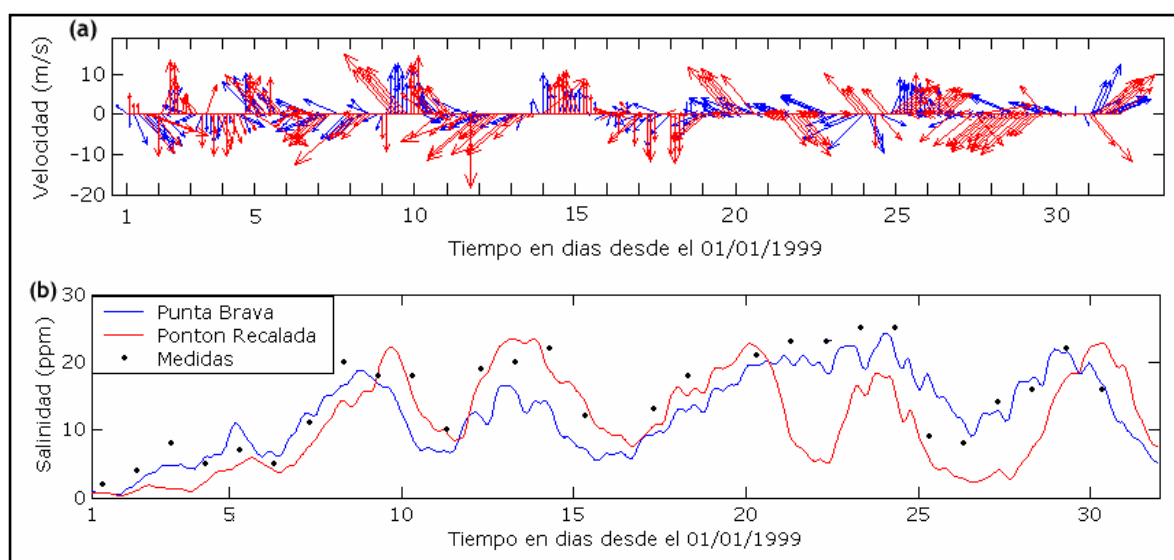


Figura 8.13: Comparación entre (a) los vientos registrados en Punta Brava y Pontón Recalada y (b) la salinidad modelada con ambos vientos en Playa Ramírez, durante enero de 1999.

Hemos visto también a partir de la comparación de los dos períodos utilizados para la verificación de las dos versiones del modelo que los vientos tienen una gran influencia en la variación temporal de la salinidad. A partir de esto se destaca nuevamente la importancia de incluir mediciones de viento real en las simulaciones para representar el campo salino real.

Tesis de Maestría - Junio 2005

Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental - IMFIA

Facultad de Ingeniería - Universidad de la República

Montevideo - Uruguay

TEMA 3

APLICACIONES DEL MODELO

MODELACION BIDIMENSIONAL

DEL CAMPO SALINO EN EL RIO DE LA PLATA

Capítulo 9

ESTACIONALIDAD DEL CAMPO SALINO

En el Capítulo 2 se presentó la distribución estacional del campo salino en el Río de la Plata determinada por Piola et al (2003) a partir de la estacionalidad de los forzantes y del análisis de registros de salinidad. La aplicación del modelo que se presenta en este capítulo tiene como objetivo representar las condiciones estacionales del campo salino y de la corriente residual en todo el dominio de cálculo. Se presenta un análisis de la estacionalidad de los forzantes, un análisis de los resultados obtenidos y una comparación con las distribuciones horizontales de salinidad determinadas por la bibliografía a partir de mediciones de salinidad realizadas en el Río de la Plata.

9.1 - Estacionalidad de los forzantes

Para representar el comportamiento estacional del campo salino es necesario definir previamente a que se debe la estacionalidad del mismo, de forma de representar correctamente las características de cada uno de los forzantes que actúan sobre el sistema. En la bibliografía sobre el tema, y a lo largo de este trabajo, se ha mostrado que los forzantes que principalmente determinan el campo salino en el Río de la Plata son el caudal fluvial, las mareas y los vientos. En relación a los mismos, en Guerrero et al (1997) se menciona que la variación estacional del campo salino está determinada en primer lugar por el viento y en segundo lugar por el caudal fluvial descargado.

En el Capítulo 3 se presentó un análisis estadístico de las descargas de los Ríos Paraná y Uruguay realizado a partir de los valores medios mensuales de ambos caudales registrados durante el período 1991-2003. La distribución anual del caudal fluvial total que ingresa al Río de la Plata, presentada en la Figura 3.1, muestra que los caudales mayores ocurren en el otoño y a principios del invierno, y que disminuyen hacia la primavera y el verano. En el informe de Jaime y Menéndez (2002) se presentan los caudales medios de las estaciones del año determinados a partir de la serie de caudales de los ríos Paraná y Uruguay del período comprendido entre los años 1931 y 2001. Los valores determinados en dicho trabajo también muestran caudales medios mayores en el otoño ($23.562 \text{ m}^3/\text{s}$) e invierno ($21.194 \text{ m}^3/\text{s}$) que durante las estaciones de primavera ($19.270 \text{ m}^3/\text{s}$) y verano ($18.811 \text{ m}^3/\text{s}$). En función de esto, al caracterizar la estacionalidad del campo salino es importante representar esta variación estacional del caudal fluvial que ingresa al Río de la Plata.

En relación a los vientos, en 3.5 se presentó un análisis de varios años de registros de vientos en las estaciones de medición Punta Brava y Pontón Recalada. En ambas estaciones de medición se identificaron dos períodos que caracterizan a estos vientos: el período cálido formado

por los meses comprendidos entre octubre y marzo; y el período frío formado por los meses entre abril y setiembre. Se observa entonces una caracterización estacional de los vientos de la zona que ha sido identificada también por otros autores (Framiñán y Brown 1996, Guerrero et al 1997, Simionato et al 2001).

Por otro lado, otros autores han determinado las distribuciones horizontales estacionales del campo salino a partir de información de campo (Guerrero et al 1997, Piola et al 2003, Guerrero et al, 2004), agrupando los datos en función de la estacionalidad de los forzantes, principalmente del viento. La estacionalidad identificada en cada caso también se corresponde con períodos asociados a las épocas frías y a las épocas cálidas del año, aunque estos estudios no definen las dos estaciones exactamente igual.

El objetivo en este trabajo de aplicación del modelo numérico RMA-10 es simular la estacionalidad del campo salino que ha sido determinada a través del análisis de mediciones de salinidad en el Río de la Plata y en el Frente Marítimo. Para esto, es necesario definir correctamente los valores característicos de cada forzante para cada estación, de forma de obtener la distribución de salinidad representativa de cada período.

9.2 - Definición de escenarios

En la bibliografía consultada, los períodos “cálido” y “frío”, diferenciados principalmente en las características del viento, han sido definidos de diferentes maneras. Aunque las características principales del campo salino determinado para cada escenario son similares en los diferentes trabajos, es importante definir un criterio de selección de los escenarios, principalmente para poder comparar los resultados que se obtengan con el modelo con los resultados obtenidos a través del análisis de datos.

En el trabajo realizado por Framiñán y Brown (1996), se presentó un análisis de la ubicación del frente de turbiedad en el Río de la Plata a través del análisis de imágenes satelitales de la zona. Los períodos de tiempo considerados como escenarios fueron las cuatro estaciones del año: primavera, verano, otoño e invierno. Como forma de caracterizar estos escenarios analizaron 10 años de datos de vientos medidos en la estación de medición de Pontón Recalada.

En el artículo de Guerrero et al (1997) se presenta una recopilación de 30 años de datos de salinidad en el Río de la Plata y la identificación de dos escenarios distintos en función del análisis de 10 años de vientos medidos en Pontón Recalada. Los dos escenarios son primavera-verano, correspondiente al período formado por los meses entre octubre y febrero, y el escenario otoño-invierno, correspondiente al período entre abril y agosto.

En el artículo realizado por Simionato et al (2001) se muestra la representación con un modelo numérico tridimensional de la variación estacional del campo salino determinada en el

artículo de Guerrero et al. Para esto, se realizaron modelaciones de las estaciones de verano e invierno, definidas como los meses de enero y febrero y junio y julio, respectivamente.

Por último, una caracterización estacional del campo salino realizada a partir de la recopilación de registros reales de salinidad en el Río de la Plata se presenta en el trabajo de Piola et al (2003). En ese caso el resultado obtenido fue la distribución horizontal de salinidad según un escenario cálido y un escenario frío, que fueron presentados en el Capítulo 2 en la Figura 2.8. En el trabajo de Guerrero et al (2004) se realizó un estudio similar y se determinaron las distribuciones de salinidad estacionales diferenciando también en función del caudal fluvial descargado. De esta forma consideraron la variación interanual del campo salino y calcularon distribuciones de salinidad para el período cálido y frío en función de un caudal fluvial medio, bajo y alto. En ambos trabajos el período cálido fue definido como el período noviembre – marzo y el período frío como el período junio – setiembre, en función de un análisis de estacionalidad térmica y de vientos.

Como se ha mencionado, existen claramente dos períodos bien diferenciados en lo que refiere a las características del viento, el período cálido y el período frío. Todos los trabajos publicados sobre el tema coinciden en que durante los meses de verano los vientos medios provienen del sector Este. Por otro lado, durante los meses de invierno no domina ningún viento particular y el valor medio resulta ser un viento muy suave, sin dirección preponderante. Este resultado se desprende también del análisis de vientos que se presentó en el Capítulo 3. Sin embargo, la definición de los meses que incluye cada uno de los períodos cálido y frío ha variado a lo largo de los diferentes estudios. Con el objetivo de comparar las distribuciones estacionales del campo salino obtenidas a partir de la aplicación del modelo con las distribuciones determinadas a partir del análisis de mediciones de salinidad, se utiliza en este trabajo la definición de período cálido y frío utilizada en los trabajos de Piola et al (2003) y Guerrero et al (2004). Como se definió en dichos trabajos, el período cálido está formado por los meses comprendidos entre noviembre y marzo; y el período frío está formado por los meses comprendidos entre junio y setiembre.

En la Figura 9.1 se presentan las rosas de viento correspondientes al período cálido y al período frío, calculadas según la nueva definición de los escenarios, a partir de los registros de vientos medidos en Punta Brava entre 1995 y el año 2000. Al comparar estas distribuciones direccionales de vientos con las calculadas con la definición anterior de los períodos cálido y frío, presentadas en la Figura 3.16, se observa que ambas son muy similares. En el caso de Pontón Recalada se observa lo mismo. En la Figura 9.2 se muestran las distribuciones calculadas a partir de las mediciones de viento en Pontón Recalada del período 1997-2000, considerando el período noviembre – marzo como cálido y el período junio – setiembre como el frío. Las rosas de vientos que se observan en dicha figura son similares a las presentadas en la Figura 3.19. De esta forma se pretende mostrar que la estacionalidad del viento identificada en 3.5.2 y 3.5.3 también se observa al definir los períodos cálido y frío de esta nueva manera.

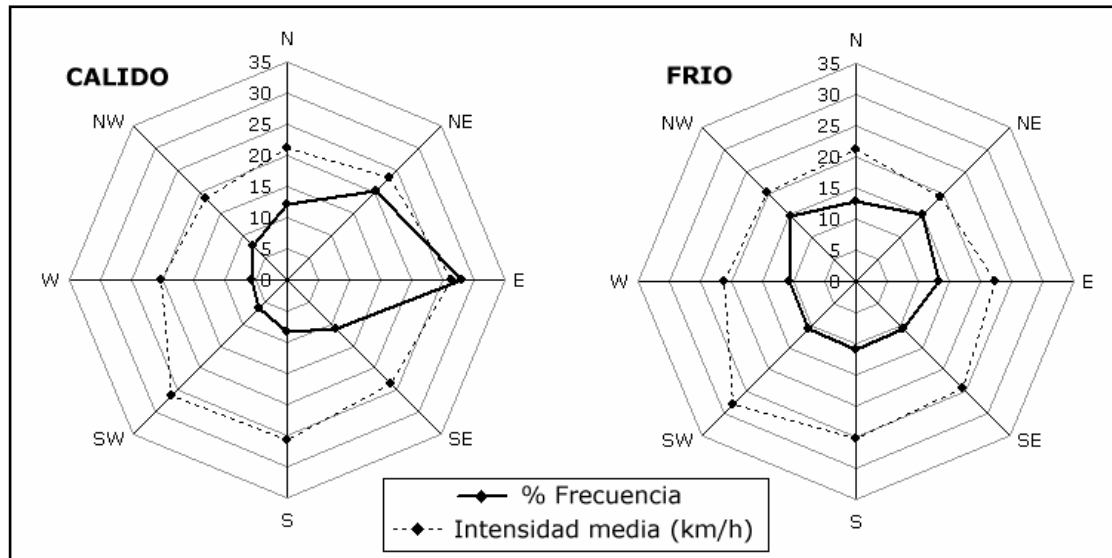


Figura 9.1: Distribución direccional de los vientos registrados en Punta Brava para los periodos cálido y frío definidos nuevamente.

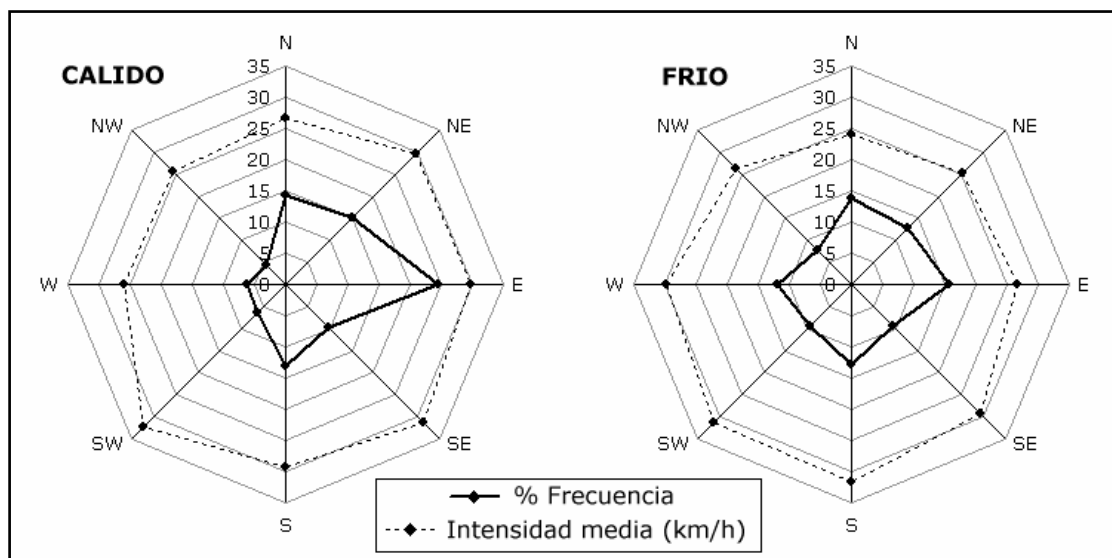


Figura 9.2: Distribución direccional de los vientos registrados en Pontón Recalada para los periodos cálido y frío definidos nuevamente.

9.3 - Características de la modelación

Como se mencionó anteriormente, se definieron dos escenarios caracterizados principalmente por comportamientos diferentes del forzante viento. Estos dos escenarios son el período cálido, definido por los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo; y el período frío, definido por los meses de junio, julio, agosto y setiembre. Cada uno de estos escenarios se representó con el modelo para distintos valores del caudal fluvial descargado; caudal fluvial alto, bajo y medio. De esta forma se modelaron en total 6 escenarios diferentes.

Para representar con el modelo estos escenarios se realizaron seis simulaciones considerando como forzantes la marea astronómica, el caudal fluvial y el viento. La marea

astronómica se modeló introduciendo a través de la frontera oceánica la serie de niveles correspondientes a la superposición de las principales componentes armónicas M_2 , O_1 , Q_1 , N_2 y S_2 . El caudal fluvial y el viento se impusieron constantes durante todo el período de cálculo, considerando además un viento uniforme sobre el área de estudio. Las simulaciones se realizaron utilizando la malla de baja resolución del Río de la Plata y el Frente Marítimo definida en el Capítulo 6. La condición inicial utilizada también fue definida en el Capítulo 6, y para obtener resultados independientes de la misma el período de simulación total fue de 6 meses. Se realizó otro tipo de modelación del campo salino estacional a partir de la selección de un período cálido y un período frío característicos de cada estación, que se presenta en el Anexo 4.

Las distribuciones horizontales de salinidad que se presentan en el trabajo de Guerrero et al (2004), fueron determinadas para caudales bajos, altos y medios. Para esto, los datos de salinidad fueron clasificados en función de caudales máximos, medios y bajos descargados en el Río de la Plata. Los caudales mayores a $28.000 \text{ m}^3/\text{s}$ se definieron como caudales altos, los caudales menores a $17.370 \text{ m}^3/\text{s}$ como caudales bajos y los caudales entre estos valores extremos como caudales medios (Guerrero et al, 2004). Por otro lado, los caudales medios para las estaciones cálida y fría y los caudales extremos característicos del Río de la Plata fueron determinados por el Instituto Nacional de Agua Argentino (INA) y se presentan en la Tabla 9.1. En la misma se observa que estos valores pertenecen a los rangos de caudales que se utilizaron para la determinación de las distribuciones horizontales de salinidad. Teniendo esto en cuenta, los caudales fluviales ingresados al modelo para representar los diferentes escenarios son los presentados en la Tabla 9.1.

Caudal fluvial (m^3/s)	Paraná las Palmas	Paraná Guazú	Uruguay	Total
Medio - Período Frío	3.700	12.400	5.200	21.300
Medio - Período Cálido	4.400	14.800	4.100	23.300
Alto	6.800	22.800	10.400	40.000
Bajo	3.000	10.200	1.800	15.000

Tabla 9.1: Caudales fluviales medios, altos y bajos utilizados en la modelación de los distintos escenarios.

El viento medio característico de los períodos cálido y frío se calculó a partir de las series de vientos medidas en Punta Brava y Pontón Recalada. Para la estación Punta Brava el viento medio se calculó como el promedio de los vientos registrados durante el período cálido y el período frío en dicha estación entre los años 1995 y 2000. Para Pontón Recalada el viento medio de cada estación se calculó de forma similar pero para los vientos registrados entre 1997 y el año 2001. En la Tabla 9.2 se presentan los vientos medios para cada estación de medición y para cada período. Sin embargo, como el modelo utiliza la intensidad del viento para calcular la tensión del viento sobre la superficie de agua, que depende del cuadrado del módulo del viento, se calculó nuevamente el

viento medio para cada escenario considerando la media cuadrática. De esta forma se ponderaron los vientos mayores, los cuales tienen una mayor influencia en la tensión del viento y en definitiva sobre el campo salino. En la Tabla 9.3 se muestran los vientos medios calculados según la media cuadrática, para cada estación de medición y para cada período. Los valores mostrados en dicha tabla son los valores de viento ingresados en cada modelación correspondiente.

Vientos medios	Punta Brava		Pontón Recalada	
	Período Cálido	Período Frío	Período Cálido	Período Frío
Intensidad (m/s)	2,6	0,2	2,7	0,5
Dirección	E	NE	E	SE

Tabla 9.2: Vientos medios de los períodos cálido y frío en Punta Brava y Pontón Recalada calculados con la media aritmética.

Vientos medios	Punta Brava		Pontón Recalada	
	Período Cálido	Período Frío	Período Cálido	Período Frío
Intensidad (m/s)	4,5	1,8	5,3	2,9
Dirección	E	S	E	S

Tabla 9.3: Vientos medios de los períodos cálido y frío en Punta Brava y Pontón Recalada calculados con la media cuadrática.

Teniendo en cuenta la comparación entre ambas estaciones de medición de vientos realizada en el Capítulo 3, es esperable que los vientos medios calculados con los registros de Punta Brava sean distintos a los calculados con los de Pontón Recalada, lo cual se observa en la Tabla 9.3. Debido a esto, cada uno de los escenarios se representó considerando los dos vientos y los parámetros del modelo correspondientes. En total para cada estación de medición de viento fueron modelados seis escenarios distintos, tres correspondientes a la época fría y tres a la época cálida, cada uno de los cuales corresponde a un escenario diferente de caudal fluvial: alto, medio y bajo. Como se mostró en la Tabla 9.1, para los períodos cálido y frío los caudales extremos son los mismos, en cambio el caudal medio es diferente para cada estación.

9.4 - Resultados obtenidos

El campo salino característico de cada uno de los escenarios modelados se obtuvo promediando los últimos treinta días de cada simulación, de forma de filtrar la marea astronómica y obtener el campo salino medio. A continuación se presenta la distribución horizontal de salinidad calculada con las dos versiones del modelo para cada uno de los escenarios anteriormente definidos.

9.4.1 - Vientos Punta Brava

Utilizando el viento medio característico del período cálido determinado según la media cuadrática de los registros de Punta Brava, 4,5 m/s proveniente del Este, se determinaron con el modelo las distribuciones de salinidad en el Río de la Plata para el período cálido. Se calcularon para esta estación tres distribuciones horizontales de salinidad correspondientes a un caudal fluvial alto, medio y bajo, que se presentan en las Figuras 9.3(a), 9.3(b) y 9.3(c), respectivamente. Se observa en las mismas que la distribución salina obtenida en los tres casos es diferente. Según estos resultados, en Montevideo la salinidad en una situación de caudal medio está en el rango 10 - 15 ppm, mientras que para caudales altos este valor es del entorno de los 5 ppm y en situaciones de caudales bajos se alcanzan salinidades de hasta 20 ppm. En Punta Piedras se observa algo similar, con salinidades para un caudal medio entre 5 y 10 ppm, menores a 5 ppm para caudales altos y mayores a 10 ppm para caudales bajos. En la Bahía de Samborombón la salinidad con caudales medios presenta valores entre 10 y 20 ppm, entre 5 y 15 ppm con caudales altos y entre 15 y 25 ppm con caudales bajos. En Punta Rasa para caudales medios las salinidades están entre 20 y 25 ppm, para caudales altos disminuyen a valores entre 15 y 20 ppm y con caudales bajos son mayores a 25 ppm. En Punta del Este el período cálido estaría caracterizado por salinidades medias mayores a 30 ppm para todo caudal.

Teniendo todo esto en cuenta, el efecto del aumento de caudal fluvial medio es principalmente desplazar hacia el exterior del Río de la Plata el campo salino, generando salinidades menores en ambas costas. En forma contraria, cuando el caudal fluvial descargado disminuye, el efecto que genera es el aumento de la salinidad en las costas uruguayas y argentinas.

Las distribuciones medias horizontales de salinidad para el período frío, con caudal fluvial alto, medio y bajo, se presentan en la Figura 9.3(d), Figura 9.3(e) y Figura 9.3(f), respectivamente. En estos casos el viento medio cuadrático es el determinado para el período frío en función de los vientos medidos en Punta Brava, igual a 1,8 m/s proveniente del Sur. Se observa que en el período frío en Montevideo las salinidades medias con un caudal medio son del entorno de 10 ppm aumentando a 15 ppm para caudales bajos y disminuyendo a menos de 5 ppm con caudales altos. En Punta Rasa las salinidades varían de aproximadamente 10 ppm a menos de 5 ppm y a más de 10 ppm para caudales medios, altos y bajos, respectivamente. El comportamiento observado en Punta Rasa y Punta del Este es similar, confirmando que el efecto del incremento del caudal fluvial es disminuir la salinidad sobre toda la zona costera del Río de la Plata y viceversa.

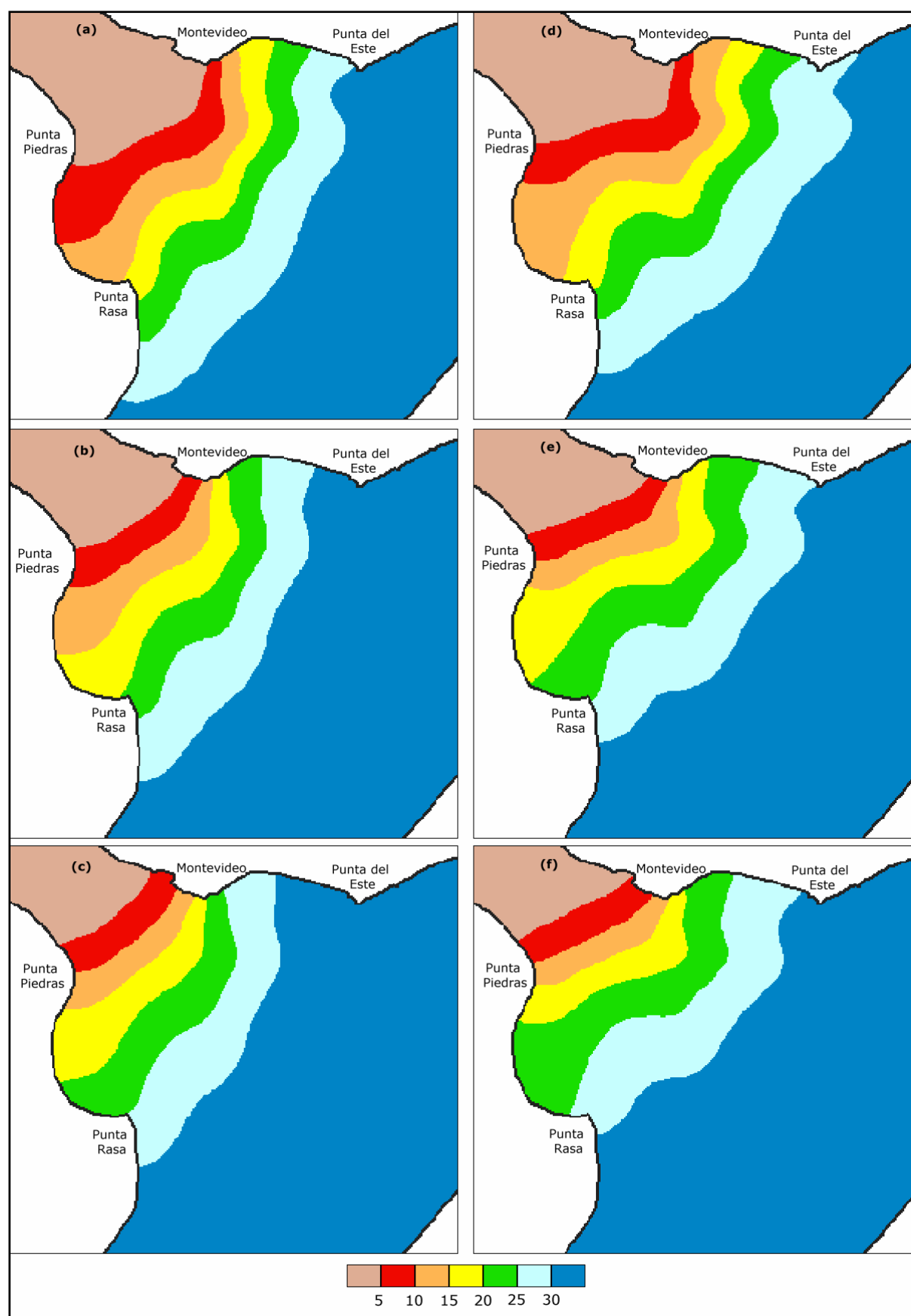


Figura 9.3: Curvas de isoconcentración de salinidad (ppm) obtenidas con los vientos de Punta Brava. Período cálido y caudal fluvial (a) alto, (b) medio y (c) bajo. Período frío y caudal fluvial (d) alto, (e) medio y (f) bajo.

Las tres distribuciones medias de salinidad calculadas por el modelo para el período cálido muestran una mayor extensión del campo salino sobre la costa argentina que sobre la costa uruguaya. Esto señala un gradiente total de salinidad mayor en la costa uruguaya que en la costa argentina para el período cálido. En las distribuciones determinadas para el período frío no se observa dicho comportamiento, siendo la extensión del campo salino y el gradiente horizontal de salinidad similar en ambas costas. Por otro lado, al comparar las distribuciones de cada período para un mismo valor de caudal fluvial, se observa en los tres casos que en el período frío las curvas de isoconcentración sobre la costa uruguaya se desplazan en sentido Este respecto a la posición de dichas curvas en el período cálido, y que sobre la costa argentina el comportamiento es opuesto, desplazándose las mismas hacia el interior del Río de la Plata.

Estos dos resultados se explican observando la acción de los vientos medios característicos de cada período. En el período cálido el viento del Este actúa como una fuerza opuesta al desplazamiento del campo salino hacia el exterior del Río de la Plata, lo cual genera un mayor gradiente de salinidad sobre la costa uruguaya y un mayor desplazamiento del campo salino sobre la costa argentina. En el período frío el viento es de baja intensidad y de dirección Sur, lo cual favorece el desplazamiento del campo salino hacia el exterior del río.

9.4.2 - Vientos Pontón Recalada

Las distribuciones horizontales medias de salinidad para los períodos cálido y frío en función del caudal fluvial descargado considerando los vientos medidos en Pontón Recalada se presentan en la Figura 9.4. Los resultados presentados en la misma son diferentes a los que se determinaron utilizando los vientos medios de Punta Brava y la versión del modelo correspondiente a los mismos. La principal diferencia es que para los tres caudales las salinidades en cada punto de ambas costas del río obtenidas con los vientos de Pontón Recalada son menores a las obtenidas con los vientos de Punta Brava.

En este caso el período cálido está caracterizado por un viento medio de 5,3 m/s proveniente del Este y los resultados se observan en las Figuras 9.4(a), 9.4(b) y 9.4(c). De la misma forma que el caso anterior este viento genera una mayor extensión del campo salino sobre la costa argentina que sobre la costa uruguaya. Por otro lado, se observa que a mayor caudal fluvial las salinidades en ambas costas disminuyen y viceversa. En Montevideo la salinidad media para caudales medios se ubica entre 5 y 10 ppm, siendo menor a 5 ppm con caudal alto y entre 10 y 15 ppm con caudal bajo. En Punta Piedras la salinidad es menor a 5 ppm con caudal medio y caudal alto, y del orden de 5 ppm con caudal bajo. En la Bahía de Samborombón las salinidades para caudales medios son menores a 15 ppm, para caudales altos son menores a 10 ppm y para caudales bajos menores a 20 ppm. En Punta del Este para caudales altos se observan salinidades del orden de 25 ppm, mientras que para caudales medios y bajos se observan valores mayores a 30 ppm.

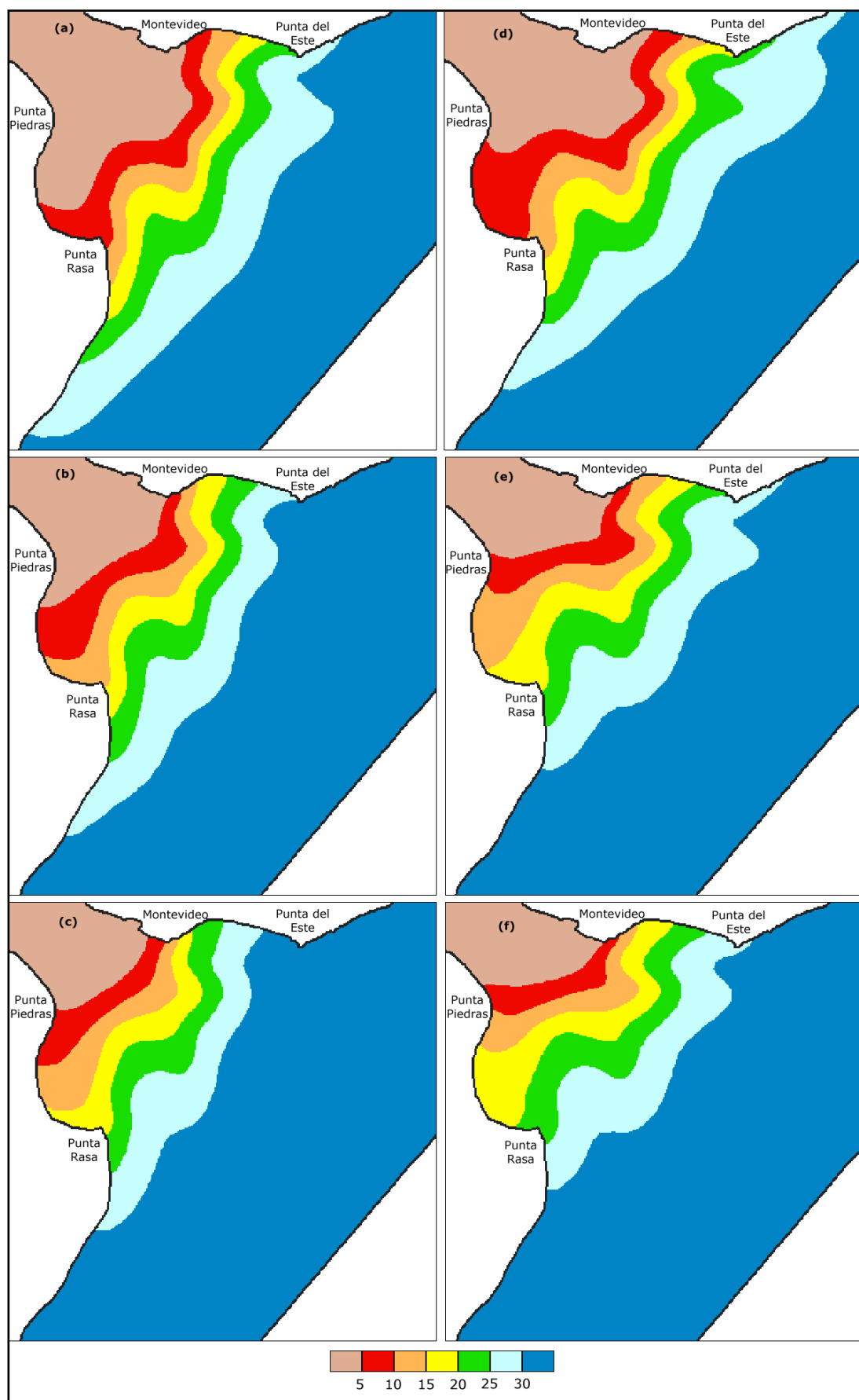


Figura 9.4: Curvas de isoconcentración de salinidad (ppm) obtenidas con los vientos de Pontón Recalada. Período cálido y caudal fluvial (a) alto, (b) medio y (c) bajo. Período frío y caudal fluvial (d) alto, (e) medio y (f) bajo.

El período frío está caracterizado por un viento de 2,9 m/s proveniente del Sur, según la media cuadrática de los registros de vientos de Pontón Recalada. Esta diferencia entre los vientos medios de cada período, genera que las distribuciones medias de salinidad obtenidas para el período frío sean muy diferentes a las obtenidas para el cálido. La mayor diferencia es que durante el período frío la extensión del campo salino sobre la costa uruguaya es mayor que en el cálido, para todos los caudales fluviales, aunque la mayor diferencia se observa para el caudal alto. Por otro lado, la extensión del campo salino sobre la costa argentina es menor. De esta forma la salinidad sobre la costa uruguaya disminuye y sobre la costa argentina aumenta, al pasar del período cálido al período frío. Los resultados obtenidos para el período frío muestran que en Montevideo la salinidad para un caudal medio y alto es menor a 5 ppm y aumenta a un valor entre 5 y 10 ppm con caudales bajos descargados. En Punta del Este los resultados indican salinidades entre 25 y 30 ppm para caudales medios, menores a 25 ppm con caudales altos y del entorno de 30 ppm con caudales altos. En la Bahía de Samborombón las salinidades medias para caudales medios están entre 5 y 20 ppm, para caudales altos entre 5 y 15 ppm y para caudales bajos entre 10 y 25 ppm.

9.5 - Análisis de resultados

En el punto anterior se presentaron las distribuciones medias de salinidad horizontal calculadas con el modelo bidimensional RMA-10 en sus dos versiones calibradas, en función del origen de los vientos utilizados en la modelación. Dichas distribuciones muestran comportamientos y características diferentes del campo salino en función del período estacional y según el caudal fluvial descargado en el Río de la Plata. Se ha mostrado que los períodos cálido y frío presentan distribuciones salinas diferentes, con salinidades sobre la costa uruguaya mayores en el período cálido que en el período frío y salinidades menores en la costa argentina en el período cálido que en el período frío. Esta rotación del campo salino en sentido horario al pasar del período cálido al período frío se vinculó con la variación de los vientos entre un período y otro. La existencia de vientos fuertes del Este en el período cálido genera una barrera que impide el desplazamiento sobre la costa uruguaya del campo salino, mientras que los vientos del Sur más suaves del período frío no generan este efecto, y por eso disminuye la salinidad al pasar al período frío en la costa uruguaya. Por otro lado, sobre la costa argentina, el efecto suave de los vientos del Sur y la continuidad del campo salino generan el desplazamiento hacia el interior del Río de la Plata de las curvas de isoconcentración de salinidad. Esta relación entre las salinidades del período cálido y frío sobre la costa uruguaya, fue mencionada para la zona cercana a Montevideo en 2.4.2 a partir de un análisis de Ecoplata (1997) y en 3.3.2 a partir del análisis de mediciones de salinidad en la costa de dicha ciudad.

Sin embargo, este comportamiento ha sido determinado mayormente a partir de simulaciones numéricas. Para verificar estos resultados con el comportamiento real del campo salino, se realizó una comparación de los resultados del modelo con las distribuciones horizontales

superficiales de salinidad realizadas por Guerrero et al (2004) a partir del análisis de mediciones de salinidad en el Río de la Plata y el Frente Marítimo. Esta comparación de resultados se realiza para cada uno de los seis escenarios definidos, presentando en cada caso las características de los datos utilizados por los autores en su estudio, así como un análisis de las diferencias y similitudes encontradas.

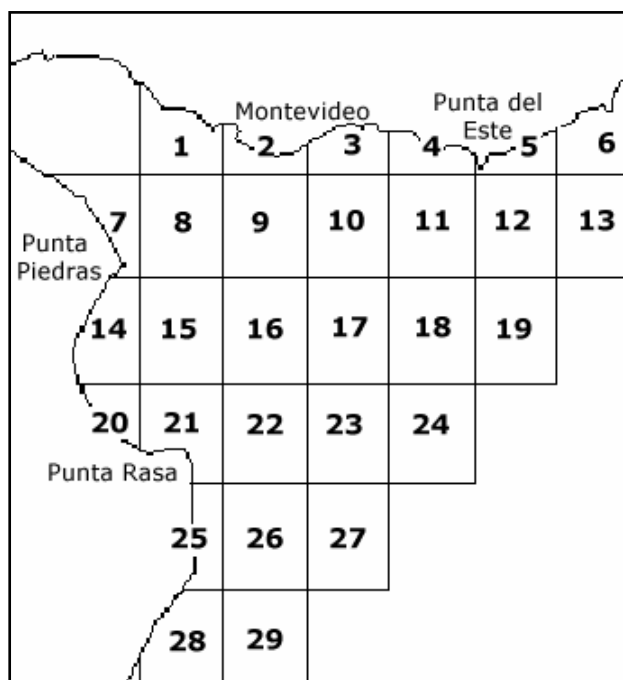


Figura 9.5: Ubicación y numeración de los cuadrantes definidos por Guerrero et al (2004) utilizados en la comparación de resultados. Modificado de Guerrero et al (2004).

La metodología utilizada en el estudio de Guerrero et al (2004), descrita en el mismo, consistió en primer lugar en la clasificación de los datos de salinidad en función del período y del caudal fluvial correspondiente. Luego definieron una grilla de 315 nodos espaciados 0.5° en latitud x 0.5° en longitud en el dominio formado por los rangos 33°S - 40°S en latitud y 60°O - 50°O en longitud. Para el cálculo del valor en cada nodo, utilizaron el método de interpolación "distancia inversa al cuadrado", en el cual los puntos son ponderados con un peso inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al nodo. La elección de las opciones de búsqueda de las observaciones asociadas a cada nodo se realizó alineando una elipse de búsqueda con el eje mayor paralelo a la batimetría. El eje mayor de la elipse correspondía a 1.5° en longitud y el menor a 0.5° en latitud. A partir de las grillas así calculadas, se generaron mapas con las distribuciones horizontales de salinidad para las distintas situaciones. Por otro lado, también se presentan en dicho trabajo el valor medio y el desvío estándar de la salinidad, y la cantidad de observaciones válidas para cada cuadrante de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ definido en el dominio de cálculo, para cada una de las situaciones analizadas (Guerrero et al 2004).

Para comparar los valores estadísticos presentados en el trabajo de Guerrero et al (2004) con los resultados obtenidos con el modelo, se utilizaron los mismos cuadrantes de la grilla definida en dicho estudio, los cuales se presentan en la Figura 9.5. Se realizó una numeración de los cuadrantes para poder comparar las diferentes zonas haciendo referencia al número de cada uno.

9.5.1 - Período Cálido – Caudal Fluvial Medio

La comparación de las distribuciones medias de salinidad para el período cálido y caudal fluvial medio obtenidas con el modelo con las determinadas por Guerrero et al (2004) se presentan en la Figura 9.6. En la misma se presentan las distribuciones calculadas con las dos versiones del modelo superpuestas con las curvas de isoconcentración de salinidad determinadas en el trabajo de Guerrero et al (2004).

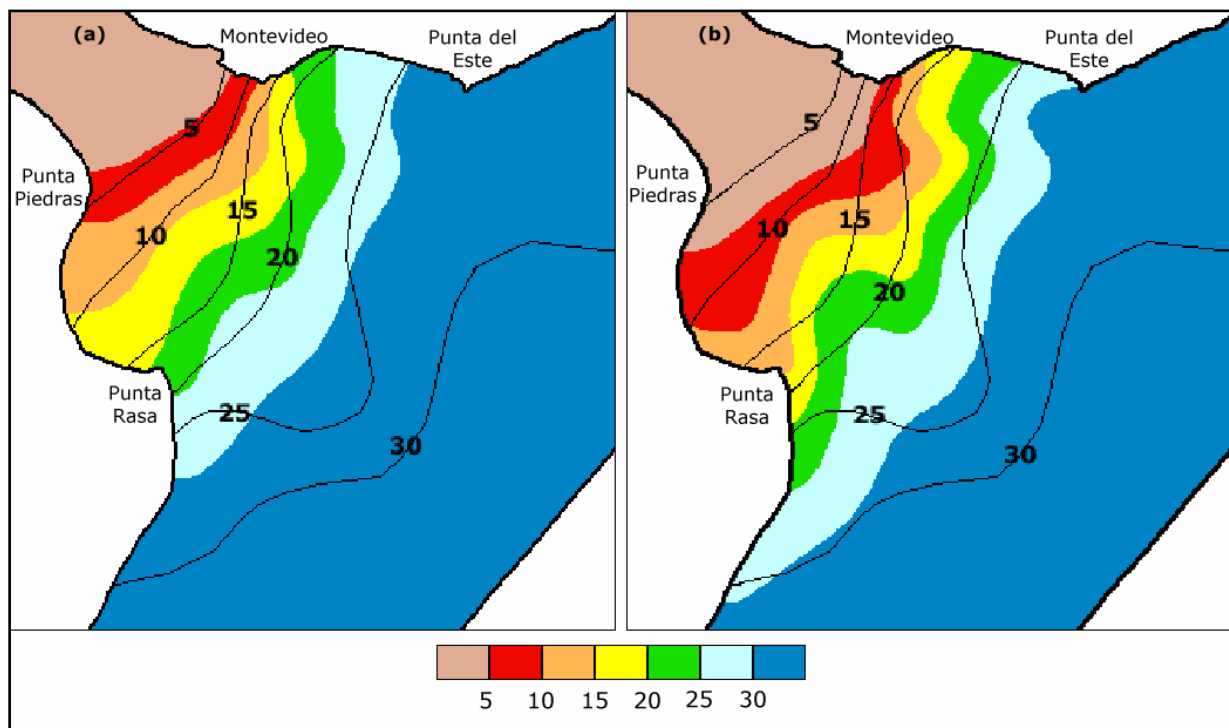


Figura 9.6: Comparación de las curvas de isoconcentración de salinidad (ppm) para el período cálido y caudal fluvial medio obtenidas por Guerrero et al (2004) y con el modelo utilizando (a) vientos de Punta Brava y (b) vientos de Pontón Recalada.

A partir de la comparación que se presenta en la Figura 9.6(a) se observa que la distribución media de salinidad obtenida con los vientos de Punta Brava muestra en algunos casos los mismos resultados que los datos. La curva de 5 ppm modelada reproduce casi perfectamente la curva de 5 ppm determinada con las mediciones. Por otro lado la curva de 10 ppm modelada representa perfectamente la curva de 10 ppm de los datos pero solamente sobre la costa uruguaya. De forma similar la curva de 15 ppm es semejante a la determinada con los datos pero en una pequeña zona sobre la costa uruguaya. Debido a esto los rangos de variación de salinidad coinciden en algunas zonas, principalmente en la parte central y en la zona cercana a la costa uruguaya del Río de la

Plata. En la bahía de Samborombón los rangos de variación de salinidad coinciden en pocas zonas. Los rangos de salinidades altas, mayores a 25 ppm, son los que presentan pocas zonas en común. El modelo calcula salinidades mayores a 30 ppm a partir de un punto situado al Oeste de Punta del Este y en cambio los datos presentan salinidades menores a 30 en una zona mucho mayor que incluye toda la costa uruguaya.

La comparación de la Figura 9.6(b) muestra que las distribuciones horizontales de salinidad calculadas con el modelo utilizando vientos de Pontón Recalada coinciden en algunas zonas del dominio de cálculo con la distribución definida por Guerrero et al (2004). La forma de las curvas de isoconcentración son diferentes y además los resultados del modelo muestran gradientes mayores de salinidad que los que muestran los datos.

Aunque la comparación de las curvas de isoconcentración de la Figura 9.6 muestra zonas de resultados aceptables y zonas con diferentes rangos de variación de salinidad, la comparación de los valores medios de salinidad calculados en cada cuadrante muestra que las diferencias entre los resultados obtenidos con el modelo y los datos no son muy grandes. En la Tabla 9.4 se presenta para cada cuadrante definido según la Figura 9.5 la salinidad media, el número de datos y la desviación estándar calculados según Guerrero et al (2004) y los valores medios de salinidad calculados según las dos versiones del modelo. En la misma están marcados los valores de salinidad media en los cuadrantes determinados con el modelo que no pertenecen al intervalo definido con la desviación estándar de la salinidad media.

En la Tabla 9.4 se observa por un lado que aunque los valores medios de salinidad calculados con el modelo no son iguales a los valores determinados con los datos, las diferencias en algunos casos son pequeñas. De los 28 cuadrantes en donde se presentan datos, en 17 (61%) la versión de los vientos de Punta Brava calcula valores medios de salinidad correctos, y en 19 (68%) lo hace la versión de los vientos de Pontón Recalada. En los cuadrantes donde los resultados no son correctos, en algunos casos las diferencias entre los valores medios son grandes, mayores a 5 ppm, pero por ejemplo si se observa el cuadrante número 7, se observa que el error es pequeño, sobretudo en la versión de Pontón Recalada. Por otro lado, la mayoría de los cuadrantes en donde los resultados del modelo no coinciden con los valores obtenidos de los datos están ubicados sobre la parte exterior del Río de la Plata, luego de la línea Punta del Este – Punta Rasa. Esto indicaría una zona de resultados favorables y otra zona de resultados no favorables. En el caso de la versión del modelo de Punta Brava se observan además valores incorrectos en tres cuadrantes de la costa argentina y de la Bahía de Samborombón. En la Figura 9.7 se pueden observar estas zonas para ambas versiones del modelo, en donde los cuadrantes oscurecidos corresponden a valores incorrectos y los cuadrantes sin número significan que no existen datos en los mismos.

Nº Cuadrante	Parámetros estadísticos (Guerrero et al 2004)			Salinidad media modelo	
	Salinidad Media	Número Datos	Desviación Estándar	Versión PB	Versión PR
1	3,33	39	3,16	1,1	0,2
2	4,28	7	5,28	7,0	2,6
3	21,80	13	9,00	24,0	17,6
4	25,62	4	7,62	31,0	27,9
5	---	---	---	---	---
6	28,56	7	2,61	33,9	33,9
7	0,07	7	0,05	3,2	1,0
8	7,10	55	6,94	6,0	2,0
9	12,36	53	7,06	13,4	7,0
10	22,28	28	6,46	24,0	18,8
11	27,64	28	4,15	31,2	29,6
12	27,24	21	5,39	33,4	32,9
13	27,23	12	4,72	33,8	33,7
14	7,98	11	2,45	12,4	5,9
15	12,42	36	6,20	16,4	11,4
16	19,46	24	4,54	21,9	17,8
17	25,00	21	5,17	27,2	23,6
18	25,88	9	6,17	31,8	30,8
19	29,62	8	2,59	33,2	32,9
20	10,78	6	3,31	16,3	10,1
21	19,03	29	6,49	21,6	15,4
22	19,71	21	5,17	27,9	25,6
23	26,15	10	3,48	30,8	28,9
24	25,65	2	3,69	32,8	32,3
25	28,04	9	2,69	28,8	22,8
26	25,86	19	3,67	31,0	28,9
27	27,33	4	3,75	32,9	32,2
28	31,40	5	1,64	32,7	29,8
29	32,20	5	2,85	32,9	31,9

Tabla 9.4: Parámetros estadísticos determinados por Guerrero et al (2004) y salinidad media obtenida con la versión del modelo con vientos de Punta Brava (versión PB) y con vientos de Pontón Recalada (versión PR), para cada cuadrante, para el período cálido y caudal fluvial medio.

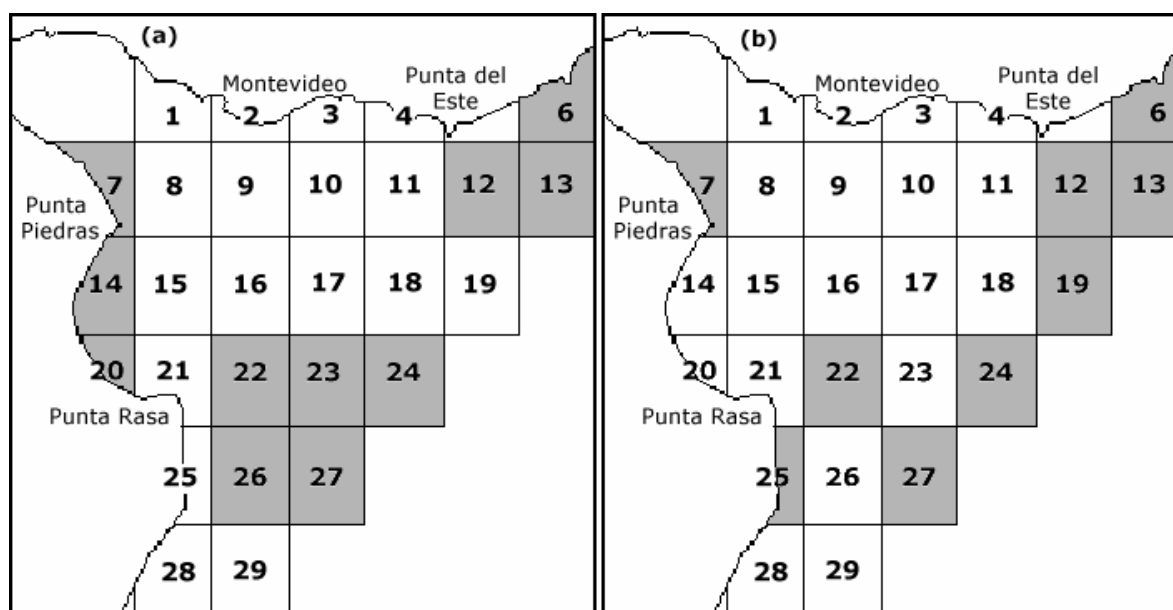


Figura 9.7: Distribución de los cuadrantes (marcados en gris) para el período cálido y caudal medio en donde los valores medios obtenidos con (a) la versión de Punta Brava del modelo y (b) la versión de Pontón Recalada, no reproducen los valores obtenidos con los datos.

9.5.2 - Período Cálido – Caudal Fluvial Alto

La comparación de los rangos de salinidad en el Río de la Plata estimados según datos medidos y según las dos versiones del modelo, para el período cálido con caudal fluvial alto se presenta en la Figura 9.8.

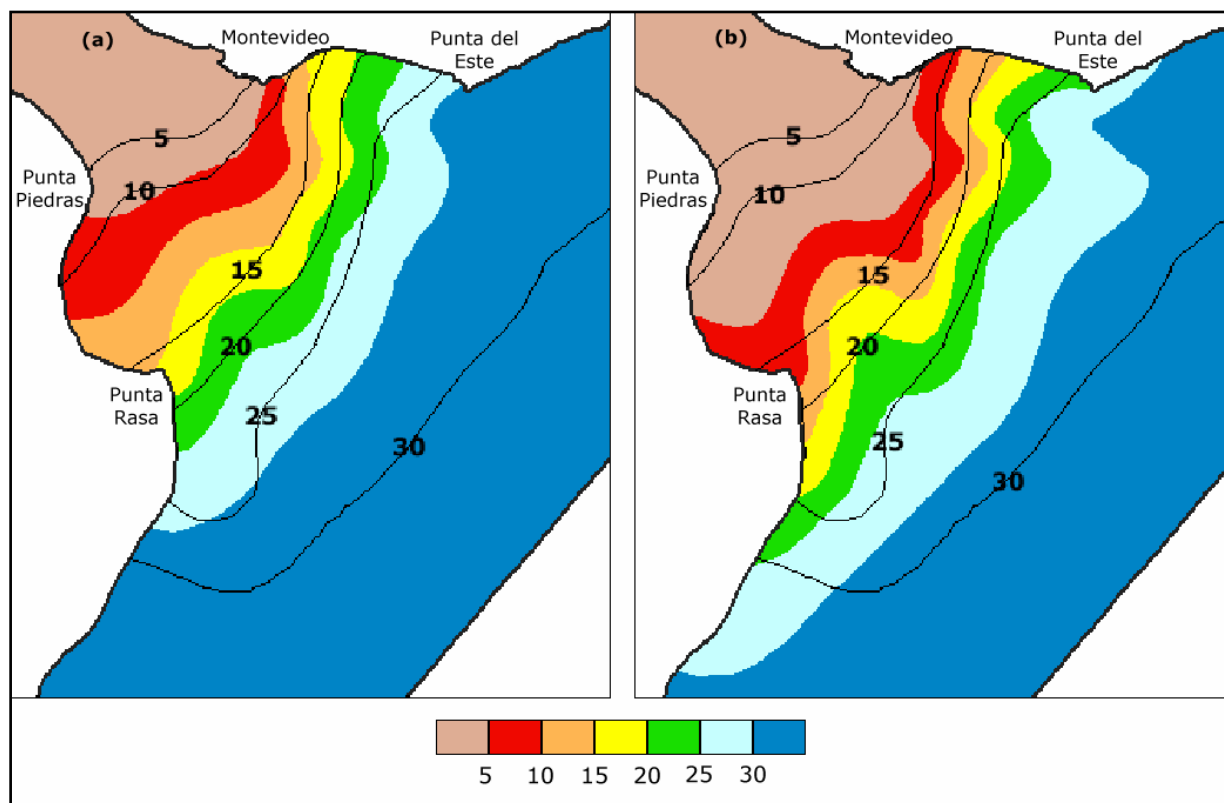


Figura 9.8: Comparación de las curvas de isoconcentración de salinidad (ppm) para el período cálido y caudal fluvial alto obtenidas por Guerrero et al (2004) y con el modelo utilizando (a) vientos de Punta Brava y (b) vientos de Pontón Recalada.

La distribución de salinidad horizontal obtenida con la versión de Punta Brava (Figura 9.8(a)) es similar en muchos aspectos a la determinada a partir de los datos de Guerrero et al (2004). Aunque el rango entre 5 y 10 ppm de salinidad casi no coinciden, casi toda la zona entre 10 y 15 ppm determinada con el modelo queda incluida en la zona determinada por los datos. Los rangos entre 15 y 20 ppm y entre 20 y 25 ppm son muy similares, sobretodo entre la zona central y la costa uruguaya del Río de la Plata; y las curvas de 25 ppm de isconcentración coinciden prácticamente en toda esa zona. Nuevamente los datos reales muestran salinidades menores a 30 ppm hasta una zona extensa de la parte exterior del Río de la Plata, mientras el modelo las ubica en una zona exterior más pequeña, limitada por Punta del Este en la costa uruguaya.

La modelación del escenario cálido con caudal alto utilizando los vientos de Pontón Recalada presenta algunas similitudes y algunas diferencias con el análisis de la distribución horizontal de salinidad realizada por Guerrero et al (2004), las cuales se observan en la Figura 9.8(b). En general los resultados del modelo muestran valores menores de salinidad que los que muestran los

rangos de salinidad determinados con los datos. En toda la zona del rango entre 5 y 10 ppm que muestran los datos el modelo representa valores menores a 5 ppm. Los rangos hasta los 25 ppm presentan algunas zonas de superposición, principalmente en una zona central cercana a la costa argentina. La ubicación de la curva de 25 ppm es muy similar en los dos casos, y el rango de variación de salinidad entre 25 ppm y 30 ppm muestra una zona de coincidencia grande.

En la Tabla 9.5 se presenta la comparación de los parámetros estadísticos presentados por Guerrero et al (2004) y los valores obtenidos con el modelo para los cuadrantes definidos anteriormente. Los valores marcados corresponden a resultados del modelo que no pertenecen al rango de salinidad definido por los parámetros estadísticos.

Nº Cuadrante	Parámetros estadísticos (Guerrero et al 2004)			Salinidad media modelo	
	Salinidad Media	Número Datos	Desviación Estándar	Versión PB	Versión PR
1	0,09	5	0,03	0,1	0,0
2	1,49	3	0,91	2,3	0,6
3	18,88	7	11,43	17,3	10,0
4	6,67	4	0,92	27,5	22,3
5	25,19	3	4,89	32,5	29,1
6	29,92	5	0,50	33,6	32,3
7	2,78	4	5,35	1,2	0,2
8	3,41	20	6,60	2,4	0,4
9	8,09	35	7,56	6,6	2,0
10	19,83	22	5,27	18,0	11,8
11	27,59	13	1,76	28,5	25,4
12	28,33	4	1,61	32,3	30,4
13	27,38	3	0,26	33,4	32,3
14	10,41	34	3,67	7,4	2,5
15	10,64	30	5,06	11,0	5,7
16	15,66	10	5,44	16,3	10,4
17	21,50	4	6,89	22,8	17,3
18	24,53	1	0,00	30,0	28,0
19	21,98	1	0,00	32,5	31,2
20	12,49	13	3,93	11,0	5,4
21	15,17	33	4,90	16,6	9,7
22	20,49	7	4,86	24,6	20,7
23	26,52	1	0,00	28,5	25,0
24	17,25	1	0,00	31,9	30,8
25	29,95	6	3,11	25,4	17,1
26	25,73	12	7,54	29,1	25,8
27	18,55	1	0,00	32,1	30,9
28	33,02	8	0,58	31,5	26,5
29	27,32	3	5,36	32,1	30,5

Tabla 9.5: Parámetros estadísticos determinados por Guerrero et al (2004) y salinidad media obtenida con la versión del modelo con vientos de Punta Brava (versión PB) y con vientos de Pontón Recalada (versión PR), para cada cuadrante, para el período cálido y caudal fluvial alto.

Con relación a los valores presentados en la Tabla 9.5 cabe aclarar que los valores obtenidos con ambas versiones del modelo para el cuadrante 1 se consideran similares al definido por los datos debido a la pequeña diferencia que existe entre los mismos. Por otro lado, en los cuadrantes 18, 19, 23, 24 y 27 solamente se utilizó un dato para definir la salinidad media y la desviación estándar por lo que la coincidencia se hace casi imposible. Si se descartan estos cinco cuadrantes como si no se tuviera información, se tiene que para el período cálido y caudal fluvial alto la

versión del modelo de Punta Brava reproduce un 71% de los valores de los cuadrantes y que la versión de Pontón Recalada lo hace en un 54% de los casos. En la Figura 9.9 se observa la distribución de estos cuadrantes para las dos versiones del modelo. Los cuadrantes sin numeración son los que tienen solamente un dato y en los cuales no se considera válida la comparación. Se observa que en el caso de Punta Brava en la zona central del Río de la Plata los valores obtenidos son correctos, mientras que en las zonas costeras exteriores no se representan los valores medios obtenidos con los datos. Con la versión de Pontón Recalada no es tan buena la representación de la zona central.

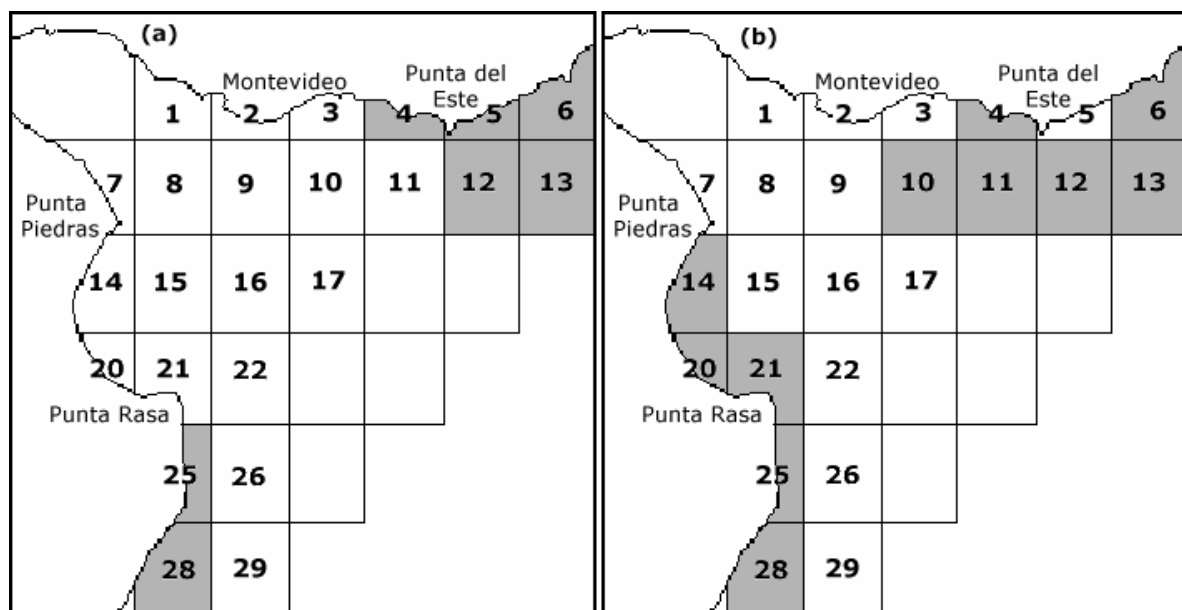


Figura 9.9: Distribución de los cuadrantes (marcados en gris) para el período cálido y caudal alto en donde los valores medios obtenidos con (a) la versión de Punta Brava del modelo y (b) la versión de Pontón Recalada, no reproducen los valores obtenidos con los datos.

9.5.3 - Período Cálido – Caudal Fluvial Bajo

Los resultados obtenidos y su comparación con las curvas de isoconcentración determinadas en función de los datos por Guerrero et al (2004) para el período cálido y caudal fluvial bajo se presentan en la Figura 9.10.

Se observa en la Figura 9.10(a) que la versión de Punta Brava representa en algunas zonas los mismos rangos de variación de salinidad que los datos. Por ejemplo el rango 10 a 15 ppm determinado por los datos incluye totalmente a la zona con ese rango de variación calculada con el modelo. Sin embargo este rango abarca una zona mayor sobre la Bahía de Samborombón que el modelo no representa. Sobre la costa uruguaya los gradientes calculados de las dos formas son similares, con algunas zonas de rangos coincidentes. En la zona exterior y hacia el Sur de la misma el modelo calcula valores mayores a 30 ppm mientras los datos determinan una zona de valores menores a 30 ppm mucho mayor.

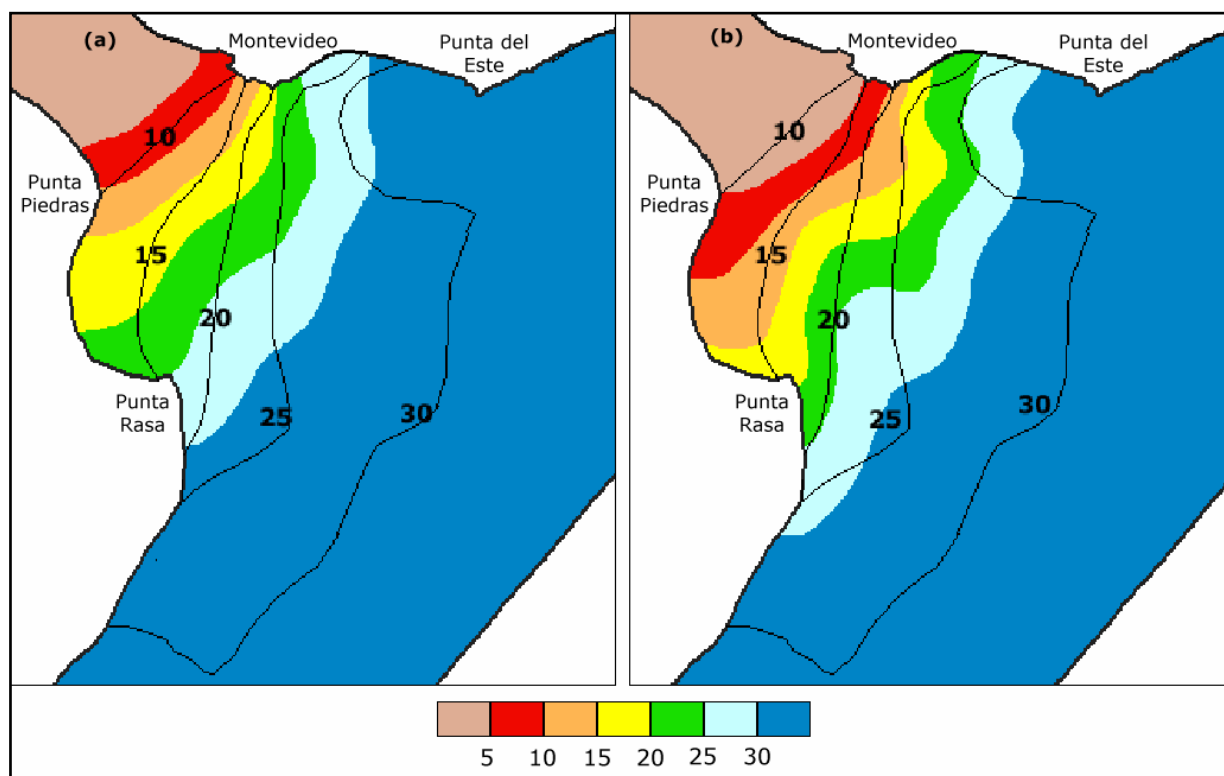


Figura 9.10: Comparación de las curvas de isoconcentración de salinidad (ppm) para el período cálido y caudal fluvial bajo obtenidas por Guerrero et al (2004) y con el modelo utilizando (a) vientos de Punta Brava y (b) vientos de Pontón Recalada.

La distribución de salinidades obtenida con la versión de Pontón Recalada (Figura 9.10(b)) hasta la curva de 20 ppm no presenta zonas de variación de salinidad en común con los datos sobre la costa uruguaya. En cambio sobre la Bahía de Samborombón las zonas de los rangos de los datos incluyen las calculadas por el modelo para los rangos entre 10 y 15 ppm, y entre 15 y 20 ppm. El rango de salinidades entre 25 y 30 ppm es representado por el modelo solamente en una zona central del Río de la Plata lejana a las costas. La zona determinada con los datos correspondiente a dicho rango es mucho mayor que la calculada por el modelo.

La comparación de los valores medios de salinidad determinados según los datos (Guerrero et al, 2004) y según las dos versiones del modelo en cada cuadrante, se presentan en la Tabla 9.6 para el período cálido y caudal fluvial bajo. En este caso solamente en el cuadrante 5 se tuvo un solo dato de salinidad, por lo que nuevamente se toma este cuadrante como si no se tuviera información, pues la comparación se dificulta. Considerando entonces un total de 27 cuadrantes la versión de Punta Brava representa en 15 (56%) los valores medios y la versión de Pontón Recalada lo hace en 18 (67%). Sin embargo, en los cuadrantes 17, 18, 19, 23 y 24 las diferencias entre los valores medios obtenidos con el modelo y los valores medios calculados con los datos son pequeñas, menores a 3,5 ppm en todos esos cuadrantes. Además en el cuadrante 27 se tienen solo dos datos, lo que también dificulta el ajuste. Teniendo todo esto en cuenta se considera como aceptable la representación de los valores medios calculados por las versiones del modelo, sobretodo considerando los vientos de Pontón Recalada.

Nº Cuadrante	Parámetros estadísticos (Guerrero et al 2004)			Salinidad media modelo	
	Salinidad Media	Número Datos	Desviación Estándar	Versión PB	Versión PR
1	6,78	19	6,50	4,0	0,6
2	15,43	4	13,24	12,7	6,3
3	24,83	8	9,16	28,2	23,2
4	26,57	2	8,29	32,7	31,2
5	20,16	1	0,00	33,9	33,9
6	24,73	17	8,96	34,0	34,0
7	---	---	---	---	---
8	10,97	45	8,40	10,3	4,7
9	18,81	27	8,76	19,0	12,7
10	23,45	20	6,79	27,8	23,9
11	29,13	11	5,67	32,5	31,8
12	31,33	6	3,90	33,7	33,8
13	32,43	9	2,23	33,9	33,9
14	11,48	37	1,90	16,9	9,9
15	16,07	29	4,90	20,4	15,9
16	21,34	23	8,76	25,4	22,5
17	29,35	5	1,99	29,6	27,3
18	30,30	4	1,81	32,7	32,3
19	32,21	3	0,16	33,6	33,5
20	11,02	23	1,93	20,7	14,6
21	15,09	42	5,25	25,0	19,7
22	20,98	17	5,26	29,7	28,3
23	29,05	11	2,29	31,9	30,9
24	29,69	9	2,32	33,2	33,0
25	23,82	14	6,66	30,6	26,4
26	22,58	6	5,31	32,0	30,6
27	27,04	2	0,10	33,3	32,9
28	27,22	9	6,94	33,2	31,4
29	26,75	13	9,08	33,3	32,6

Tabla 9.6: Parámetros estadísticos determinados por Guerrero et al (2004) y salinidad media obtenida con la versión del modelo con vientos de Punta Brava (versión PB) y con vientos de Pontón Recalada (versión PR), para cada cuadrante, para el período cálido y caudal fluvial bajo.

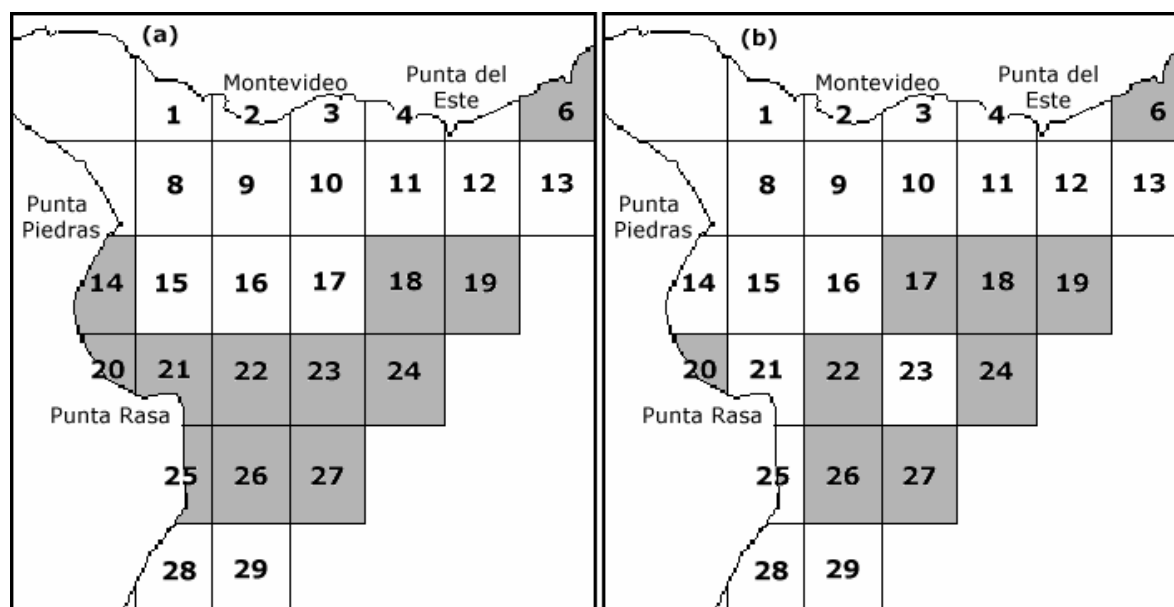


Figura 9.11: Distribución de los cuadrantes (marcados en gris) para el período cálido y caudal bajo en donde los valores medios obtenidos con (a) la versión de Punta Brava del modelo y (b) la versión de Pontón Recalada, no reproducen los valores obtenidos con los datos.

La diferencia entre las dos versiones del modelo y su representación de los valores medios determinados con los datos se observa en la Figura 9.11. En la Figura 9.11(a) se observa que la versión de Punta Brava representa correctamente los valores medios de salinidad para este escenario en la zona central y costera uruguaya del Río de la Plata. Sin embargo sobre la Bahía de Samborombón, la costa argentina al sur de Punta Rasa y la zona externa pasando la línea Punta Rasa – Punta del Este, el modelo calcula valores medios de salinidad que no se asemejan a los determinados por los datos. Con la versión de Pontón Recalada, la distribución de los cuadrantes (Figura 9.11(b)) nos muestra una buena representación del campo salino medio en la mayoría de la zona estuarina del Río de la Plata, entre la línea Punta Piedras – Montevideo y la línea Punta Rasa – Punta del Este.

9.5.4 - Período Frío – Caudal Fluvial Medio

En la Figura 9.12 se presenta la comparación de las curvas de isoconcentración obtenida con las dos versiones del modelo y las determinadas en el análisis de Guerrero et al (2004), para el período frío y caudal fluvial medio.

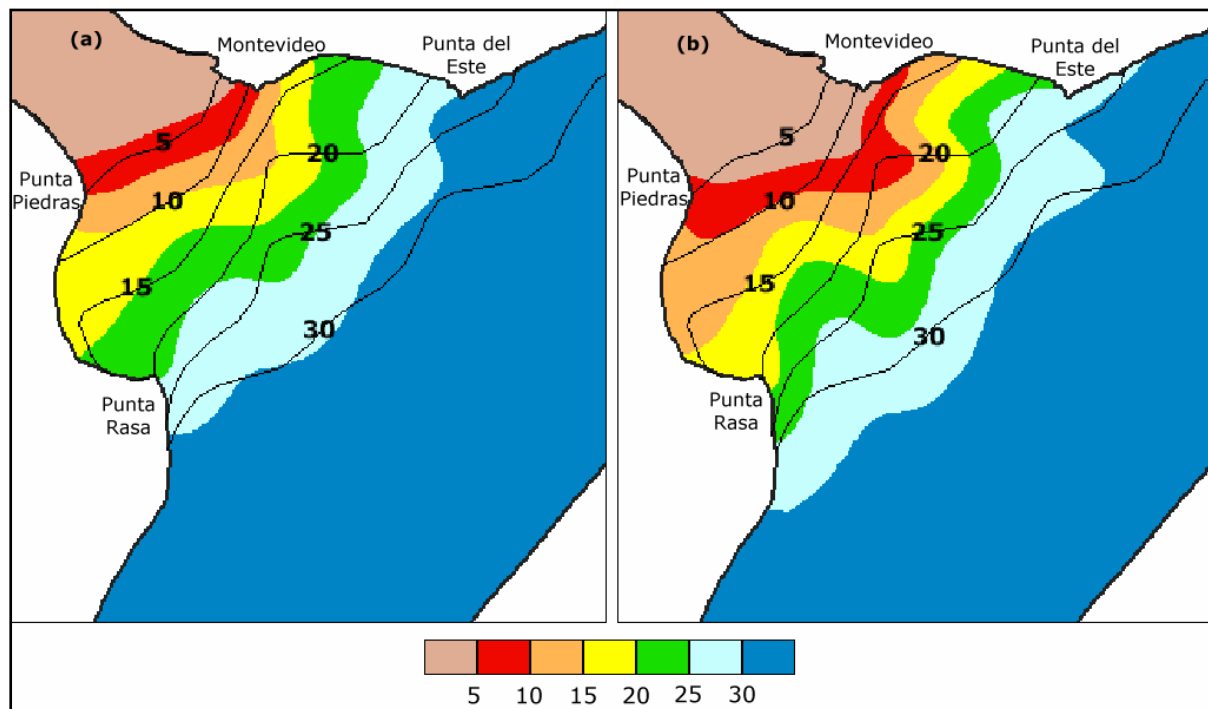


Figura 9.12: Comparación de las curvas de isoconcentración de salinidad (ppm) para el período frío y caudal fluvial medio obtenidas por Guerrero et al (2004) y con el modelo utilizando (a) vientos de Punta Brava y (b) vientos de Pontón Recalada.

Se observa en la Figura 9.12(a) que la versión del modelo con los vientos de Punta Brava representa correctamente las zonas de salinidades menores a 15 ppm sobre la costa uruguaya. En la zona de la Bahía de Samborombón en cambio el modelo calcula salinidades mayores a las determinadas con los datos. Por otro lado la zona calculada con el modelo del rango de salinidad entre 25 y 30 ppm coincide con la determinada por los datos principalmente en la zona central y

sobre la costa argentina. En la Figura 9.12(b) se observa que la versión del modelo que utiliza los vientos de Pontón Recalada representa correctamente los rangos de salinidad menores a 20 ppm sobre la costa argentina y no lo hace sobre la costa uruguaya. Sobre la costa uruguaya solamente el rango entre 15 ppm y 20 ppm calculado con el modelo coincide con la zona correspondiente a dicho rango determinada por los datos. Por último, el modelo calcula salinidades menores a 30 ppm sobre la costa argentina en una zona al Sur de Punta Rasa, donde los datos en cambio indican salinidades mayores a 30 ppm.

Tabla 9.7: Parámetros estadísticos determinados por Guerrero et al (2004) y salinidad media

Nº Cuadrante	Parámetros estadísticos (Guerrero et al 2004)			Salinidad media modelo	
	Salinidad Media	Salinidad Media	Número Datos	Versión PB	Versión PR
1	0,69	4	0,59	1,3	0,1
2	13,29	5	8,06	5,8	1,3
3	14,21	14	6,29	20,5	13,0
4	15,27	6	5,44	27,9	23,8
5	23,94	7	5,44	31,7	29,2
6	25,52	13	4,79	32,9	31,6
7	0,67	6	0,50	4,9	2,9
8	4,42	50	5,07	8,2	3,9
9	11,76	42	7,97	13,1	6,6
10	18,61	34	6,70	21,7	16,0
11	22,18	27	7,24	28,8	26,9
12	27,18	15	6,10	31,8	30,4
13	30,97	15	3,34	33,1	32,4
14	14,22	14	5,73	17,0	11,8
15	17,47	40	8,63	20,2	16,0
16	19,92	27	8,29	23,5	19,3
17	25,39	17	7,33	26,4	22,6
18	29,48	12	4,03	30,8	29,9
19	28,72	1	0,00	32,7	32,3
20	12,72	6	1,65	20,0	14,8
21	21,34	43	8,68	24,7	19,7
22	27,34	34	5,21	29,3	26,8
23	32,50	7	2,04	30,8	28,7
24	33,71	3	0,06	32,5	32,0
25	32,37	7	2,72	31,1	26,8
26	33,50	16	0,98	32,1	30,3
27	33,32	8	0,81	33,1	32,5
28	33,85	10	0,25	33,5	32,4
29	33,26	7	1,30	33,5	32,8

obtenida con la versión del modelo con vientos de Punta Brava (versión PB) y con vientos de Pontón Recalada (versión PR), para cada cuadrante, para el período frío y caudal fluvial medio.

En la Tabla 9.7 se presenta la comparación de los parámetros estadísticos determinados por Guerrero et al (2004) y las salinidades medias calculadas con las dos versiones del modelo, en los cuadrantes definidos anteriormente en el período frío y caudal fluvial medio. Se observa en este escenario que el número de cuadrantes en donde el modelo representa el valor medio calculado con los datos es grande. Eliminando los datos del cuadrante 19 en donde solamente se tiene un dato de salinidad, en un 71% de los cuadrantes la versión de Punta Brava representa aproximadamente los valores medios y en un 64% lo hace la versión de Pontón Recalada. Además,

en los cuadrantes 24 y 28 las diferencias entre las salinidades medias modeladas y la salinidad media calculada por los datos son menores a los 2 ppm.

La distribución de los cuadrantes en donde las versiones del modelo determinan valores correctos e incorrectos de salinidad se presenta en la Figura 9.13. Se observa en la misma que la versión de Punta Brava principalmente no reproduce la salinidad media sobre la costa uruguaya al Este de Montevideo, y la salinidad media en la zona exterior del Río de la Plata hacia la costa argentina. Se obtiene en cambio una muy buena representación del campo medio de salinidad para el período frío y caudal medio en la zona estuarina del Río de la Plata y en la zona exterior central. La versión de Pontón Recalada en cambio presenta valores incorrectos de salinidad media a lo largo de la costa uruguaya, a lo largo de la costa argentina y en la zona exterior central del Río de la Plata. La zona central interior alejada de las costas es en cambio representada correctamente.

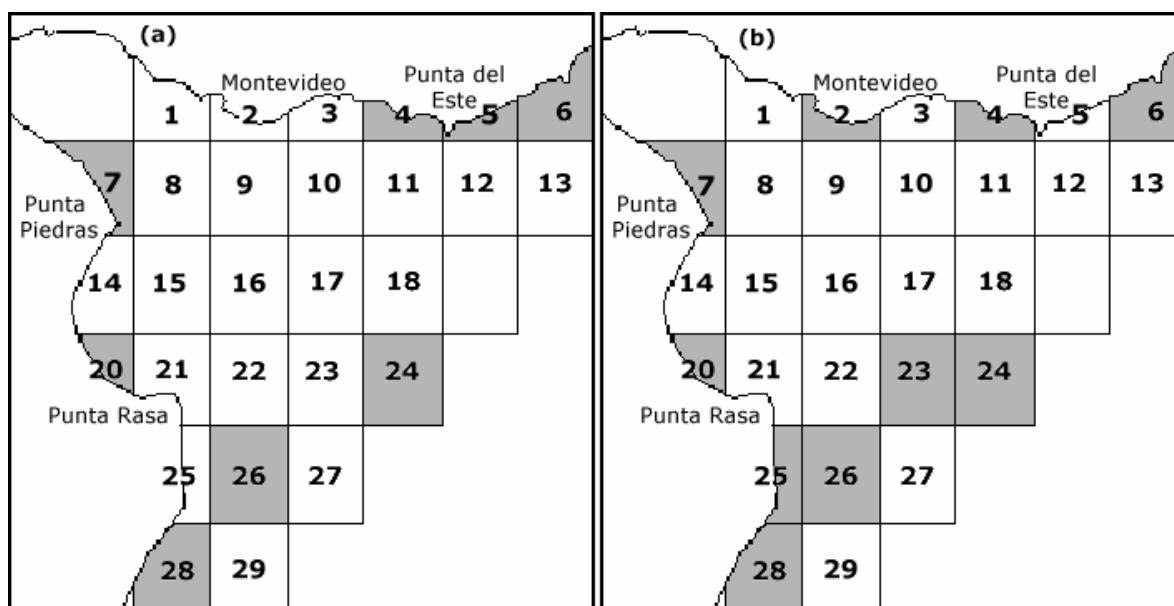


Figura 9.13: Distribución de los cuadrantes (marcados en gris) para el período frío y caudal medio en donde los valores medios obtenidos con (a) la versión de Punta Brava del modelo y (b) la versión de Pontón Recalada, no reproducen los valores obtenidos con los datos.

9.5.5 - Período Frío – Caudal Fluvial Alto

La comparación de las curvas horizontales de isoconcentración de salinidad obtenidas con las dos versiones del modelo con las curvas determinadas en función de los datos, para el período frío y caudal alto se presenta en la Figura 9.14. Con la versión de Punta Brava los rangos de salinidad obtenidos con el modelo y los datos no coinciden en la mayoría del dominio de cálculo. Solamente entre los rangos de 20 y 25 ppm y 25 y 30 ppm se observan alguna zona coincidente, principalmente sobre la costa argentina y la zona central del Río de la Plata. Con la versión de Pontón Recalada las zonas de salinidades menores a 10 ppm muestran una mayor coincidencia que con la otra versión del modelo. Principalmente sobre la zona hacia la costa argentina todos los

rangos de salinidad coinciden, aunque la forma de las curvas de isoconcentración obtenidas con el modelo y los datos son distintas.

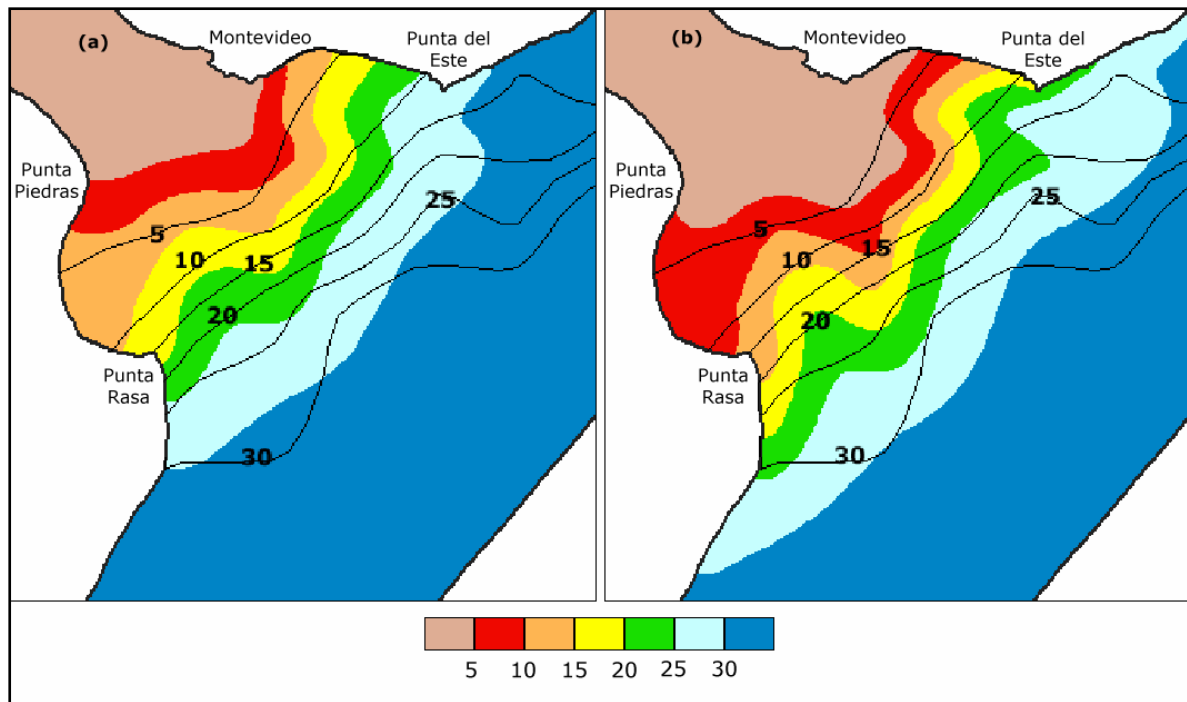


Figura 9.14: Comparación de las curvas de isoconcentración de salinidad (ppm) para el período frío y caudal fluvial alto obtenidas por Guerrero et al (2004) y con el modelo utilizando (a) vientos de Punta Brava y (b) vientos de Pontón Recalada.

En la Tabla 9.8 se presenta la comparación de los parámetros estadísticos presentados por Guerrero et al (2004) y los valores medios de salinidad obtenidos con las dos versiones del modelo en los cuadrantes definidos anteriormente. Los valores marcados corresponden a resultados del modelo que no pertenecen al rango de salinidad definido por los parámetros estadísticos. Se observa en este caso que en 6 de los 29 cuadrantes no se tienen valores medios de salinidad determinados a partir de los datos. Por otra parte, en cinco cuadrantes solamente se cuenta con un dato, lo que dificulta la comparación con los valores obtenidos con las versiones del modelo. Eliminando estos dos tipos de cuadrantes, se tiene un total de 18 cuadrantes. Con la versión de Punta Brava en 7 cuadrantes (39%) se obtienen salinidad medias similares y con la versión de Pontón Recalada en 12 cuadrantes (67%). La distribución de los cuadrantes con y sin resultados similares entre las versiones del modelo y los datos se presenta en la Figura 9.15. Los cuadrantes sin numeración señalan los cuadrantes donde no se tienen datos o solamente se cuenta con una medida. En la Figura 9.15(a) se observa que la versión de Punta Brava no representa correctamente la salinidad media principalmente en la zona estuarina del Río de la Plata. Sobre la costa argentina hay cuatro cuadrantes donde los valores son aceptables. Los resultados obtenidos con la versión de Pontón Recalada, que se presentan en la Figura 9.15(b), muestran en cambio una correcta representación de los valores medios en la mayoría de los cuadrantes pertenecientes a la zona central del Río de la Plata.

Nº Cuadrante	Parámetros estadísticos (Guerrero et al 2004)			Salinidad media modelo	
	Salinidad Media	Número Datos	Desviación Estándar	Versión PB	Versión PR
1	0,14	12	0,13	0,1	0,0
2	2,11	1	0,00	1,4	0,1
3	6,57	2	1,22	13,3	5,4
4	11,34	1	0,00	23,9	17,3
5	13,26	1	0,00	29,8	24,8
6	---	---	---	---	---
7	0,21	9	0,17	2,1	1,2
8	1,12	11	1,73	3,6	1,2
9	2,80	6	3,11	5,9	1,5
10	5,99	10	3,66	15,1	8,4
11	9,79	6	3,96	25,8	22,1
12	14,42	1	0,00	30,1	27,0
13	---	---	---	---	---
14	5,65	8	1,72	10,8	6,0
15	6,78	17	6,48	14,0	8,9
16	4,91	7	5,61	17,2	11,1
17	15,72	4	10,53	21,5	15,8
18	31,84	2	1,39	28,8	27,1
19	---	---	---	---	---
20	6,53	3	1,75	13,6	8,2
21	17,42	11	10,40	19,0	12,7
22	14,76	7	12,88	25,5	21,5
23	33,74	1	0,00	28,2	24,5
24	---	---	---	---	---
25	31,12	4	0,77	27,5	20,3
26	30,94	9	3,92	30,0	27,0
27	---	---	---	---	---
28	33,12	5	0,52	32,6	29,6
29	---	---	---	---	---

Tabla 9.8: Parámetros estadísticos determinados por Guerrero et al (2004) y salinidad media obtenida con la versión del modelo con vientos de Punta Brava (versión PB) y con vientos de Pontón Recalada (versión PR), para cada cuadrante, para el período frío y caudal fluvial alto.

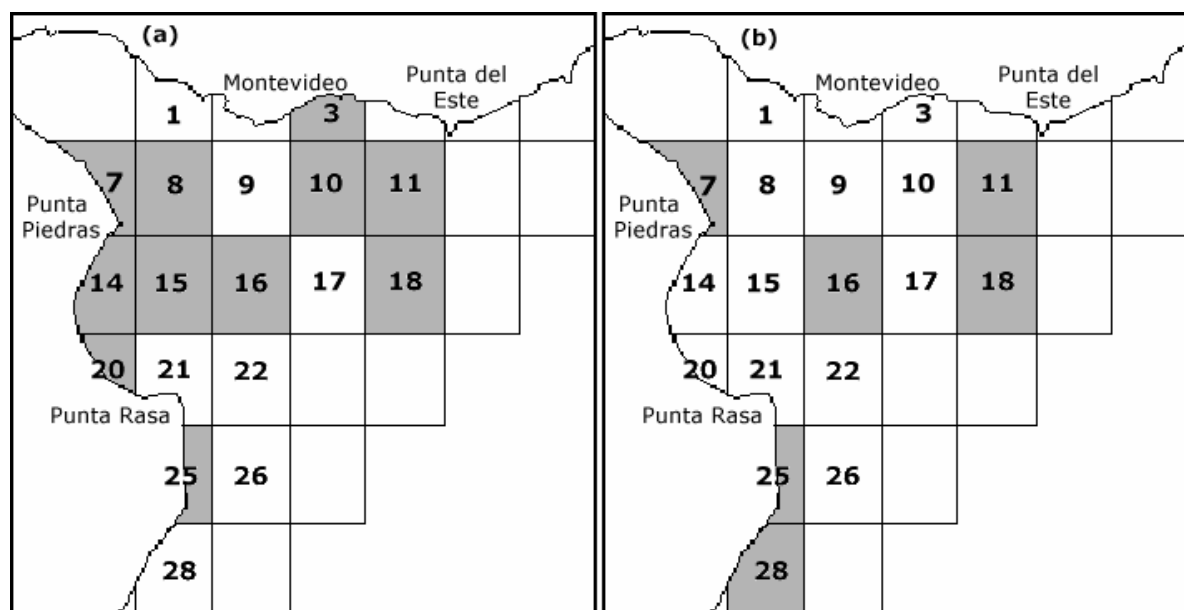


Figura 9.15: Distribución de los cuadrantes (marcados en gris) para el período frío y caudal alto en donde los valores medios obtenidos con (a) la versión de Punta Brava del modelo y (b) la versión de Pontón Recalada, no reproducen los valores obtenidos con los datos.

9.5.6 - Período Frío – Caudal Fluvial Bajo

En la Figura 9.16 se muestra la comparación de la distribución horizontal de salinidad media obtenida con los datos según Guerrero et al (2004) y con las dos versiones del modelo, para el período frío y caudal fluvial bajo.

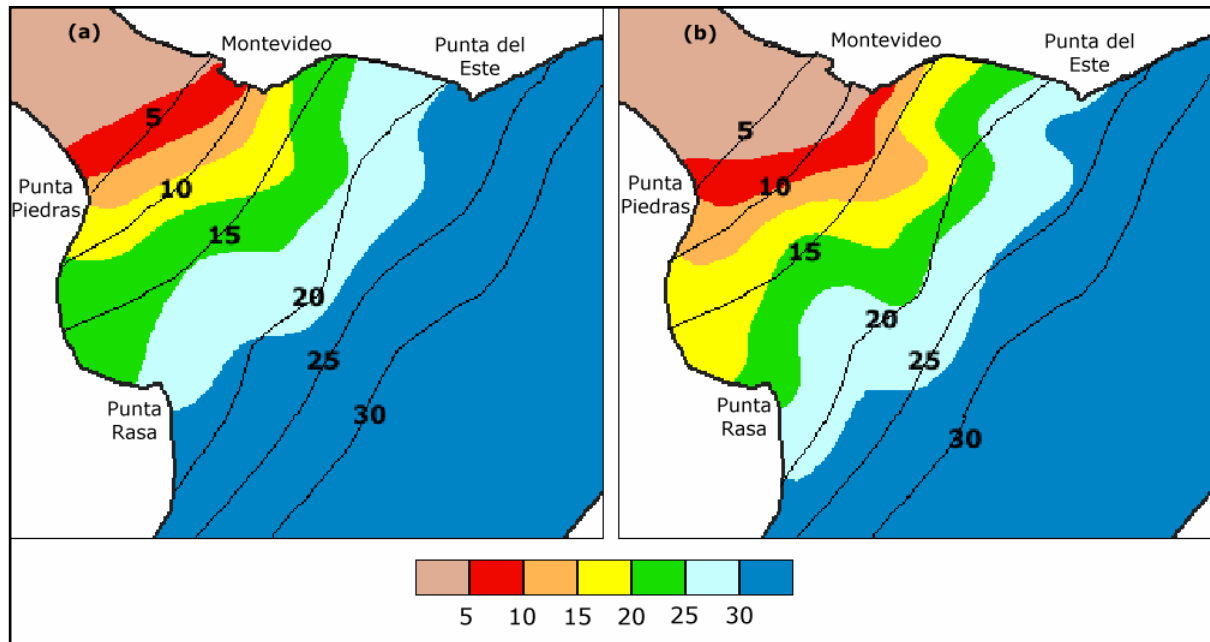


Figura 9.16: Comparación de las curvas de isoconcentración de salinidad (ppm) para el período frío y caudal fluvial bajo obtenidas por Guerrero et al (2004) y con el modelo utilizando (a) vientos de Punta Brava y (b) vientos de Pontón Recalada.

En la Figura 9.16(a) se observa que con la versión del modelo que utiliza los vientos de Punta Brava solamente coinciden las zonas correspondientes a salinidades menores a 10 ppm, principalmente sobre la costa uruguaya. La diferencia principal entre el modelo y los datos es la ubicación de las curvas de 25 y 30 ppm. Mientras que las determinadas con los datos se ubican hacia el exterior de la línea Punta del Este – Punta Rasa, la curva modelada de 30 ppm se ubica en dicha línea. Con la versión del modelo que utiliza los vientos de Pontón Recalada (Figura 9.16(b)), se dan algunas zonas de coincidencia de rangos medidos y modelados de salinidad media principalmente sobre la costa argentina. Con esta versión del modelo la línea de 30 ppm está ubicada aproximadamente en la misma zona que la curva de 25 ppm según los datos. En la mayoría del Río de la Plata los rangos de salinidad obtenidos con las dos versiones del modelo no coinciden con los rangos de variación de salinidad media determinados por Guerrero et al (2004).

Los valores medios de salinidad en cada cuadrante del dominio de cálculo calculados en función de los datos y según los resultados de las dos versiones del modelo se presentan en la Tabla 9.9.

Nº Cuadrante	Parámetros estadísticos (Guerrero et al 2004)			Salinidad media modelo	
	Salinidad Media	Número Datos	Desviación Estándar	Versión PB	Versión PR
1	---	---	---	---	---
2	9,63	1	0,00	9,6	3,1
3	17,34	1	0,00	23,6	17,0
4	16,35	2	0,76	29,3	26,2
5	---	---	---	---	---
6	---	---	---	---	---
7	0,45	1	0,00	7,4	4,8
8	3,21	2	1,95	11,6	6,3
9	12,18	3	6,04	17,1	10,5
10	16,61	2	2,06	24,5	19,8
11	20,88	11	2,03	30,0	28,6
12	29,53	3	5,55	32,3	31,5
13	32,50	1	0,00	33,4	33,1
14	16,79	1	0,00	20,5	15,5
15	18,88	1	0,00	23,2	19,5
16	23,82	2	1,93	26,2	22,8
17	23,68	2	9,01	28,3	25,3
18	---	---	---	---	---
19	31,45	1	0,00	33,0	32,8
20	---	---	---	---	---
21	18,95	5	1,03	27,3	23,2
22	19,50	53	2,15	30,7	28,8
23	30,46	1	0,00	31,8	30,2
24	---	---	---	---	---
25	---	---	---	---	---
26	28,04	2	2,26	32,8	31,6
27	31,91	5	2,79	33,4	33,0
28	---	---	---	---	---
29	34,37	1	0,00	33,7	33,3

Tabla 9.9: Parámetros estadísticos determinados por Guerrero et al (2004) y salinidad media obtenida con la versión del modelo con vientos de Punta Brava (versión PB) y con vientos de Pontón Recalada (versión PR), para cada cuadrante, para el período frío y caudal fluvial bajo.

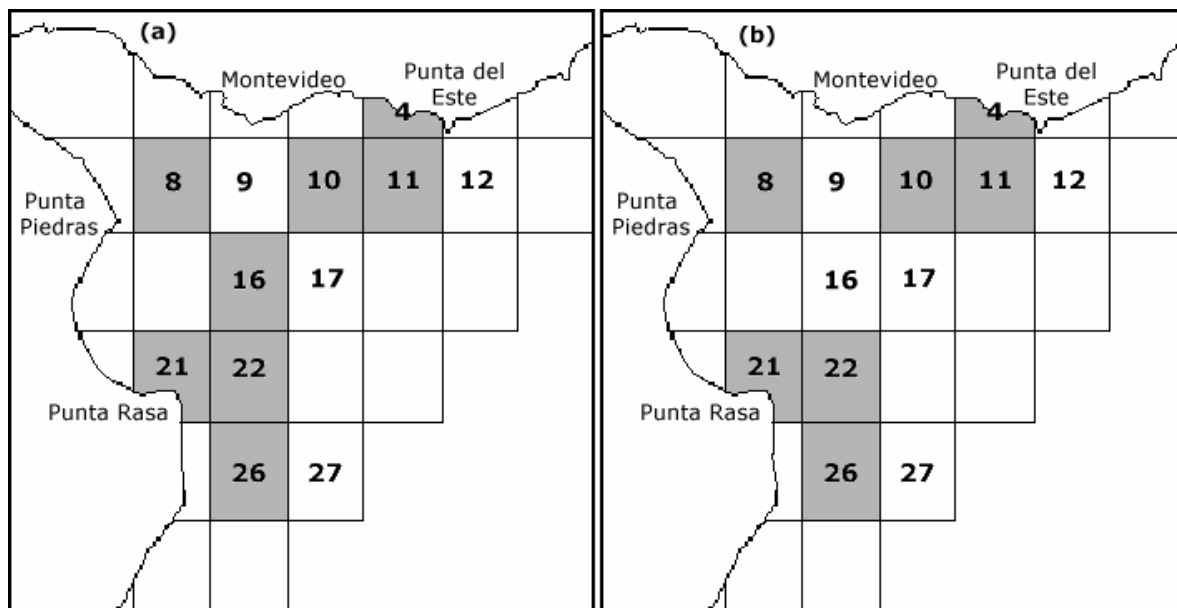


Figura 9.17: Distribución de los cuadrantes (marcados en gris) para el período frío y caudal bajo en donde los valores medios obtenidos con (a) la versión de Punta Brava del modelo y (b) la versión de Pontón Recalada, no reproducen los valores obtenidos con los datos.

Como se observa en la Tabla 9.9, para este escenario los datos utilizados para hacer el análisis de Guerrero et al (2004) son pocos. Solamente en 21 cuadrantes de un total de 29 se tienen datos de salinidad, y en 9 de los 21 solamente se cuenta con un registro de salinidad. Debido a esto la comparación con los resultados del modelo se hace más dificultosa en este escenario. Descartando todos estos cuadrantes quedan solamente 12 con más de dos registros de salinidad. La versión de Punta Brava calcula valores aceptables de salinidad media en 4 de esos 12 cuadrantes (33%) y la versión de Pontón Recalada lo hace en 5 de los 12 cuadrantes (42%).

La distribución espacial de los resultados obtenidos en la comparación de los cuadrantes se presenta en la Figura 9.17. Los cuadrantes sin numeración representan los cuadrantes sin datos o con una sola medición de salinidad. Se observa en la misma que en pocos cuadrantes se obtienen resultados aceptables. En la versión de Punta Brava los cuadrantes donde se obtienen resultados aceptables no están agrupados en una región especial, en cambio en la versión de Pontón Recalada 3 de los cinco cuadrantes están ubicados en la zona central del Río de la Plata.

9.5.7 - Análisis general

Se ha mostrado la comparación de las distribuciones horizontales de salinidad en el Río de la Plata calculadas con las dos versiones del modelo con las determinadas según una serie de mediciones de salinidad por Guerrero et al (2004), para los escenarios cálido y frío con caudales altos, bajos y medios. Estos resultados muestran en la mayoría de los escenarios representaciones aceptables del campo salino medio, principalmente en la zona central estuarina del Río de la Plata.

Considerando los escenarios más habituales, los períodos cálido y frío con caudal fluvial medio, los resultados muestran que las dos versiones de modelo representaron más de un 60% de los cuadrantes definidos en el dominio de cálculo. En estos dos escenarios el análisis de Guerrero et al (2004) se realizó a partir de un número importante de mediciones de salinidad, siendo el número de datos en los cuadrantes definidos en la Figura 9.5 igual a 493 para el período cálido y 490 para el período frío. La Figura 9.7 y la Figura 9.13, presentadas anteriormente, muestran claramente que ambas versiones representan correctamente la salinidad en la zona central estuarina del Río de la Plata, que la versión de Punta Brava representa correctamente además la salinidad media sobre la costa uruguaya y que en cambio la versión de Pontón Recalada lo hace en la zona cercana a la costa argentina. Por otra parte, es lógico que la representación de la zona exterior del Río de la Plata sea de menor calidad que la de la zona central del río por estar más cerca de la frontera del dominio de cálculo, y por lo tanto más influenciada por la aproximación utilizada en las condiciones de borde.

La buena representación de la salinidad media en la zona central pierde un poco de calidad cuando se consideran los escenarios con caudales extremos. Sin embargo, es importante tener en cuenta el número de datos utilizados para realizar la estadística de salinidad media en esos casos. Mientras que en el período cálido se tiene en los cuadrantes un total de 293 datos con caudal alto y

381 con caudal bajo, en el período frío estos valores disminuyen a 138 y 101 respectivamente. Debido a esto, la estadística de salinidad media pierde confiabilidad en los escenarios con caudales extremos en el período frío y como consecuencia la comparación con los resultados del modelo pierde calidad y no tiene tanta validez. En los escenarios de caudales extremos para el período cálido la base de datos es aceptable y la comparación con los resultados del modelo muestra en algunos casos una buena representación de los datos y en otros casos no. La versión de Punta Brava representa mejor la salinidad media para el período cálido y caudal alto (Figura 9.9) mientras que con la versión de Pontón Recalada se logra un mayor porcentaje de representatividad para el período cálido pero con caudal bajo (Figura 9.11). En estos casos se observa también que la versión de Punta Brava representa correctamente la zona central estuarina del Río de la Plata y la zona costera uruguaya. La versión de Pontón Recalada representa también correctamente la zona central pero no se observa en estos escenarios una buena representación de la costa argentina.

En las distribuciones de salinidad media calculadas por Guerrero et al (2004) se observan algunas de las afirmaciones que fueron señaladas en 9.4 a partir de las distribuciones calculadas con el modelo. Como se mencionó anteriormente, se observó a partir de las modelaciones que sobre la costa uruguaya las salinidades del período cálido son mayores a las salinidades del período frío y que sobre la costa argentina las del período cálido son menores a las del período frío. Comparando las distribuciones de salinidad determinadas por los datos para el período cálido y el período frío, para caudal fluvial medio, alto y bajo, (Figuras 9.6 y 9.12; Figuras 9.8 y 9.14; y Figuras 9.10 y 9.16) se observa que en la costa uruguaya las salinidades en el período cálido son mayores a las salinidades en el período frío para los tres valores de caudal fluvial y que en la costa argentina las salinidades del período cálido son menores a las salinidades del período frío en los casos de caudal fluvial medio y bajo, no observándose este comportamiento en el caso de caudal fluvial alto. Por otro lado, también se observó a partir de las modelaciones que la salinidad en cada punto costero disminuye a medida que aumenta el caudal fluvial y que aumenta a medida que disminuye el caudal fluvial. Analizando las Figuras 9.6, 9.8 y 9.10, correspondientes a los caudales medios, altos y bajos para el período cálido, se observa que sobre la costa uruguaya se verifica la relación inversa entre caudal fluvial y salinidad pero que sobre la costa argentina no. Por otro lado, las distribuciones de Guerrero et al (2004) para el período frío para los distintos caudales fluviales, presentadas en las Figuras 9.12, 9.14 y 9.16, muestran que en la costa uruguaya la salinidad disminuye a medida que aumenta el caudal fluvial y que en la costa argentina disminuye cuando se pasa del caudal medio al alto pero no aumenta cuando se pasa del medio al bajo.

En definitiva se considera aceptable la modelación del campo salino horizontal estacional con las dos versiones del modelo, pues se ha mostrado que el modelo representa en la mayoría de los casos salinidades medias pertenecientes a los rangos que muestran los pocos datos de salinidad que se tienen en el dominio de cálculo. Se han identificado variaciones del campo salino sobre las

costas del Río de la Plata con los resultados del modelo, algunas de las cuales se observan también en las distribuciones estacionales calculadas a partir de mediciones de salinidad en el río.

9.6 - Campo de corrientes residuales

A partir de las modelaciones de los períodos cálido y frío, con diferentes condiciones de caudal fluvial descargado, es posible obtener la circulación media del campo de corrientes en el Río de la Plata para cada escenario. Promediando los valores calculados en los últimos treinta días de cada simulación se filtran las componentes astronómicas del campo de velocidades y se obtiene el campo residual de corrientes para cada estación y rango de caudal fluvial. En este punto se presenta la distribución horizontal de velocidad residual para los períodos cálido y frío, con caudal fluvial medio, alto y bajo, obtenidos con las dos versiones del modelo y los vientos medios característicos calculados en las dos estaciones de medición, Punta Brava y Pontón Recalada.

9.6.1 - Período Cálido

Las distribuciones horizontales de la corriente residual correspondientes al período cálido con caudal fluvial medio, alto y bajo, obtenidas con las dos versiones del modelo, se presentan en la Figura 9.18. En la misma se muestra con vectores la dirección de la velocidad media residual en cada punto y con las zonas delimitadas por curvas de igual intensidad el módulo de la misma. Se marcan también las curvas batimétricas de 5, 10, 15, 20, 50 y 100 m para poder analizar en conjunto la batimetría y el campo de corrientes medio residual.

La circulación residual en el Río de la Plata durante el período cálido con caudal fluvial medio muestra un flujo saliente por la zona Sur, sobre la costa argentina y por la zona central del río, que luego se desvía también hacia el Sur del río en la zona central de la línea Punta del Este – Punta Rasa. Por la costa uruguaya se produce un flujo entrante que luego en la parte central del río se desvía también hacia el Sur. Este comportamiento se observa en el campo residual obtenido con las dos versiones del modelo, en la Figura 9.18(a) y en la Figura 9.18(d). Estas corrientes residuales tienen en general intensidades medias de entre 2,5 y 5 cm/s, aumentado a valores entre 5 y 10 cm/s en la zona Sur de Punta Rasa, en la zona central del río sobre el banco de Rouen y en el Canal Oriental al Este de Punta del Este con la versión de Punta Brava. Las intensidades máximas, entre 10 y 25 cm/s, se observan en la zona del Canal Intermedio al Norte de Punta Piedras, y sobre la costa argentina al Sur de Punta Rasa. Corrientes suaves, de intensidad menor a 1 cm/s se observan principalmente en la costa uruguaya entre Montevideo y Punta del Este y en algunas partes de la región estuarina del Río de la Plata, dependiendo de la versión del modelo. Con la versión de Pontón Recalada en la zona costera uruguaya y hacia el Sur de Punta del Este en general las intensidades son menores a las determinadas con la versión de Punta Brava. En cambio en las zonas centrales y Sur del Río de la Plata no existen casi diferencias entre las dos versiones del modelo. En la versión de Pontón Recalada se observa un flujo saliente en una pequeña franja sobre la costa uruguaya de intensidades menores a 5 cm/s.

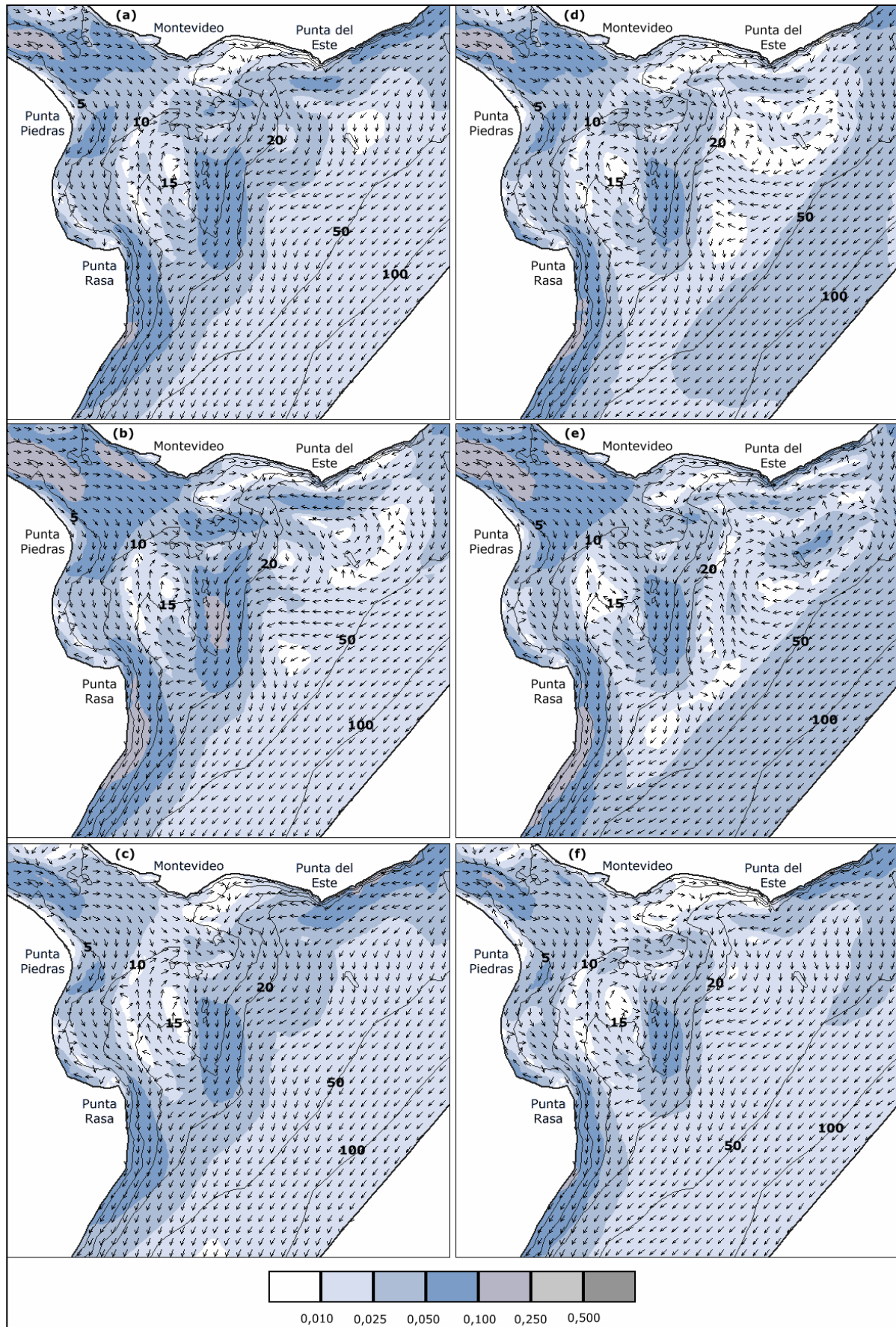


Figura 9.18: Campo de corrientes residuales (m/s) para el período cálido y caudal fluvial (a) medio, (b) alto y (c) bajo con la versión de Punta Brava y para período cálido y caudal fluvial (d) medio, (e) alto y (f) bajo con la versión de Pontón Recalada.

Cuando aumenta el caudal de descarga a valores altos, el campo de corrientes medio presenta algunas diferencias con el caso anterior. En la Figura 9.18(b) y en la Figura 9.18(e) se observa que las direcciones del flujo medio son similares al caso anterior en la mayor parte del dominio de cálculo. Se observa un flujo saliente por la zona Sur y central del río y un ingreso por la zona exterior sobre la costa uruguaya. Sin embargo se observa además en este caso que el flujo saliente sobre la costa uruguaya, que ocurre sobre una franja pequeña pegada a la misma, se intensifica sobretodo en la versión de Pontón Recalada. Por otro lado las intensidades medias en general son mayores que en el caso de caudal medio debido al aumento de la descarga fluvial.

Con el caudal bajo de descarga se observa en la Figura 9.18(c) y en la Figura 9.18(f) que las intensidades en general son bajas, menores a 10 cm/s en todo el Río de la Plata, salvo en una pequeña zona sobre la costa argentina al Sur de Punta Rasa con la versión de Pontón Recalada. La descarga ocurre principalmente por la zona Sur, por la Bahía de Samborombón y la costa argentina, aunque se observa también el flujo saliente por la zona central aunque con intensidades menores. En este caso se observa también el ingreso de agua oceánica por la costa uruguaya hasta la zona central del río, con intensidades mayores a las observadas en dicha zona en el escenario de caudal fluvial alto. Esto muestra que al disminuir el caudal fluvial descargado, el flujo que tiende a salir por la costa uruguaya tiene menos fuerza, lo que permite un mayor ingreso de flujo oceánico. Además, no se observa en este caso el flujo saliente sobre la costa uruguaya que se observó para caudales mayores.

Teniendo en cuenta los resultados presentados para el período cálido y los diferentes caudales fluviales se puede afirmar que este período está caracterizado por un flujo residual saliente por la costa argentina hacia el Sur del Río de la Plata, con un ingreso de agua oceánica por la zona Norte cercana a la costa uruguaya, que luego es desviado por la descarga fluvial y se convierte en un flujo saliente hacia el Sur. Este comportamiento observado en los campos residuales del período cálido coincide con lo mencionado en 2.3, que durante primavera y verano se produce una mayor descarga del agua dulce sobre la costa argentina. Sobre la zona central del Río de la Plata se observan algunas inversiones de flujo debidas principalmente a la batimetría de la zona. Por ejemplo se observa sobre los Bancos Inglés y de Arquímedes un flujo saliente al río con intensidades mayores a las corrientes cercanas y que generan una desviación de las mismas provocando una zona de convergencia del flujo. Algo similar se observa sobre el Banco de Rouen. Se puede relacionar además la batimetría con las direcciones del flujo, pues en esas zonas poco profundas se observa un flujo saliente al Río de la Plata. En la Bahía de Samborombón, el flujo también es saliente en las zonas poco profundas, menores a los 10 m de profundidad. En las áreas más profundas en cambio se observa un flujo entrante, como ser en el Canal Oriental cerca de la costa uruguaya y un flujo de menor intensidad sobre el Canal Marítimo cercano a la costa argentina, en la zona más profunda que indica la curva de 15 m de profundidad al Noreste de Punta Rasa.

9.6.2 - Período Frío

En la Figura 9.19 se presentan las distribuciones horizontales de la corriente residual obtenidas con las dos versiones para el período frío con caudal fluvial medio, alto y bajo. En la misma se indica con vectores la dirección de la velocidad en cada punto y la intensidad con las regiones que marcan las curvas de isointensidad de corriente. Igual que para el período cálido, se marcan las curvas batimétricas. En las Figuras 9.19(a) y 9.19(d) se observa que la circulación media para el período frío y caudal medio en el Río de la Plata obtenida con las dos versiones del modelo es similar. La misma se caracteriza por flujos salientes en varias zonas, por el Sur del río sobre la costa argentina, por una zona central del río y por la costa Norte sobre la costa uruguaya, en general por las zonas poco profundas. Por otro lado se observa un flujo entrante por el Canal Oriental sobre la costa Norte y por la zona del Canal Marítimo. El flujo saliente por la zona central del río en la zona exterior se continúa en un flujo que descarga por la zona Sur y en un flujo saliente hacia el Noreste, por la costa uruguaya. Esto genera zonas de inversión de flujo en la parte central del Río de la Plata, y variaciones del sentido del flujo dentro de una sección transversal. Por ejemplo en la sección formada por Punta Rasa – Punta del Este se observan zonas de flujo entrante en las zonas profundas y zonas de flujo saliente en las zonas poco profundas. Por otro lado, las mayores intensidades medias residuales, entre 5 y 10 cm/s, ocurren hacia el Sur de Punta Rasa sobre la costa argentina, hacia el Este de Punta del Este sobre la costa uruguaya, sobre los Bancos Inglés, de Arquímedes y Rouen y en una zona hacia el Sureste de Punta del Este con la versión de Pontón Recalada.

El campo de corrientes residuales para el período frío y caudal fluvial alto muestra una circulación general similar al caso de caudal medio. Se observan flujos salientes por la zona Sur y Norte del río y flujos entrantes por las zonas profundas del Norte y del Canal Marítimo. Sin embargo las intensidades medias del campo de corrientes son mayores en la mayoría del dominio de cálculo. Muchas zonas con intensidades entre 2,5 y 5 cm/s con caudal fluvial medio presentan intensidades entre 5 y 10 cm/s con caudal fluvial alto. Además se puede observar en las Figuras 9.19(b) y 9.19(e) que existen varias regiones de intensidades de corriente entre 10 y 25 cm/s. Las mismas están ubicadas en el Río de la Plata intermedio al Noroeste de la línea Punta Piedras – Montevideo, en la costa uruguaya al Este de Punta del Este, en una pequeña zona sobre la costa argentina al Sur de Punta Rasa, sobre los Bancos de Arquímedes y Rouen con la versión de Punta Brava y en una zona del Frente Marítimo con la versión de Pontón Recalada. Los resultados obtenidos con caudal fluvial bajo (Figura 9.19(c) y Figura 9.19(f)) muestran los mismos patrones de circulación que se identificaron para el caudal fluvial medio y el caudal fluvial alto. En este caso lo que varía son las intensidades medias, siendo menores a las registradas en los dos casos anteriores. En este caso las intensidades en todo el Río de la Plata son menores a los 10 cm/s, con las máximas ubicadas en la costa uruguaya al Este de Punta del Este, sobre los bancos Arquímedes y Rouen y en el Río de la Plata intermedio. En la versión de Pontón Recalada se observan también intensidades máximas en la zona Norte de la región exterior del río.

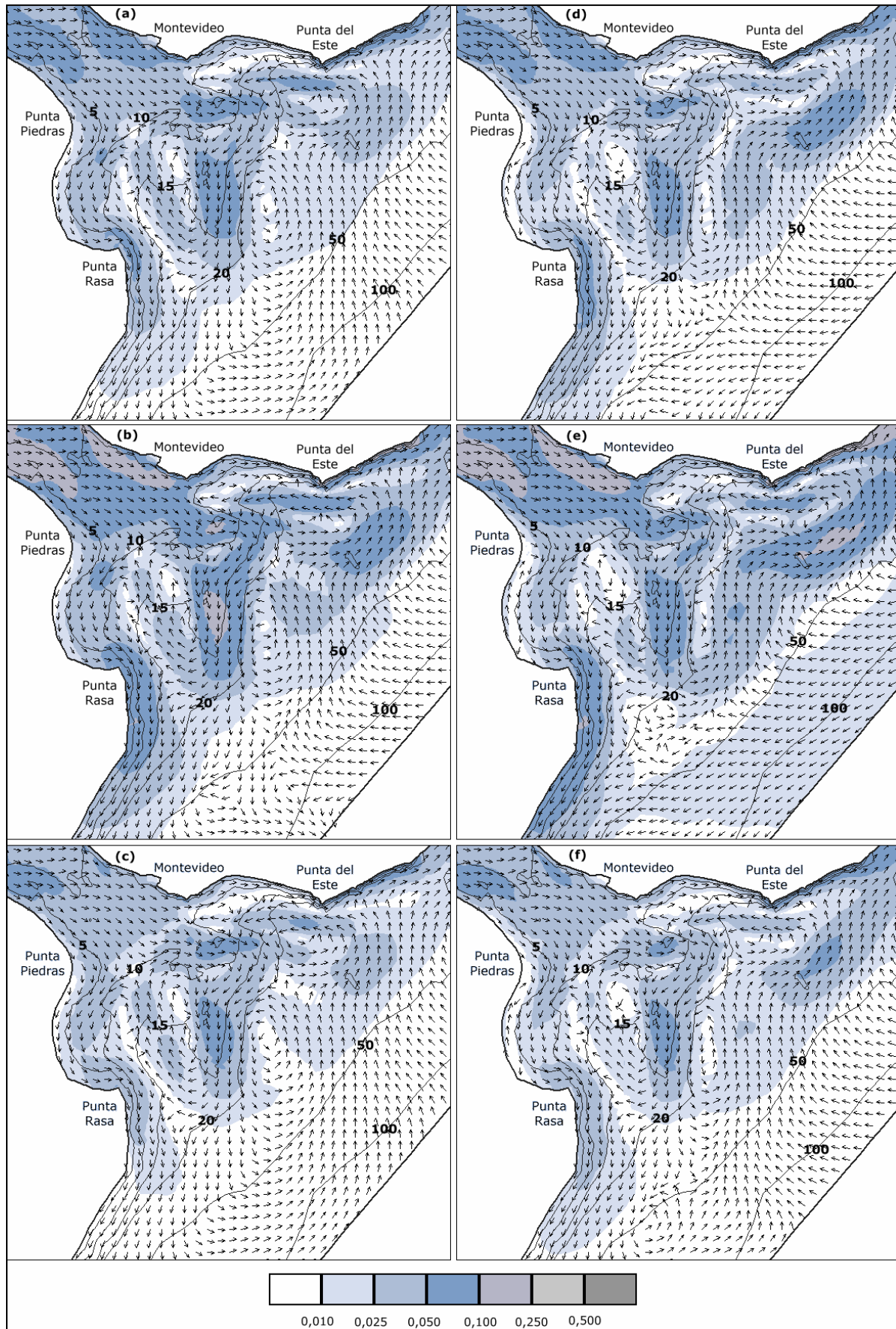


Figura 9.19: Campo de corrientes residuales (m/s) para el período frío y caudal fluvial (a) medio, (b) alto y (c) bajo con la versión de Punta Brava y para período frío y caudal fluvial (d) medio, (e) alto y (f) bajo con la versión de Pontón Recalada.

Al comparar estos resultados con los obtenidos para el período cálido, se observa por un lado que aunque en las dos estaciones se da un flujo saliente por la costa argentina, en el período frío la intensidad de esa descarga es menor que la intensidad que se observa en el período cálido. Por otro lado, se observa al comparar los dos períodos que la mayor diferencia en los campos de flujo ocurre sobre la zona Norte del Río de la Plata. Mientras que durante el período cálido se identificó un flujo entrante en la mayor parte de la zona Norte, en el período frío se observó un flujo saliente en dicha zona. Esto coincide con lo mencionado en 2.3, que durante el otoño y el invierno se produce un mayor avance del agua dulce descargada a lo largo de la costa uruguaya. Este resultado se puede vincular directamente al efecto de los vientos. Como se mencionó en 9.3 el período frío está caracterizado por vientos medios bajos del sector Sur, mientras que el período cálido se caracteriza por vientos fuertes del sector Este. Estos dos efectos, la eliminación del viento del Sur que favorece un flujo saliente por la costa Norte, y el viento fuerte del sector Este, son los que generan el flujo entrante en la mayor parte de la zona exterior Norte en el período cálido.

Capítulo 10

EFFECTO DE LOS FORZANTES EN EL CAMPO SALINO Y EN LA CIRCULACION DEL RIO DE LA PLATA – IMPORTANCIA DE LA COMPONENTE BAROCLINICA DEL FLUJO

El objetivo del análisis que se presenta en este capítulo es conocer la dinámica del Río de la Plata utilizando el modelo numérico como herramienta de estudio. En este caso el modelo RMA-10 fue aplicado para estudiar la influencia de los diferentes forzantes sobre los patrones de flujo y sobre el campo salino del Río de la Plata. Para esto, se realizaron varias modelaciones con algunos forzantes para observar separadamente el efecto del caudal fluvial, de la marea astronómica y de los vientos. Por otro lado, hemos visto que las corrientes por densidad tienen un rol importante en la dinámica de flujo, debido principalmente a la distribución de densidad horizontal que ocurre en el Río de la Plata. Debido a esto se estudia también la importancia de la componente baroclínica del flujo en cada caso y sus efectos sobre la circulación media del río.

10.1 - Consideraciones generales

En el Capítulo 1 y en el Capítulo 4 se describieron las ecuaciones que rigen el movimiento y el campo salino en un flujo como el del Río de la Plata. Existen varias fuerzas que actúan sobre el sistema y que por lo tanto determinan el flujo y la distribución de salinidad en el mismo. Por un lado debido a la rotación de la tierra existe la fuerza de Coriolis, la cual es importante por las grandes dimensiones que tiene el Río de la Plata. Por otro lado, como fuerzas de superficie que intervienen en este sistema, se tienen las tensiones rasantes que generan los vientos que soplan sobre la gran superficie del río y las tensiones debidas a la fuerza de fricción en el fondo del mismo. Además, las fuerzas generadas por la variación del nivel de la superficie libre y por la variación de la densidad en el plano horizontal, generan las componentes barotrópica y baroclínica del flujo. Por último, la interacción con otros flujos en los bordes del sistema, y las tensiones turbulentas o de Reynolds adicionales que se generan en los flujos turbulentos, también modifican el campo de corrientes. Todas estas fuerzas que intervienen en el balance de cantidad de movimiento del sistema, junto con las condiciones de borde, es decir la geometría y la batimetría del Río de la Plata, determinan el campo de velocidades en el mismo. Por otro lado, el campo salino está gobernado por los procesos de advección y difusión. Advección debido al flujo que existe en el sistema, difusión molecular por el intercambio de sal entre moléculas con distinta concentración de sal y difusión turbulenta generada por el flujo turbulento.

La complejidad en la interacción de estos factores y procesos en el Río de la Plata son la causa del análisis que se presenta en este capítulo. Utilizando el modelo numérico como herramienta de estudio, es posible variar las condiciones del sistema y los forzantes que

intervienen en el mismo, para poder analizar separadamente algunos aspectos. Aunque este es un sistema no lineal de todas formas se pueden deducir algunos aspectos interesantes cuando se modela el Río de la Plata eliminando determinados forzantes.

Considerando el caudal fluvial de los ríos Paraná y Uruguay que ingresa al Río de la Plata como único forzante externo del sistema, el campo de velocidades y el campo salino que determina el modelo en cada instante son el resultado de la interacción de diferentes procesos. Cada valor obtenido será la combinación de la interacción del flujo entrante con la fuerza de Coriolis, con las fuerzas de fricción en el fondo, con las tensiones turbulentas del flujo, con las corrientes por densidad debidas a las variaciones de la salinidad en el Río de la Plata y con las condiciones de borde impuestas por el propio sistema. Con esta simulación entonces es posible estudiar la distribución de velocidades y salinidad debidas a dichas interacciones, causadas por un ingreso de un determinado caudal fluvial al sistema. En una simulación igual a la anterior pero con un fluido de densidad constante, el resultado obtenido no tendrá en cuenta la interacción con las componentes baroclínicas del flujo, pero sí los demás procesos. Debido a esto, la comparación cualitativa de estas dos modelaciones permitirá deducir algunos aspectos del campo de corrientes generado por la variación horizontal de la salinidad.

Si además del caudal fluvial que ingresa al Río de la Plata se introduce en el sistema la onda de la marea, el resultado obtenido con el modelo tendrá en cuenta las mismas variables anteriormente mencionadas más el efecto de la componente barotrópica del flujo. Analizando esta modelación y las diferencias que se puedan obtener respecto a las anteriores, se tendrá una idea del efecto que tiene la marea astronómica sobre la circulación y el campo salino del Río de la Plata. Nuevamente se podrá analizar el aporte de las corrientes por densidad si se realiza además la modelación considerando por un lado un fluido no homogéneo y por otro un fluido homogéneo.

De forma similar, agregando el viento se introducirán al sistema las tensiones rasantes sobre la superficie de agua que modifican la velocidad y la salinidad en cada punto. Estas simulaciones podrán realizarse considerando varias direcciones e intensidades de los vientos, de forma de analizar los efectos de los vientos característicos que soplan sobre el Río de la Plata. Al comparar estos resultados con los obtenidos en las otras modelaciones, se podrá analizar la influencia de cada uno de estos vientos sobre los campos de corriente y de salinidad en la zona de estudio.

10.2 - Influencia del caudal fluvial y marea astronómica

10.2.1 - Características de las simulaciones

En esta etapa se realizaron cuatro simulaciones para analizar el efecto del caudal fluvial y de la marea astronómica. La primera modelación simula el efecto del caudal fluvial en un fluido de densidad variable, en el espacio y en el tiempo. Se denomina "Caudal fluvial – Con salinidad" y el caudal fluvial es el único forzante externo ingresado al sistema. La segunda modelación simula el

efecto del caudal fluvial pero en un fluido homogéneo, de densidad constante. Nuevamente el caudal fluvial es el único forzante externo pero en este caso no se considera el campo salino y su efecto sobre el campo de corrientes. Esta simulación se denomina "Caudal fluvial –Sin salinidad". La tercera modelación simula el efecto del caudal fluvial y de la marea astronómica, y considera un fluido no homogéneo. Esta simulación se denomina "Caudal fluvial y marea – Con salinidad". La última modelación utiliza como forzantes externos el caudal fluvial y la marea astronómica pero considerando un fluido de densidad constante. Coherentemente con los otros casos, esta simulación se denomina "Caudal fluvial y marea – Sin salinidad".

En todas las simulaciones se utilizó la malla de baja resolución en elementos finitos del Río de la Plata, presentada en la Figura 6.1 del Capítulo 6. La condición inicial utilizada en las simulaciones que consideran un fluido no homogéneo fue definida en el Capítulo 6, la cual utiliza el campo salino presentado en la Figura 6.5 y velocidad nula en todo el dominio. Para las simulaciones que consideran un fluido homogéneo la condición inicial es velocidad nula y densidad uniforme en todo el dominio de cálculo.

El caudal fluvial ingresado al modelo en todas las simulaciones realizadas es constante igual a $22.300 \text{ m}^3/\text{s}$, valor medio determinado en función de los caudales medios estacionales presentados en la Tabla 9.1, $21.300 \text{ m}^3/\text{s}$ para el período frío y $23.300 \text{ m}^3/\text{s}$ para el período cálido. En las simulaciones que se considera la marea astronómica esta se modela introduciendo a través de la frontera oceánica la serie de niveles correspondientes a la superposición de las componentes armónicas M_2 , N_2 , S_2 , Q_1 y O_1 . Las simulaciones se realizaron con las dos versiones del modelo, obteniéndose resultados diferentes por los distintos parámetros de cada versión pero con comportamientos generales similares que permiten sacar algunas conclusiones.

10.2.2 - Resultados – Caudal Fluvial

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en las simulaciones con caudal fluvial como único forzante externo. Las distribuciones de salinidad calculadas con las dos versiones del modelo se presentan en la Figura 10.1, mientras que los campos de corrientes se presentan en la Figura 10.2. En la misma se representa la intensidad de la velocidad con las zonas delimitadas con las curvas de isointensidad y la dirección con los vectores.

Debido a la diferencia en el coeficiente de difusión de las dos versiones del modelo, mayor difusión de sal en la versión de Punta Brava, los campos salinos y de corriente determinados con las mismas son diferentes. Sin embargo, es posible identificar comportamientos generales similares en los resultados. En las Figuras 10.1(a) y 10.1(b) se observa que las curvas de isoconcentración de salinidad parecen ser afectadas por las variaciones en la topografía del Río de la Plata. Por ejemplo, se observa una advección de las curvas hacia aguas arriba del río en las áreas profundas del Canal Oriental cerca de la costa uruguaya y en el Canal Marítimo sobre la costa argentina. Al Sureste de Montevideo, donde se ubican las áreas poco profundas de los Bancos Arquímedes e

Inglés, las curvas son advectadas hacia aguas abajo. Lo mismo se observa sobre el Banco de Rouen en la zona central del río. Además, en las áreas bajas de la Bahía de Samborombón cerca de la costa argentina se observa un desplazamiento similar de las curvas hacia el Sureste y sobre la costa uruguaya una inclinación de las mismas hacia el Este. Estas características de las curvas de isoconcentración de salinidad se observan más claramente en la Figura 10.1(b), donde los procesos de advección se identifican más claramente debido a la menor difusión de sal.

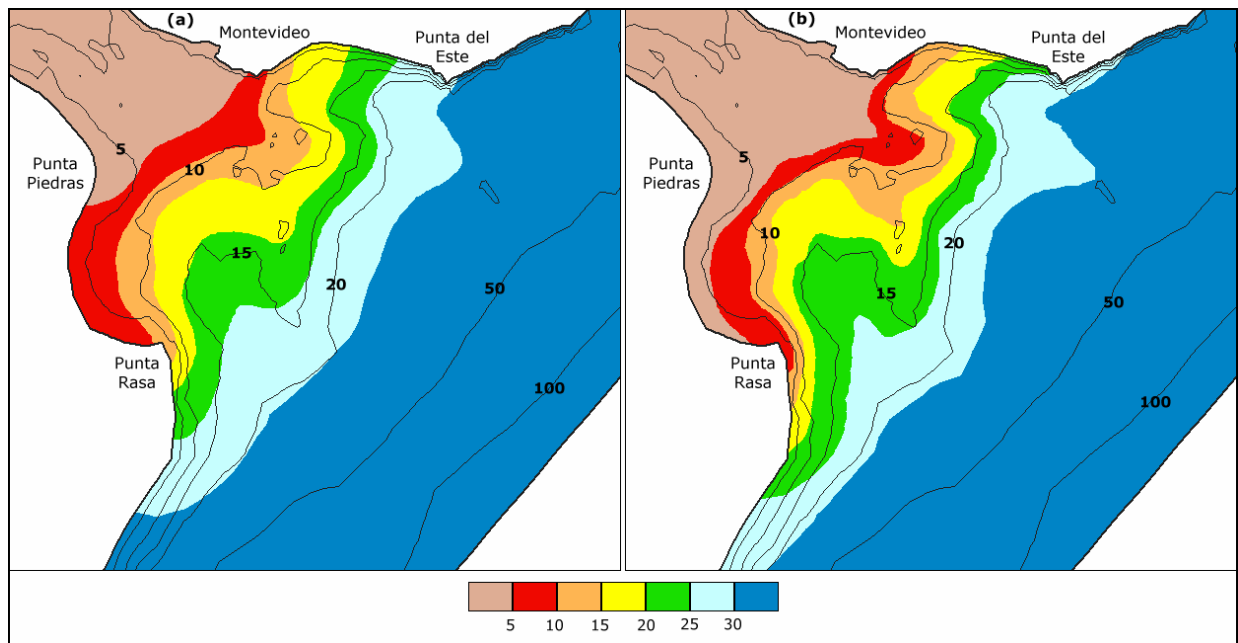


Figura 10.1: Curvas de isoconcentración de salinidad (ppm) obtenidas con la simulación Caudal fluvial – Con salinidad, con las versiones del modelo de (a) Punta Brava y (b) Pontón Recalada. Batimetría en metros.

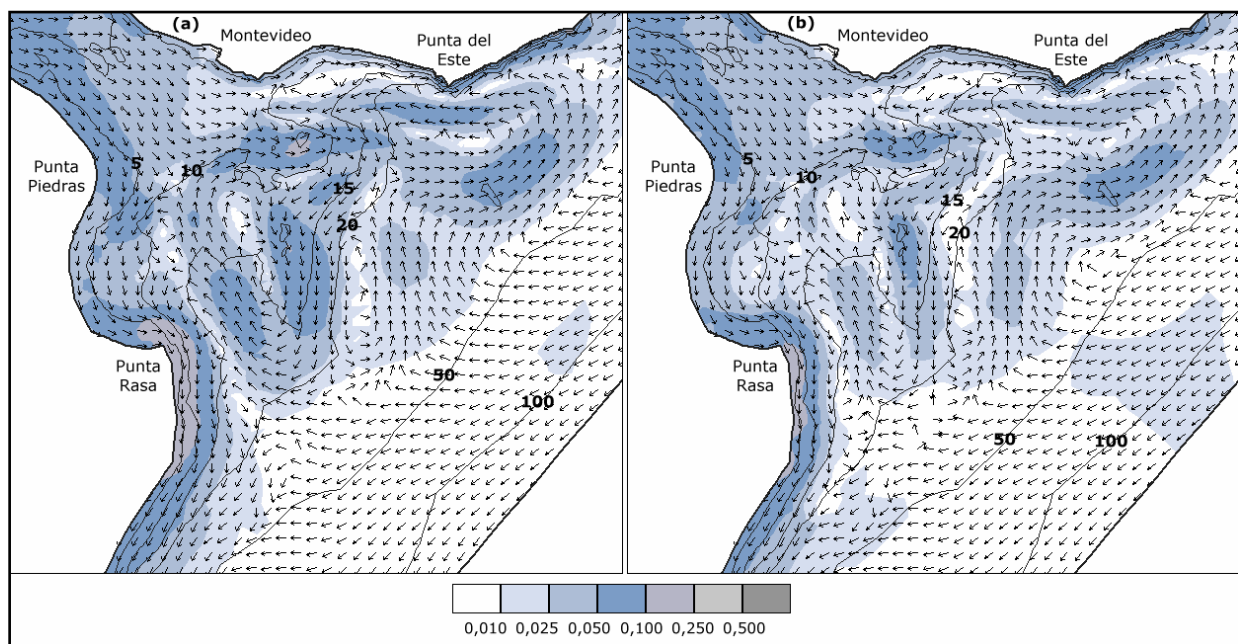


Figura 10.2: Campos de corrientes (m/s) obtenidos con la simulación Caudal fluvial – Con salinidad, con las versiones del modelo de (a) Punta Brava y (b) Pontón Recalada. Batimetría en metros.

Este comportamiento concuerda con los patrones de flujo presentados en la Figura 10.2. En la misma se observan corrientes entrantes al Río de la Plata en las áreas profundas y corrientes salientes en las áreas poco profundas. En la zona cercana a la costa uruguaya, sobre los bancos de Arquímedes, Inglés y Rouen, y sobre la zona costera argentina se observa un flujo de descarga, mientras que en el Canal Oriental y en el Canal Marítimo se observa un ingreso de flujo.

El campo de corrientes determinado con el modelo considerando un fluido homogéneo se presenta en la Figura 10.3. En la misma se observa que en ausencia de corrientes por densidad, el caudal fluvial que ingresa al río genera un flujo saliente recostado por la costa uruguaya y por el Canal Oriental, favorecido por la morfología del río y la fuerza de Coriolis. Además se observa que en la zona central y sobre la costa argentina las intensidades son menores a 1 cm/s. La diferencia entre el campo de corrientes presentado en las Figuras 10.2 y 10.3, es que en la segunda no aparecen las corrientes por densidad pues no se consideró en esa modelación la variación horizontal de la salinidad que genera la componente baroclínica del flujo. Por esto analizando la diferencia entre ambas figuras se pueden analizar varios aspectos de las corrientes de densidad en el Río de la Plata.

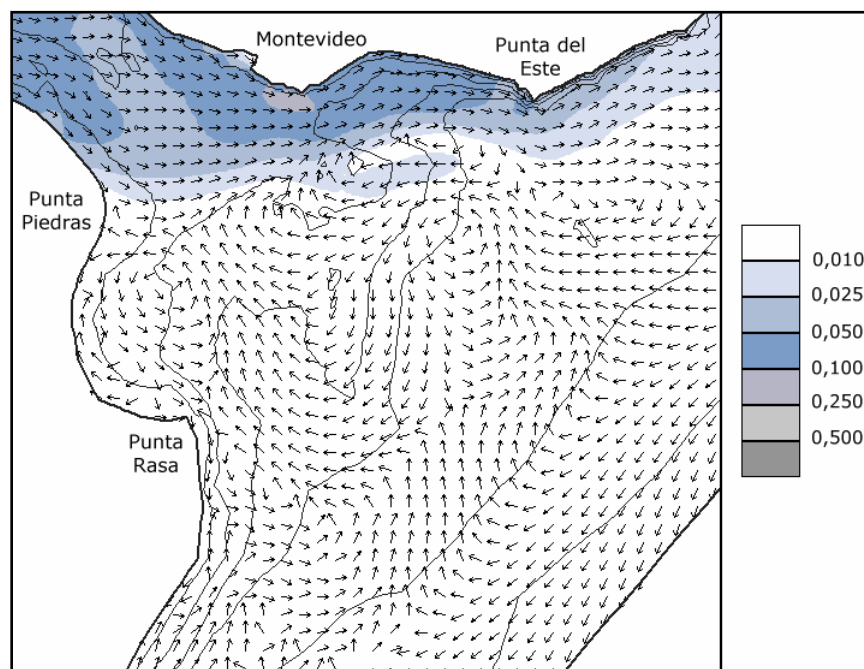


Figura 10.3: Campo de corrientes (m/s) obtenido con la simulación Caudal Fluvial – Sin salinidad.

El campo de corrientes por densidad tiene dirección entrante al Río de la Plata, ya que el flujo se genera desde zonas de mayor salinidad, y por lo tanto de mayor densidad, hacia zonas de menor salinidad. Como en la Figura 10.2 no se observa la descarga por la costa uruguaya identificada en la Figura 10.3, se puede deducir que las corrientes de densidad entrantes por el Canal Oriental son suficientemente grandes como para frenar en algunas partes este flujo saliente. Esto genera además que se produzcan flujos de descarga por otras zonas del Río de la Plata,

principalmente por las zonas bajas donde la componente baroclínica del flujo es menor. Este comportamiento explicaría además porque las corrientes entrantes en el Canal Oriental son menos intensas y cubren un área menor del Canal que las corrientes entrantes por el Canal Marítimo. En función de lo que se observa en la Figura 10.3, esta diferencia en los flujos entrantes se da porque el flujo entrante del Canal Oriental se encuentra con el flujo de descarga por esa zona impulsado por la fuerza de Coriolis.

10.2.3 - Resultados –Marea Astronómica

A continuación se presentan los resultados obtenidos al utilizar como forzantes externos el caudal fluvial y la marea astronómica. Se realizó un promedio de los valores calculados en los últimos treinta días de los seis meses de simulación para obtener los campos de salinidad y de corrientes residuales. Las distribuciones de salinidad calculadas con las dos versiones del modelo se presentan en la Figura 10.4, mientras que los campos de corrientes se presentan en la Figura 10.5, para la simulación con caudal fluvial y marea astronómica considerando un fluido no homogéneo. La intensidad de la velocidad se representa con las curvas de isointensidad y la dirección con los vectores.

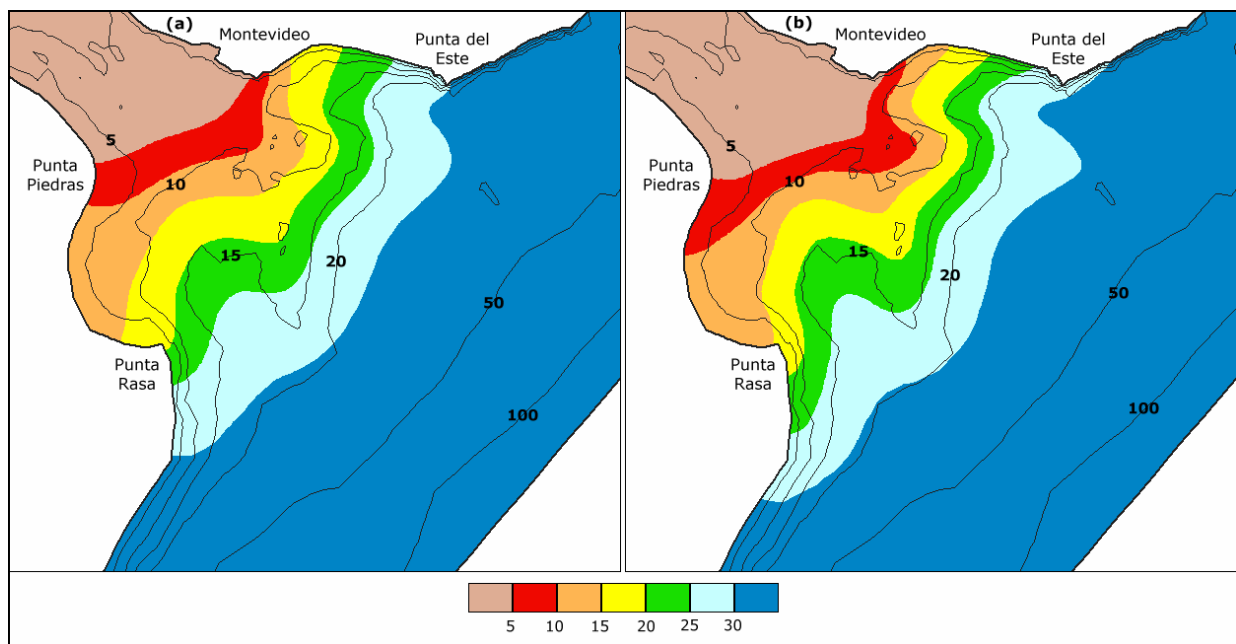


Figura 10.4: Curvas de isoconcentración de salinidad (ppm) obtenidas con la simulación Caudal fluvial y marea – Con salinidad, con las versiones del modelo de (a) Punta Brava y (b) Pontón Recalada. Batimetría en metros.

Analizando las diferencias entre los campos salinos de la Figura 10.4 y de la Figura 10.1 se puede observar el efecto que tiene la marea astronómica sobre la distribución de salinidad en el Río de la Plata. En primer lugar se observa que las curvas de isoconcentración de salinidad sobre la Bahía de Samborombón se desplazaron hacia el Noroeste. En cambio sobre la costa uruguaya y en la zona central la ubicación de las curvas se mantiene casi igual en las dos figuras en cada versión

del modelo. Esto muestra que existe una gran influencia de la marea sobre la distribución de salinidades principalmente sobre la costa argentina y en la Bahía de Samborombón. Por otro lado, la forma de las curvas de isoconcentración de salinidad es más redondeada, sin picos o irregularidades. Esto se debe a que las mayores velocidades que resultan de la interacción entre las mareas y el flujo de descarga fluvial aumentan la difusión horizontal de salinidad.

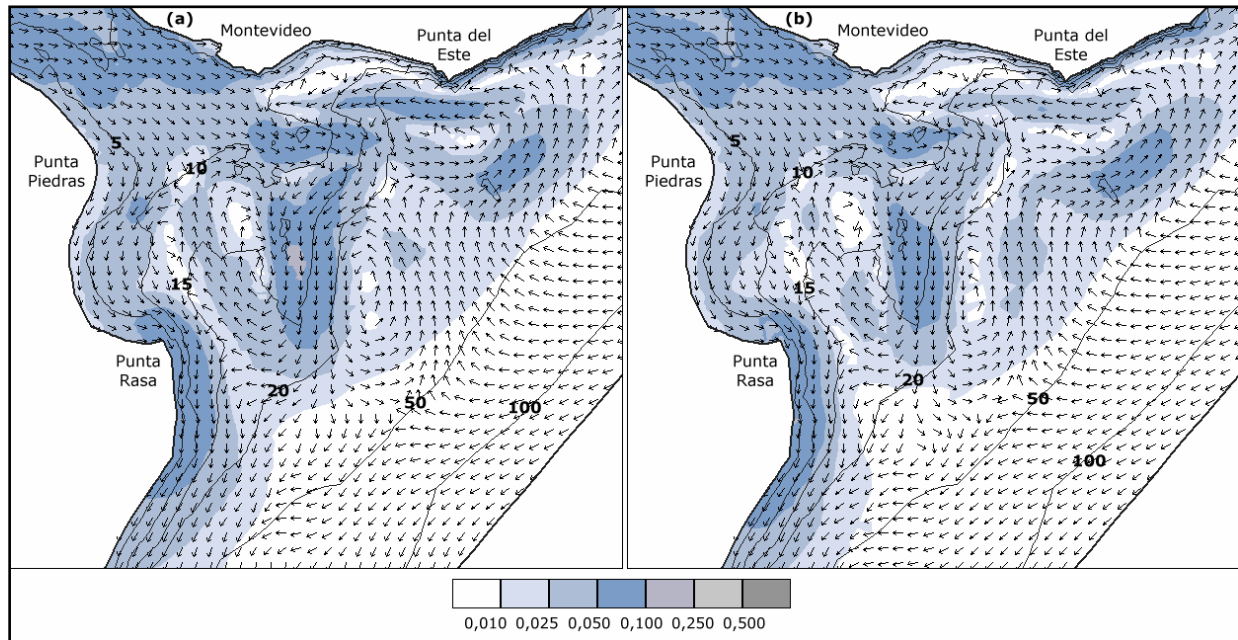


Figura 10.5: Campos de corrientes (m/s) obtenidos con la simulación Caudal fluvial y marea – Con salinidad, con las versiones del modelo de (a) Punta Brava y (b) Pontón Recalada. Batimetría en metros.

Entre los campos de corrientes presentados en las Figuras 10.5 y 10.2 también se observan algunas diferencias que se pueden relacionar con el efecto de la marea astronómica sobre la distribución de velocidades en el Río de la Plata. Se observa que el flujo saliente por la costa argentina cuando se incluye la marea astronómica es de menor intensidad que cuando no se incluye. Esto se puede explicar a partir del aumento de salinidad en la Bahía de Samborombón, mencionado anteriormente, el cual genera un flujo entrante por densidad en esa zona que se opone a la descarga por la costa argentina. De todas formas se sigue observando que la descarga se produce mayoritariamente por la costa argentina. Además, se observa que sobre la línea Punta Piedras – Montevideo la intensidad del flujo residual se incrementó al incluir la marea en la costa uruguaya y disminuyó sobre la costa argentina. Este comportamiento puede vincularse también al aumento del flujo entrante por la costa argentina por el efecto de la marea astronómica sobre el campo salino. Sin embargo, también se vincula directamente con el efecto de la marea astronómica sobre el campo de velocidades, como se explica a continuación.

En la Figura 10.6 se observa el campo de corrientes residuales determinado con el modelo con el caudal fluvial y la marea astronómica como forzantes pero en un fluido homogéneo, es decir, sin salinidad. En la misma se observa nuevamente que en ausencia de las corrientes por densidad

el flujo de descarga se produce recostado a la costa uruguaya. Sin embargo, al comparar la Figura 10.6 con la Figura 10.3 se observa que al considerar la marea astronómica aumenta la intensidad sobre la costa uruguaya en la parte interior del Río de la Plata, al Noroeste de la línea Montevideo – Punta Piedras. Se puede afirmar entonces que el aumento de las intensidades del flujo saliente sobre la costa uruguaya se debe en parte a la acción directa de la marea sobre el campo de corrientes de la zona. Como se mencionó anteriormente, el aumento de salinidad en la Bahía de Samborombón por el efecto de la marea genera corrientes por densidad adicionales que también generan mayores velocidades sobre la costa uruguaya en el Río de la Plata interior.

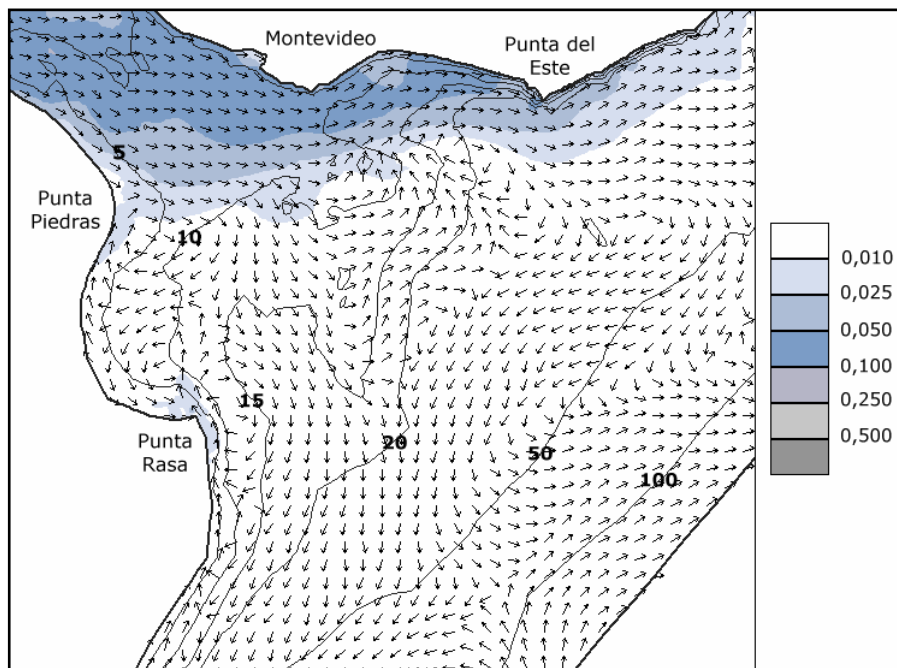


Figura 10.6: Campo de corrientes (m/s) obtenido con la simulación Caudal Fluvial y marea – Sin salinidad.

El patrón de circulación que se observa en el Río de la Plata cuando se considera el efecto del caudal fluvial y de la marea astronómica en un fluido no homogéneo fue mencionado en el Capítulo 1 haciendo referencia al trabajo de Uncles (2002). En dicho estudio se menciona que en estuarios con variaciones laterales importantes se produce el desplazamiento diferencial de las líneas de isoconcentración de salinidad, con corrientes entrantes en los canales principales y corrientes salientes en los bajos.

10.3 - Influencia del viento

10.3.1 - Características de la modelación

Debido al efecto rápido de los vientos sobre el campo salino y la distribución de velocidades, se realizaron en este análisis modelaciones diferentes a las consideradas en el estudio del efecto del caudal fluvial y de la marea astronómica. 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. La intensidad media correspondiente a cada dirección y el tiempo promedio que ocurre un viento de determinada dirección fueron determinados a partir de un análisis de vientos que se presenta en 10.3.2.

Las simulaciones se realizaron considerando como forzantes externos el caudal fluvial y el viento, permaneciendo ambos constantes durante todo el período de simulación. Cada simulación se realizó dos veces, considerando en un caso un fluido de densidad variable ("con salinidad") y en el otro caso un fluido de densidad constante ("sin salinidad"). Debido a las diferencias en los vientos registrados en las estaciones de Punta Brava y Pontón Recalada, las simulaciones se realizaron con ambas versiones del modelo. Sin embargo, el efecto de los diferentes vientos sobre el campo salino y de corrientes que se obtuvo con ambas versiones del modelo es el mismo. Teniendo esto en cuenta, solamente se presentan los resultados obtenidos con la versión del modelo correspondiente a los registros de viento medidos en Punta Brava.

En las 8 simulaciones de fluido de densidad variable las condiciones iniciales utilizadas son el campo salino y el campo de corrientes obtenidos luego de los seis meses de simulación del caso "Caudal Fluvial – Con salinidad". En las 8 simulaciones de fluido de densidad constante la condición inicial del campo hidrodinámico utilizada es el resultado final de la simulación "Caudal Fluvial – Sin salinidad".

En la Tabla 10.1 se muestra la velocidad media para cada dirección del viento calculada considerando todos los registros de viento correspondientes a cada dirección. Estos valores de intensidad media son los que se ingresan en cada modelación como intensidad del viento constante en el tiempo y uniforme en el dominio de cálculo. En dicha tabla se observa que la mayor intensidad media, igual a 7,6 m/s, corresponde a los vientos del Suroeste, mientras que la intensidad media menor, 5,3 m/s, corresponde a los vientos del Noroeste.

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

Tabla 10.1: Intensidad media del viento para las 8 direcciones consideradas.

Para analizar los resultados obtenidos en cada una de las 8 simulaciones se definieron 13 puntos de control distribuidos en varias zonas del Río de la Plata. En la Figura 10.7 se presenta la

ubicación y el nombre de cada uno de estos puntos. Como se observa en la misma existen cuatro puntos distribuidos sobre la zona costera uruguaya del Río de la Plata: MD cercano a Montevideo, PE cercano a Punta del Este, CU entre ambos y LP cercano a La Paloma. Sobre la costa argentina también se definieron cuatro puntos: PP cercano a Punta Piedras, BS1 y BS2 ubicados en la Bahía de Samborombón y PR ubicado al Sur de Punta Rasa. Finalmente se ubicaron cinco puntos en la zona central del río alejada de las costas: RI en el límite con la zona intermedia del Río de la Plata, M1 y M2 más cerca de la costa uruguaya y M3 y M4 más cercanos a la costa argentina. De esta forma se buscó estudiar posiciones representativas de las distintas zonas del río.

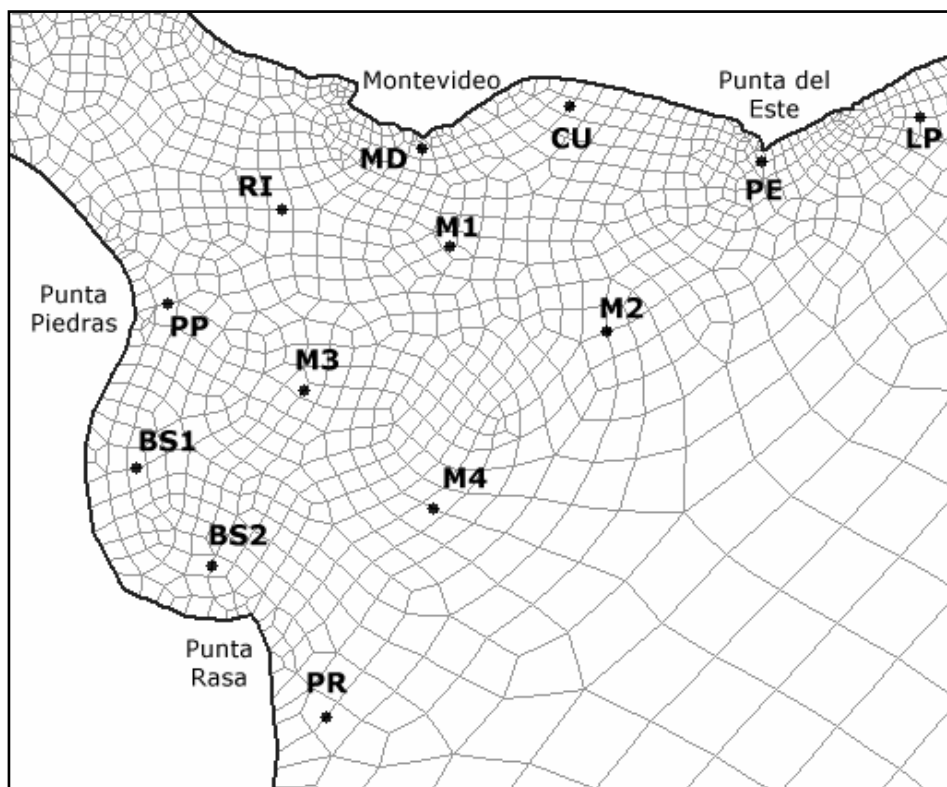


Figura 10.7: Ubicación de los puntos de control en el Río de la Plata utilizados en el estudio de la influencia del viento.

10.3.2 - Análisis direccional del viento

Para analizar el efecto de los vientos del Norte, Este, etc., fue necesario realizar una caracterización de los vientos que provienen de cada una de las 8 direcciones principales. Este análisis se realizó para los registros de las estaciones de medición de Punta Brava y Pontón Recalada, aunque solamente se presentan los resultados obtenidos para Punta Brava. La base de datos utilizada fueron los registros de vientos en dicha estación del período 1995 – 2000. El objetivo de este análisis fue obtener, además de la intensidad media de los vientos de cada dirección, el tiempo medio que ocurren los vientos de cada dirección. Se obtuvo entonces para cada dirección la frecuencia asociada a diferentes duraciones de dicho viento y la velocidad media

asociada también a cada duración. Esta información es utilizada en el momento de evaluar los resultados del modelo, ya que el efecto del viento aumenta con la duración del mismo.

En la Tabla 10.2 y en la Tabla 10.3 se presentan los resultados obtenidos para los vientos del Norte y del Noreste, respectivamente. Los vientos del Norte representan un 18,2% del total de los vientos registrados y los vientos del Noreste un 21,8%. En la Tabla 10.2 se observa que el evento con viento del Norte de mayor duración durante el período 1995-2000 fue de 84 horas, tres días y medio. Sin embargo es interesante observar que vientos del Norte de 12 horas de duración tienen una frecuencia de 12%, con 102 eventos durante esos cinco años. Por otro lado, aproximadamente un 3% de los eventos de vientos del Norte duran más de un día. La duración media de los vientos del Norte es de 9 horas. Respecto a los eventos de vientos del Noreste, se observa en la Tabla 10.3 que dos veces se registraron vientos del Noreste durante 69 horas seguidas, casi 3 días, con una intensidad media igual a 11,3 m/s. Por otro lado se observa que vientos del Noreste durante 12 horas tienen una frecuencia de casi 14%, equivalente a 159 eventos, y que 15 veces en esos seis años de datos durante 24 horas seguidas se registraron vientos del Noreste. La duración media de los vientos que provienen del Noreste es aproximadamente 9 horas.

VIENTOS DEL NORTE			
Duración (hs)	Número eventos	Frecuencia (%)	Velocidad media (m/s)
3	234	27,46	3,7
6	207	24,30	4,8
9	162	19,01	5,3
12	102	11,97	5,8
15	68	7,98	5,8
18	27	3,17	5,7
21	13	1,53	6,3
24	10	1,17	6,7
27	2	0,23	6,9
30	9	1,06	5,5
33	4	0,47	6,4
36	4	0,47	5,1
39	2	0,23	5,9
42	1	0,12	7,6
45	1	0,12	7,2
54	2	0,23	6,5
60	2	0,23	5,5
63	1	0,12	8,5
84	1	0,12	6,8

Tabla 10.2: Porcentajes de frecuencia y velocidad media asociados a las duraciones de eventos con viento del Norte.

VIENTOS DEL NORESTE			
Duración (hs)	Número eventos	Frecuencia (%)	Velocidad media (m/s)
3	286	27,01	4,7
6	275	25,97	5,1
9	159	15,01	5,6
12	147	13,88	6,2
15	87	8,22	6,4
18	44	4,15	6,4
21	18	1,70	7,3
24	15	1,42	6,6
27	7	0,66	6,1
33	8	0,76	7,3
36	2	0,19	6,5
39	1	0,09	7,2
42	3	0,28	5,1
45	3	0,28	6,2
60	1	0,09	5,6
66	1	0,09	5,5
69	2	0,19	11,3

Tabla 10.3: Porcentajes de frecuencia y velocidad media asociados a las duraciones de eventos con viento del Noreste.

En la Tabla 10.4 se muestran los resultados obtenidos para los vientos que provienen del Este, los cuales representan el 27,2% de los vientos que ocurrieron en los seis años de mediciones utilizados en este análisis. En esta dirección se observan las mayores duraciones de vientos de una misma dirección, con cinco casos de más de cuatro días de vientos del Este. Debido a esto, la duración media de los vientos del Este es mayor que en los otros casos, igual a 11,5 horas. Se

observa también que casi un 20% de los eventos de vientos del Este tienen una duración de 12 horas, con una velocidad media de 6,6 m/s. Además, aproximadamente un 9% de los eventos de vientos del Este duran más de un día. Por otro lado, en la Tabla 10.5 se observan los resultados obtenidos para los vientos que provienen del Sureste, los cuales representan un 16% de los vientos registrados. Aproximadamente un 8% de los eventos con vientos del Sureste duran 12 horas y un 1,6% duran 24 horas. En este caso se observa que 17 veces los vientos del Sureste duraron 27 horas durante los seis años de mediciones y que más de un 6% de los eventos duran más de un día. Por otro lado, el período más largo durante el cual ocurrieron vientos del sector Sureste fue de tres días, con una intensidad media de 13,4 m/s. La duración media de los vientos del Sureste es aproximadamente 9,5 horas.

VIENTOS DEL ESTE			
Duración (hs)	Número eventos	Frecuencia (%)	Velocidad media (m/s)
3	287	25,76	4,5
6	267	23,97	5,5
9	178	15,98	5,8
12	116	10,41	6,6
15	71	6,37	6,6
18	47	4,22	6,8
21	23	2,06	7,9
24	19	1,71	7,7
27	20	1,80	6,3
30	15	1,35	8,2
33	14	1,26	7,4
36	11	0,99	8,6
39	8	0,72	7,2
42	7	0,63	9,4
45	5	0,45	8,3
48	4	0,36	9,6
51	2	0,18	7,6
54	2	0,18	7,7
57	3	0,27	8,8
60	1	0,19	7,7
63	1	0,19	7,3
66	1	0,19	5,5
69	2	0,18	9,9
75	2	0,18	8,6
81	1	0,09	8,1
90	2	0,18	9,4
96	1	0,09	7,8
102	1	0,09	7,2
105	1	0,09	8,0
123	1	0,09	7,5
138	1	0,09	9,3

Tabla 10.4: Porcentajes de frecuencia y velocidad media asociados a las duraciones de eventos con viento del Este.

VIENTOS DEL SURESTE			
Duración (hs)	Número eventos	Frecuencia (%)	Velocidad media (m/s)
3	230	34,02	4,7
6	172	25,44	5,2
9	85	12,57	5,7
12	56	8,28	6,5
15	38	5,62	6,8
18	24	3,55	7,2
21	15	2,22	7,4
24	11	1,63	8,3
27	17	2,51	8,5
30	7	1,04	8,4
33	4	0,59	7,1
36	4	0,59	7,4
39	2	0,30	7,5
42	3	0,44	7,8
48	2	0,30	10,7
54	1	0,15	9,3
57	1	0,15	8,0
63	2	0,30	8,6
66	1	0,15	11,6
72	1	0,15	13,4

Tabla 10.5: Porcentajes de frecuencia y velocidad media asociados a las duraciones de eventos con viento del Sureste.

Los resultados obtenidos para los vientos del Sur y los vientos del Suroeste se presentan en la Tabla 10.6 y 10.7, respectivamente. Los vientos de Sur representan un 14,2% del total de los vientos. Durante el período analizado dos veces ocurrieron vientos del Sur durante 69 horas seguidas, con una intensidad media de 8,1 m/s. Casi un 10% de lo eventos de vientos del Sur

duran 12 horas y aproximadamente un 7,8% de los eventos con vientos del Sur duran más de 24 horas. La duración media de los vientos que provienen del Sur es de 10 horas. Los vientos del Suroeste representan el 12,1% de los vientos totales registrados en Punta Brava durante el período 1995 - 2000. En este caso casi un 10% de los eventos duran 12 horas y durante ese período 11 veces los eventos de vientos del Suroeste duraron 27 horas. La duración media de los vientos provenientes del Suroeste es igual a 10 horas.

VIENTOS DEL SUR			
Duración (hs)	Número eventos	Frecuencia (%)	Velocidad media (m/s)
3	206	34,97	4,8
6	129	21,90	5,2
9	57	9,68	6,5
12	55	9,34	6,9
15	35	5,94	7,7
18	27	4,58	6,7
21	22	3,74	7,3
24	12	2,04	7,6
27	7	1,19	7,4
30	10	1,70	8,6
33	4	0,68	8,7
36	8	1,36	8,5
39	3	0,51	8,5
42	4	0,68	9,0
45	6	1,02	8,6
57	1	0,17	7,0
66	1	0,17	8,9
69	2	0,34	8,1

Tabla 10.6: Porcentajes de frecuencia y velocidad media asociados a las duraciones de eventos con viento del Sur.

VIENTOS DEL SUROESTE			
Duración (hs)	Número eventos	Frecuencia (%)	Velocidad media (m/s)
3	176	34,65	4,8
6	126	24,80	5,5
9	46	9,06	6,5
12	48	9,45	6,5
15	24	4,72	6,9
18	24	4,72	8,4
21	17	3,35	9,7
24	9	1,77	8,4
27	11	2,17	10,2
30	4	0,79	9,6
33	4	0,79	10,3
36	5	0,98	9,0
39	5	0,98	8,9
45	2	0,39	9,8
48	2	0,39	12,0
51	2	0,39	11,8
60	2	0,39	9,3
63	1	0,20	9,9

Tabla 10.7: Porcentajes de frecuencia y velocidad media asociados a las duraciones de eventos con viento del Suroeste.

En la Tabla 10.8 se muestra la distribución de frecuencias para cada duración de eventos con vientos del Oeste, los cuales representan el 11,2% del total. Se observa en la misma que los vientos del Oeste en general duran menos que los eventos en otras direcciones de viento, siendo el evento más largo de menos de dos días y solamente casi un 3% duran más de 24 horas. La duración media de los vientos del sector Oeste es de 8 horas. Los resultados obtenidos para los vientos del Noroeste se presentan en la Tabla 10.9. Estos vientos representan el 13,8% del total de vientos. Los resultados muestran que cuatro veces se registraron eventos de vientos del Noroeste que duraron más de 48 horas durante los años analizados y que casi un 5% de las veces los eventos duran más de 24 horas. La duración media de los vientos del Noroeste es de 9,5 horas.

10.3.3 - Resultados obtenidos – Campo salino

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en las ocho simulaciones correspondientes a las ocho direcciones principales del viento que consideran el viento y el caudal fluvial como forzantes externos en un fluido de densidad variable. Para cada uno de los puntos de

control definidos en la Figura 10.7 se analizó en primer lugar la variación de la salinidad respecto a la condición inicial, en función del tiempo de modelación, es decir, de la duración del viento.

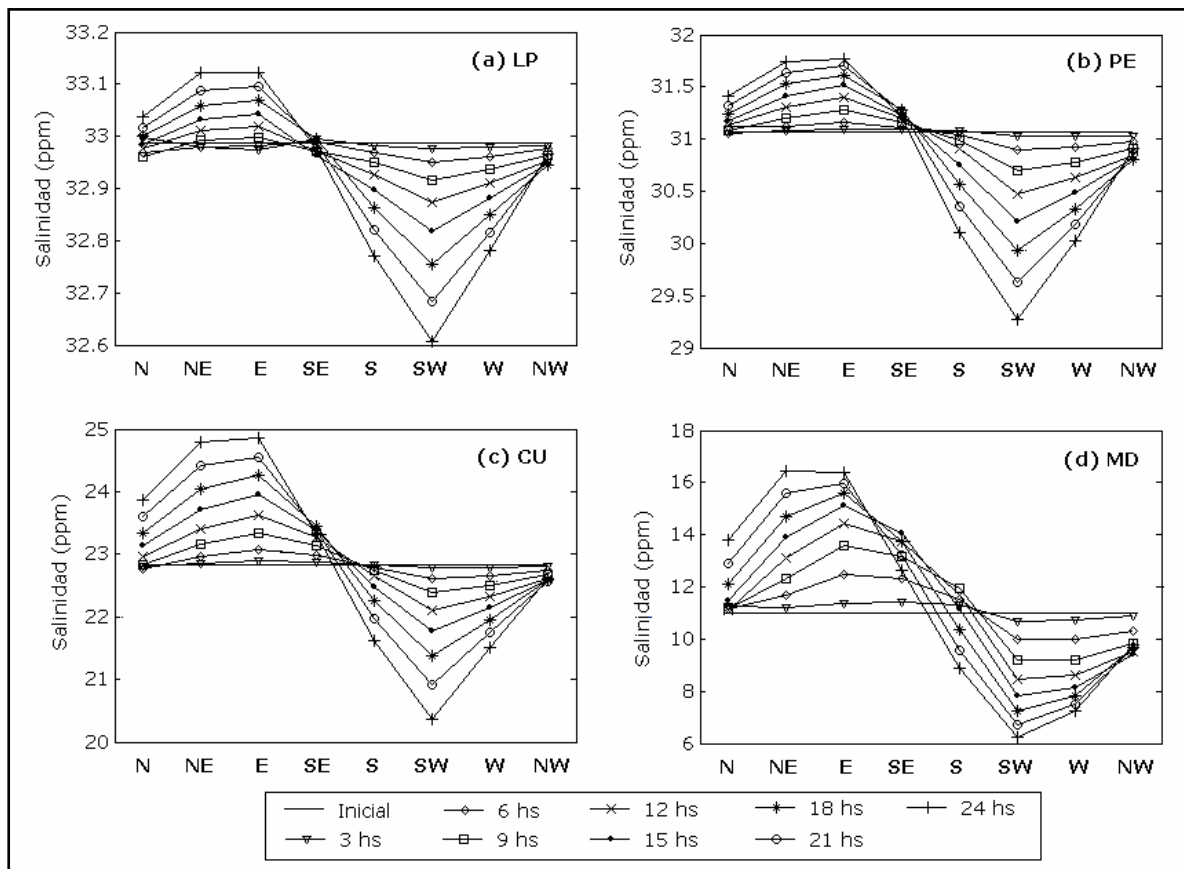


Figura 10.8: Variación de salinidad generada por los 8 vientos en los puntos de control ubicados en la costa uruguaya (a) LP, (b) PE, (c) CU y (d) MD.

En la Figura 10.8 se presenta esta variación para los puntos de control ubicados en la costa uruguaya, LP, PE, CU y MD. Cada gráfica muestra la variación de salinidad en determinado punto debido a los diferentes vientos en función de la duración del mismo. Se observa en la misma que la intensidad de la variación de salinidad generada por los diferentes vientos varía según el punto de control. Por ejemplo en el punto más exterior, LP, las variaciones en la salinidad son muy pequeñas, mientras que en Montevideo la salinidad puede variar hasta 6 ppm luego de 24 horas con vientos del Noreste y Este. Por otro lado se observa que en los cuatro puntos, los vientos del Norte, Noreste y Este generan un aumento de la salinidad, siendo mayor el efecto de los dos últimos. Los vientos del Sur, Suroeste, y Oeste en cambio generan una clara disminución de la salinidad en las cuatro ubicaciones, siendo el mayor efecto el de los vientos del Suroeste. En particular en MD los vientos del Sur generan hasta las 15 horas un leve aumento de salinidad y luego se produce una disminución de la misma respecto de la condición inicial. Los vientos del Sureste no generan un efecto tan claro en las cuatro ubicaciones, observándose en algunos casos un aumento de salinidad a medida que aumenta la duración del viento y en otros casos una disminución de la misma, lo cual se observa claramente en MD. Los vientos del Noroeste producen

en cambio una disminución de salinidad durante las primeras horas pero después hay variaciones que no muestran una tendencia clara de comportamiento frente a estos vientos.

En la Figura 10.9 se muestra la variación de salinidad generada por los ocho vientos en los puntos de control ubicados sobre la costa argentina. En la misma se observa que la mayor variación se genera en el punto ubicado cerca de Punta Piedras, PP. Los vientos del Norte y Noreste generan una clara disminución de la salinidad en todos los puntos, mientras que los vientos del Sureste, Sur y Suroeste generan un aumento de la salinidad. Los vientos del Oeste generan también un aumento claro de salinidad en BS1, y en los puntos PP y BS2, aunque en estos últimos durante las primeras horas existe una disminución de la misma. En cambio en PR los vientos del Oeste no generan casi variación de salinidad. Los vientos del Noroeste generan en todos los puntos una disminución de salinidad, aunque la intensidad de la variación solamente es importante en BS2. Los vientos del Este generan en BS2 y en PR una disminución de la salinidad, mientras que en BS2 se observa un aumento y en PP las primeras horas aumenta la salinidad y luego disminuye.

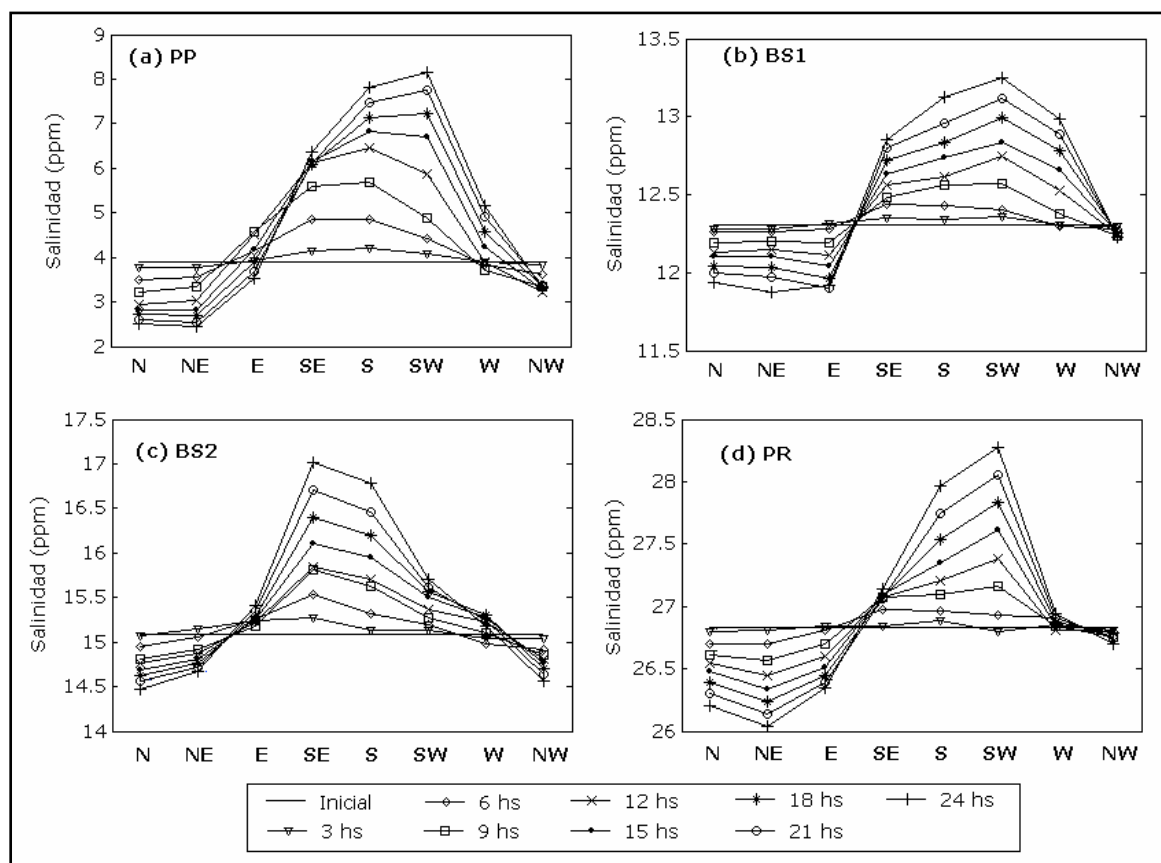


Figura 10.9: Variación de salinidad generada por los 8 vientos en los puntos de control ubicados en la costa argentina (a) PP, (b) SB1, (c) SB2 y (d) PR.

En la Figura 10.10 se observa la influencia de los diferentes vientos sobre el campo salino en los puntos ubicados en la zona central del Río de la Plata. La mayor variación se observa en el punto M1, ubicado en una zona poca profunda, en el Banco Inglés. En este punto todos los vientos salvo los del Oeste y Noroeste generan un aumento de salinidad, con una disminución pequeña

durante las primeras horas generada por los vientos del Norte. Los vientos del Oeste y del Noroeste generan en cambio una disminución de salinidad. La variación de salinidad que se observa en los puntos M2 y M4 frente a la acción de los diferentes vientos es similar. Los vientos del Noreste y del Este generan una disminución de salinidad mientras que los vientos del Sureste, Sur, Suroeste, Oeste y Noroeste un aumento de la misma. Los vientos del Norte en M2 disminuyen la salinidad y en M4 aunque las primeras horas se produce un aumento luego se invierte esta tendencia y la salinidad disminuye. El punto M3, ubicado en el borde de la Bahía Samborombón en una zona de entre 10 y 15 m de profundidad, presenta un comportamiento diferente al resto de los puntos. En esta ubicación los vientos del Norte, Noreste y del Este, salvo en las primeras horas en el último, generan una disminución de salinidad. Los vientos del Sur y del Suroeste generan un aumento de salinidad y los vientos del Oeste generan, salvo en las primeras horas, también un aumento de salinidad. En cambio los vientos del Sureste y Noroeste no generan una tendencia clara, los primeros las primeras horas aumentan la salinidad y después la disminuyen, y los segundos producen el efecto inverso.

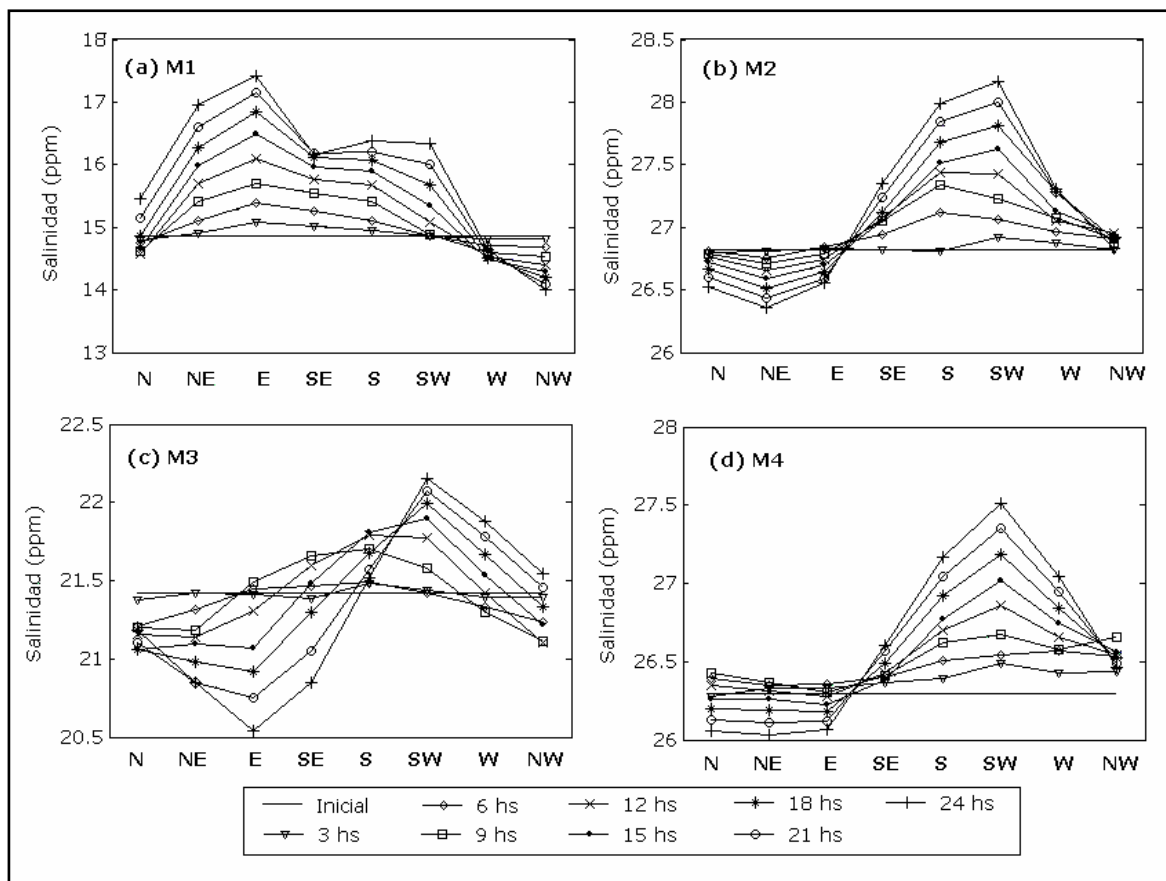


Figura 10.10: Variación de salinidad generada por los 8 vientos en los puntos de control ubicados en la zona central del Río de la Plata (a) M1, (b) M2, (c) M3 y (d) M4.

En la Figura 10.11 se presentan los resultados obtenidos en el punto RI ubicado en el límite de la zonas Intermedia y Exterior del Río de la Plata. Se observa en la misma que los vientos del

Norte, Noreste, Oeste y Noroeste claramente generan una disminución de salinidad y que los vientos del Este, Sureste, Sur y Suroeste un aumento de la misma.

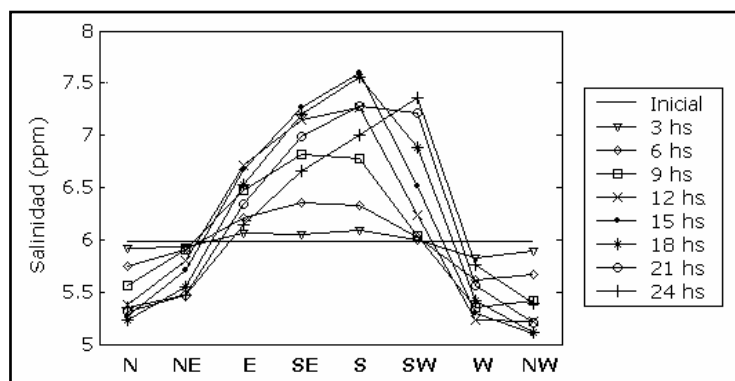


Figura 10.11: Variación de salinidad generada por los 8 vientos en el punto RI ubicado en la línea Montevideo – Punta Piedras.

A partir de los resultados obtenidos en los distintos puntos de control ubicados en el Río de la Plata que se han presentado, se pueden desprender algunos comportamientos generales. Los vientos del Norte y del Noreste generan sobre la costa uruguaya un marcado aumento de la salinidad y sobre los puntos de la costa argentina, incluyendo al punto RI y a M3, una disminución de la salinidad. La intensidad de las variaciones de salinidad son más importantes cuando ocurren vientos del Noreste que del Norte, para la misma duración de los mismos. Esto significa que se genera un desplazamiento del campo salino en sentido entrante por la zona Norte del río y una desplazamiento de las curvas de isoconcentración hacia el exterior en la zona central y Sur del río. Esto se observa en la Figura 10.12, donde se presenta la ubicación inicial de las curvas de isoconcentración en trazo grueso y la ubicación de las mismas con trazo fino a las 24 horas de iniciado el viento del sector Norte (Figura 10.12(a)) y el viento del Noreste (Figura 10.12(b)). Se observa además que por la zona del Banco Inglés es donde ocurre la inversión del movimiento de las líneas, siendo para un lado entrante (aumento salinidad) y del otro saliente (disminución de salinidad).

El efecto de los vientos del Este es similar al generado por los vientos del Norte y del Noreste en la mayoría de los puntos de control aunque el efecto sobre los puntos ubicados sobre la costa argentina no es tan claro. Como se observó anteriormente en BS2 y en PR la salinidad disminuye pero en BS2 aumenta y en PP varía. En la Figura 10.13(a) se presenta la variación de las curvas de isoconcentración cuando el viento proviene del Este. En la misma se observa que sobre la costa uruguaya y en la zona central el movimiento de las líneas es similar al caso con vientos del Norte y Noreste, pero en la zona cercana a Punta Piedras las líneas de 5 y 10 ppm presentan una muy baja variación. Los vientos del Este impiden en este caso el movimiento hacia fuera del río del campo salino y debido a eso la variación en esas curvas es menor. En la Figura 10.13(b) se presenta la variación de las curvas de isoconcentración de salinidad por los vientos del Sur. En la misma se observa lo que se mencionó a partir del análisis de las ubicaciones, que principalmente la salinidad

en la zona Norte del río disminuye y que en la zona central y en la zona Sur aumenta. Se observa además como los vientos del Sur generan el desplazamiento hacia el Norte del campo salino en la zona central y hacia el Este en la zona Norte.

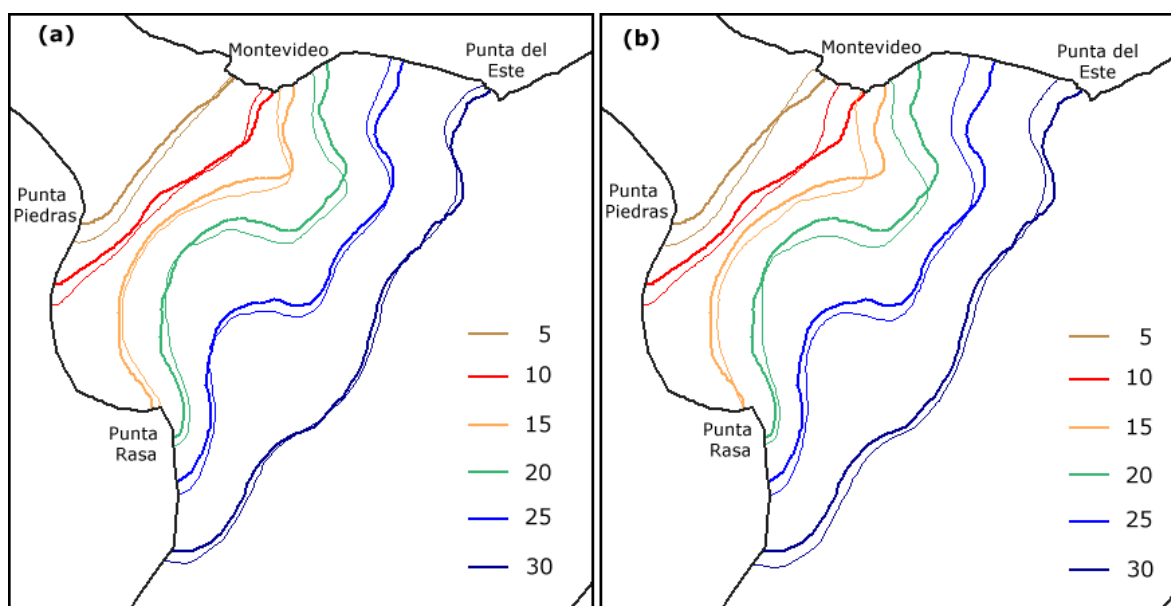


Figura 10.12: Líneas de isoconcentración en el instante inicial (trazo grueso) y 24 horas después (trazo fino) de iniciado el viento constante desde el (a) Norte y (b) Noreste.

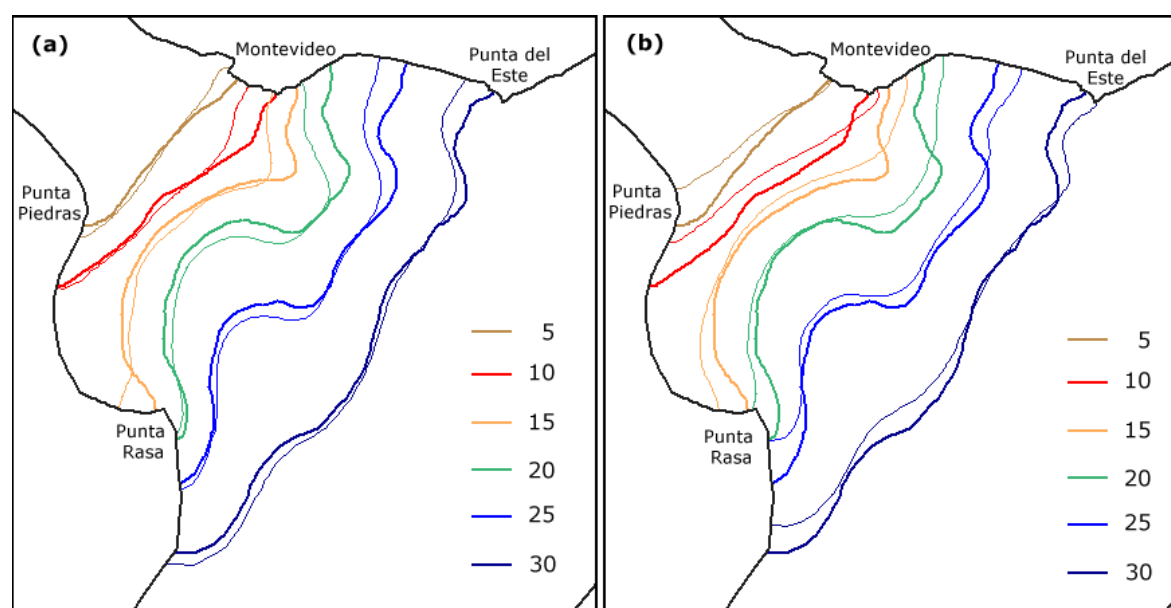


Figura 10.13: Líneas de isoconcentración en el instante inicial (trazo grueso) y 24 horas después (trazo fino) de iniciado el viento constante desde el (a) Este y (b) Sur.

El efecto de los vientos del Suroeste sobre el campo salino es el mismo que los vientos del Sur, aunque genera mayores variaciones debido a la mayor intensidad media del mismo. Esto se puede observar en la variación del campo salino presentada en la Figura 10.14(a). En dicha figura se observa el gran desplazamiento hacia el Este de las curvas sobre la zona Norte del río que genera la disminución de salinidad en esa zona y el desplazamiento hacia el Norte de las curvas en

el resto del río, lo que genera el aumento de salinidad observado anteriormente. Los vientos del Oeste generan también sobre la costa uruguaya una disminución de la salinidad al desplazar hacia el Este el campo salino, pero el efecto sobre la zona central y sur del río es mucho menor. Esto se observa en la variación de las curvas cuando el viento proviene del Oeste presentada en la Figura 10.14(b). El movimiento de las curvas sobre la costa argentina de 15, 20 y 25 ppm es mucho menor al observado para los vientos del Sur y Suroeste, y en cambio el desplazamiento de las mismas en la zona Norte es apreciable.

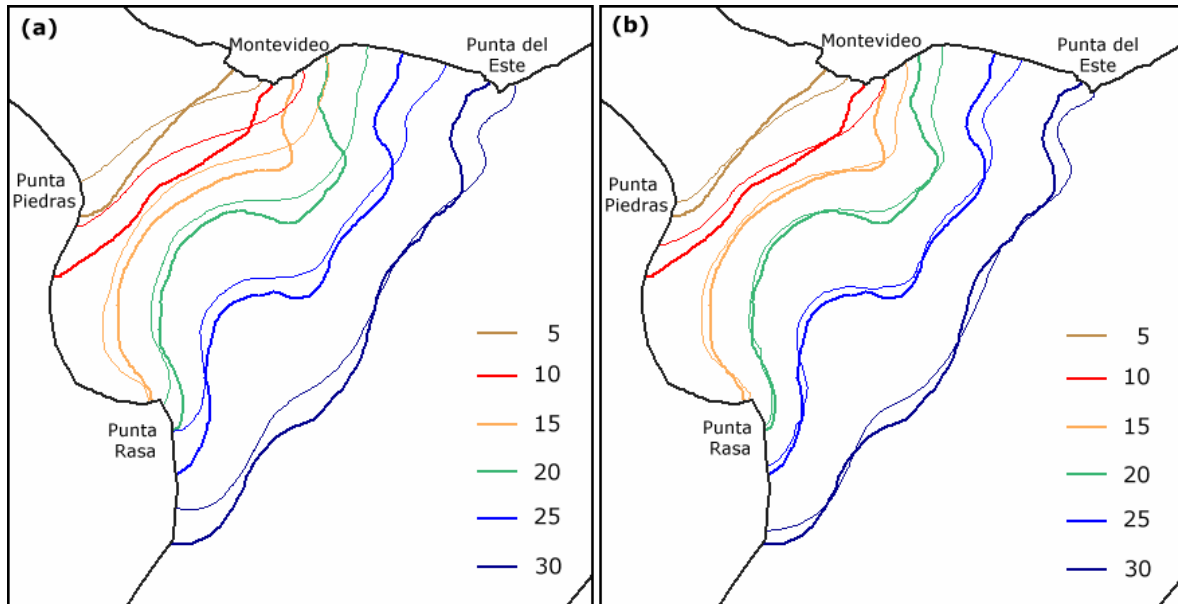


Figura 10.14: Líneas de isoconcentración en el instante inicial (trazo grueso) y 24 horas después (trazo fino) de iniciado el viento constante desde el (a) Suroeste y (b) Oeste.

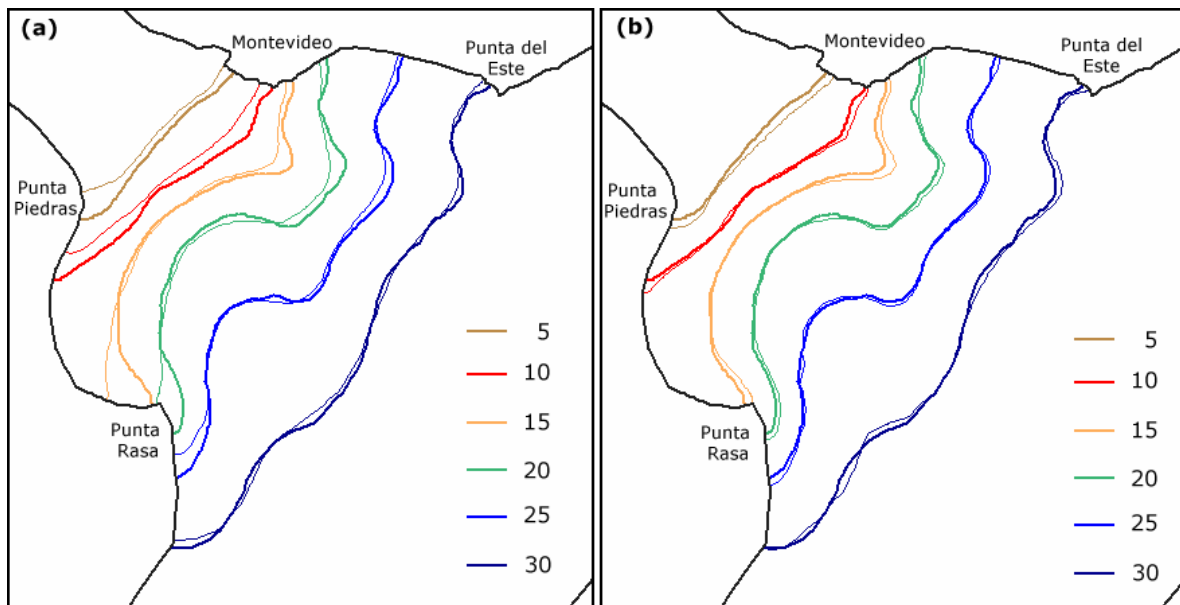


Figura 10.15: Líneas de isoconcentración en el instante inicial (trazo grueso) y 24 horas después (trazo fino) de iniciado el viento constante desde el (a) Sureste y (b) Noroeste.

En la Figura 10.15 se presenta la variación del campo salino generada por los vientos provenientes del Sureste y del Noroeste. Estos dos casos presentan ciertas particularidades. En el análisis efectuado en los puntos de control se observó que el efecto de los vientos del Sureste en la zona Norte no era tan claro como en los otros casos y que en los puntos ubicados en la zona Sur y central del río se generaba un aumento de la salinidad. Este comportamiento se observa más claramente en la Figura 10.15(a); donde además se puede observar que en general los desplazamientos de las curvas de isoconcentración son pequeños. Sin embargo en la zona Sur de la Bahía Samborombón se observa un desplazamiento importante de la curva de 15 ppm. El análisis de la variación de salinidad por un viento del Noroeste en los puntos de control estudiados mostró que el efecto no es importante. Esto se observa en la Figura 10.15(b), donde las curvas iniciales y a las 24 horas son muy similares.

En definitiva se pueden distinguir dos comportamientos claros. Cuando los vientos provienen del sector formado por las direcciones Norte, Noreste y Este, la salinidad aumenta en la costa uruguaya mientras que en la costa argentina disminuye. El campo salino se desplaza en este caso hacia el Oeste por la zona Norte del río y hacia el Sur por la costa argentina. En la zona central se produce un desplazamiento más lento del campo salino en sentido antihorario en función del movimiento mayor que se registra sobre las costas. Esto genera principalmente un aumento del gradiente de salinidad por la costa Norte. Por otro lado cuando los vientos provienen del sector Sur, Suroeste y Oeste se observa la situación inversa; la salinidad disminuye sobre la costa uruguaya y aumenta sobre la costa argentina. El campo salino se desplaza por la costa uruguaya hacia el Este y sobre la costa argentina hacia el Norte; con la parte central que rota en este caso en sentido horario. La variación de salinidad en general es mayor sobre la costa Norte, siendo los vientos del Oeste los que generan variaciones más lentas de salinidad en la Bahía de Samborombón. Los vientos del sector Noroeste particularmente no generan grandes efectos sobre el campo salino y las variaciones de salinidad que se observan disminuyen a medida que aumenta la duración de los mismos. Principalmente el desplazamiento del campo salino es hacia la parte exterior, en un sentido igual al eje del río, es decir Noroeste – Sureste. Por último los vientos del Sureste no presentan un comportamiento muy definido. A grandes rasgos durante las primeras horas se produce un empuje del campo salino hacia el interior del río en la dirección de su eje pero luego se genera una situación similar a la generada por los vientos del sector Sur – Oeste, la salinidad disminuye sobre la costa uruguaya y aumenta sobre la costa argentina al producirse una rotación del campo salino en sentido horario, con una mayor variación de la salinidad sobre la costa argentina.

Vinculando las variaciones de salinidad en los puntos de control seleccionados con las distribuciones de frecuencias en función de la duración de los diferentes vientos, presentadas en el punto 10.3.2, se puede analizar según la frecuencia de cada viento si su efecto sobre el campo salino será más o menos importante.

Según los resultados obtenidos en la modelación con vientos Norte, el 12% de las veces que ocurren vientos del Norte, correspondiente a una duración de 12 horas, la salinidad variaría menos de 0,2 ppm en la costa uruguaya, hasta un 1 ppm en la costa argentina y hasta 0,5 ppm en la zona central. Sin embargo el 3,17% y el 1,06% de los vientos del Norte, que duran 18 horas y 30 horas respectivamente según la Tabla 10.2, estarían generando variaciones de salinidad de hasta 1 y 4,5 ppm en la costa de Montevideo, de hasta 1,2 y 1,6 ppm en la costa argentina y menores a 0,8 y 1,3 ppm en la zona central. Los vientos del Noroeste generan mayores variaciones de salinidad que los vientos del Norte. Casi el 14% de los vientos del Noroeste (12 horas de duración) generan variaciones de salinidad de hasta 2 ppm en la zona cercana a Montevideo y hasta 1 ppm y 0,8 ppm en la costa argentina y en la zona central respectivamente. Además el 4,15% y el 1,42% de los vientos del Noreste que duran 18 y 24 horas respectivamente generan variaciones de salinidad de 3,7 y 5,4 ppm en la costa de Montevideo, hasta 1,3 y 1,5 ppm en la costa argentina y hasta 1,4 y 2,1 ppm en la zona central del río. Los vientos del Este, que generan un efecto similar al de los vientos anteriores sobre el campo salino del Río de la Plata, el 10,4% de las veces duran 12 horas y modifican la salinidad hasta en 3,5 ppm en la costa uruguaya, hasta 0,6 ppm en la costa argentina y hasta 1,3 ppm en la zona central. Además el 4,2% duran 18 horas y el 1,26% 33 horas, lo que genera variaciones de hasta 4,6 y 7,2 ppm en la costa uruguaya, menores a 1 ppm en la costa argentina en los dos casos y de hasta 2 y 3,5 ppm en la zona central, respectivamente. Se observa en función de esto que los vientos del sector Norte a Este pasando por el Noreste generan mayores variaciones de salinidad sobre la costa Norte del río entre Montevideo y Punta del Este.

Por otro lado los vientos del sector Sur un 9,7% duran 12 horas, lo cual según la modelación correspondiente genera una variación menor a 0,7 ppm en la costa uruguaya pero de hasta 2,6 ppm en la costa argentina. Además, el 4,78% de los vientos del Sur duran 18 horas y el 1,36% 36 horas según la Tabla 10.6. En estos casos las variaciones de salinidad alcanzan 0,7 ppm y 4 ppm en la costa uruguaya respectivamente, 3,6 ppm y casi 6 ppm en la costa argentina y 1,6 y 2,4 ppm en la zona central respectivamente. Los vientos del Suroeste también generan variaciones importantes de la salinidad, sobretudo sobre la costa uruguaya. Por ejemplo el 9,45% de los vientos del Suroeste duran 12 horas y varían la salinidad hasta 2,6 ppm en la costa uruguaya y hasta 2 ppm en la costa argentina. Mayores duraciones de vientos del Suroeste, por ejemplo 18 horas correspondiente a un 4,72% de los casos y de 27 horas correspondiente a un 2,17%, generan variaciones de hasta 3,8 y 5,3 ppm respectivamente en la costa uruguaya, de hasta 1 ppm y 1,7 ppm en la zona central del río y de hasta 3,3 y 4,7 ppm respectivamente en la costa argentina. De los vientos del Oeste, el 8,39% dura 12 horas y generan variaciones de hasta 2,5 ppm en la zona cercana a Montevideo, variaciones menores a 0,2 ppm en la costa argentina y menores a 0,7 ppm en la zona central. Los vientos del Oeste durante 18 horas ocurren con una frecuencia de un 4,2% y generan variaciones de hasta 3,3 ppm en la zona de Montevideo y variaciones menores a 1 ppm en el resto del río. Mayores duraciones, de 33 horas que representan

un 1,07% de los vientos del Oeste generan variaciones de hasta 4,7 ppm en la costa uruguaya y variaciones de hasta 1,2 ppm en el resto del río.

El 12,5% de los vientos del Sureste duran 12 horas y generan sobre el campo salino variaciones de salinidad de hasta 2,8 ppm sobre la costa uruguaya y de hasta 2,2 ppm sobre la costa argentina. Sin embargo, a las 18 horas de duración de vientos del Sureste, las variaciones en la costa uruguaya son menores a 2,7 ppm y menores a 2,2 ppm en la costa argentina, por lo que no presentan grandes diferencias con el efecto de estos vientos en 12 horas. En el 1,04% de los casos, que corresponden a duraciones de 30 horas de vientos del Sureste, las variaciones respecto a la salinidad inicial disminuyen en la costa uruguaya a valores menores a 0,7 ppm y aumentan en la costa argentina hasta 3,2 ppm. Para los vientos del Noroeste ocurre algo similar, para el 8,89% de los casos que duran 12 horas las variaciones de salinidad en la costa uruguaya son de hasta 1,5 ppm y de hasta 0,7 ppm en el resto del río. Para duraciones mayores, 18 horas que representan el 4,53% y 27 horas que representan el 1,51%, las variaciones de salinidad en la costa uruguaya disminuyen a 1,3 y 0,9 ppm respectivamente, y aumentan en el resto a 0,8 ppm y hasta 0,9 ppm respectivamente.

10.3.4 - Resultados obtenidos – Campo de corrientes

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 el Río de la Plata 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 al último instante de la modelación "Caudal fluvial – Con salinidad", presentado en la Figura 10.16(a). Por otro lado, se analiza también la componente baroclínica del campo de velocidades, por lo que se comparan los resultados obtenidos con el campo de corrientes correspondiente al mismo viento pero considerando un fluido homogéneo, es decir, sin considerar la variación de la salinidad en el río. El campo de corrientes inicial correspondiente a estas modelaciones es el último instante de la modelación "Caudal fluvial – Sin salinidad" y se presenta en la Figura 10.16(b).

En la Figura 10.17(a) se presenta el campo de corrientes obtenido con viento desde el Norte para un fluido no homogéneo. Comparando dicho campo con la situación inicial correspondiente se observa que los vientos del Norte modifican el campo de corrientes generando un flujo entrante por toda la zona Norte del río hacia el Oeste y acentúan el flujo saliente hacia el Sur por la zona central y la costa argentina. La corriente de agua oceánica que ingresa al Río de la Plata por la frontera Norte se divide en una parte que sale del río por la zona central hacia el Sur y otra parte que

continúa hacia dentro del río donde es desviada por la descarga fluvial hacia el Sur por la costa argentina. Por otro lado se observan intensidades de corriente mayores que cuando no se consideraron vientos, entre 10 cm/s y 25 cm/s en la mayor parte del Río de la Plata. El campo de corrientes con un viento del Norte cuando no se considera la variación de la salinidad en el Río de la Plata se presenta en la Figura 10.17(b). Las direcciones principales del flujo son similares a las obtenidas al considerar un fluido no homogéneo, lo que significa que las componentes baroclínicas no son las que más afectan al flujo en este caso, sino que la corriente inducida por el viento es el principal responsable de la distribución de corrientes. En los dos casos se observa una influencia de la batimetría, principalmente en la zona de los bancos de Arquímedes, Inglés y de Rouen, donde el flujo es saliente con intensidades grandes.

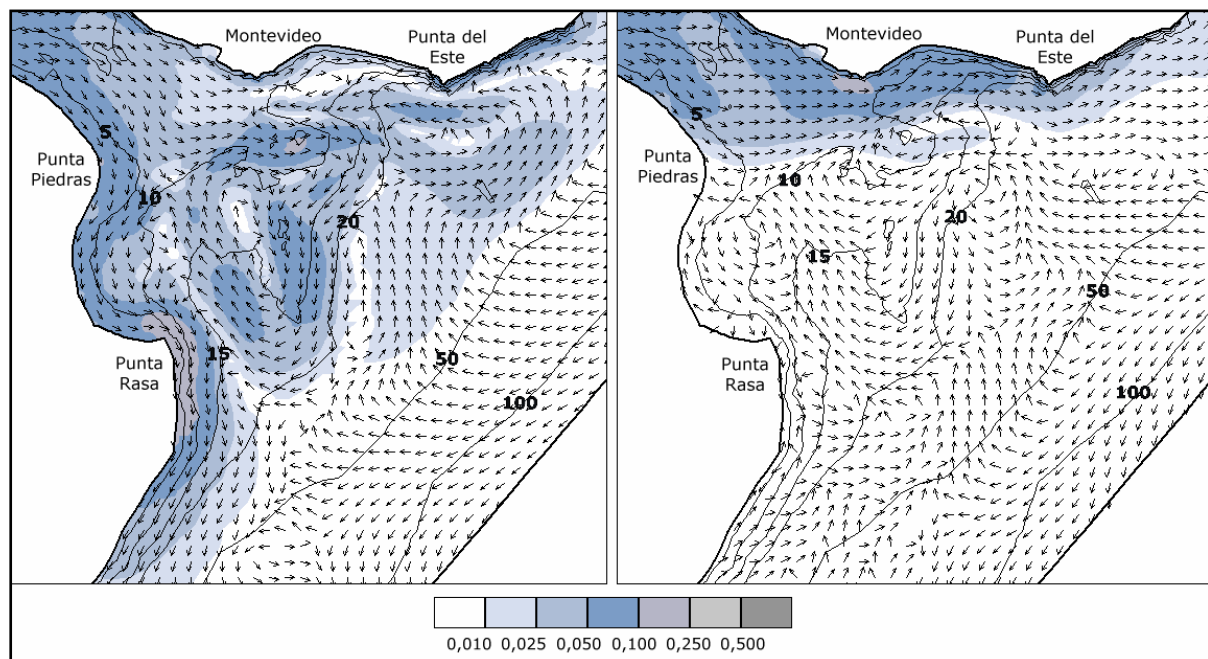


Figura 10.16: Campos de corrientes (m/s) correspondientes a las situaciones iniciales de las modelaciones de los 8 vientos considerando (a) un fluido no homogéneo y (b) un fluido homogéneo. Batimetría en metros.

El campo de corrientes que se genera cuando el viento proviene del sector Noreste es muy similar al obtenido para los vientos del Norte aunque existen algunas diferencias. En la Figura 10.18(a) se observa que el campo de corrientes es diferente al obtenido cuando no se consideró el viento y que nuevamente se produce un flujo entrante al Río de la Plata por toda la costa Norte. Se observa además el flujo saliente en dirección Sur por la zona central de los Bancos de Arquímedes y Rouen; y la descarga del caudal fluvial principalmente por la costa argentina. En este caso se observa que en la zona costera Sur de la Bahía de Samborombón ocurre una inversión del flujo saliente y se genera una zona de bajas intensidades. Las intensidades obtenidas en este caso superan los 25 cm/s en ciertas regiones de la zona Norte del Río de la Plata, aunque en la mayor parte del río las mismas son mayores a 10 cm/s pero menores a 25 cm/s. El campo de corrientes con viento del Noreste pero sin considerar la salinidad se presenta en la Figura 10.18(b). El

comportamiento general es igual al observado en la Figura 10.18(a), lo que significa nuevamente que las corrientes generadas por los vientos dominan frente a las corrientes baroclínicas en todo el dominio de cálculo. En ambos campos de corriente se observa claramente la influencia de la batimetría, principalmente en las variaciones en la intensidad de la corriente. Por ejemplo se observa que la curva batimétrica de 20 m en la zona central y la curva de 50 m en la parte exterior prácticamente coinciden con las curvas de isointensidad de 10 cm/s y 5 cm/s, respectivamente.

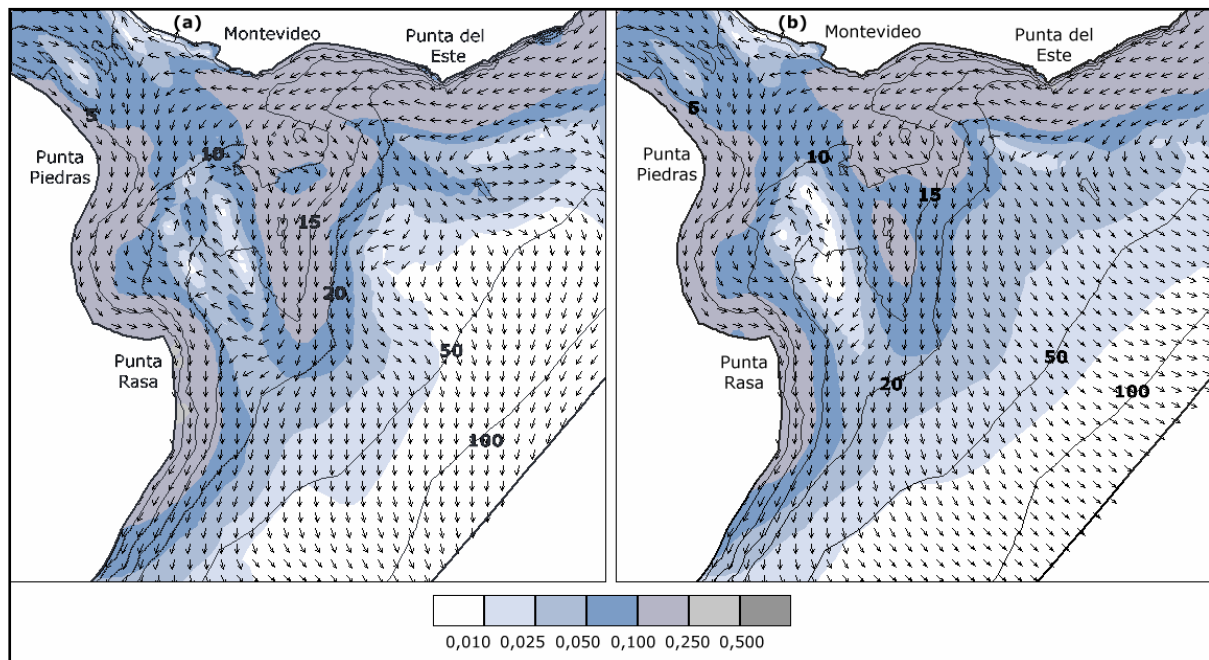


Figura 10.17: Campos de corrientes (m/s) luego de 48 horas de simulación con viento Norte considerando (a) un fluido no homogéneo y (b) un fluido homogéneo. Batimetría en metros.

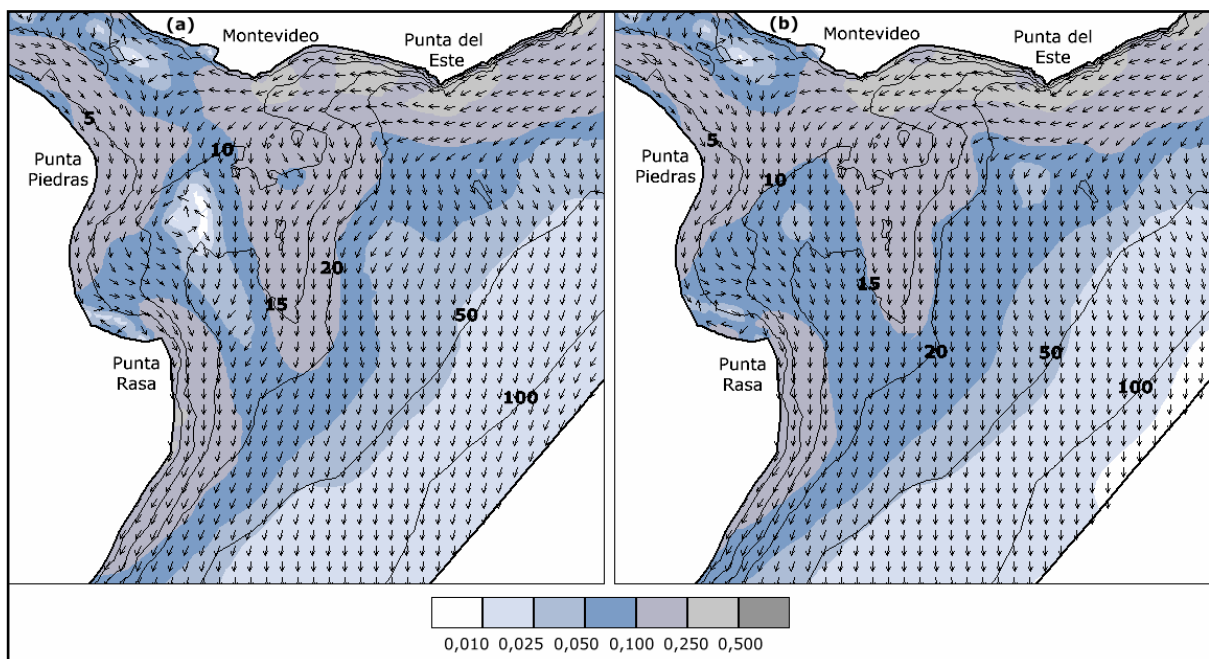


Figura 10.18: Campos de corrientes (m/s) luego de 48 horas de simulación con viento Noreste considerando (a) un fluido no homogéneo y (b) un fluido homogéneo. Batimetría en metros.

Con vientos del Este, los campos de corriente obtenidos con el modelo considerando un fluido no homogéneo (Figura 10.19(a)) y un fluido homogéneo (Figura 10.19(b)) son similares y diferentes a las respectivas condiciones iniciales. El comportamiento general muestra un flujo entrante hacia el río por la costa Norte que en la zona central se desvía hacia el Sur generando un flujo de descarga en toda la región comprendida entre el Banco de Rouen y la costa argentina. En la costa Sur de la Bahía de Samborombón se produce un vórtice de flujo hacia el Noroeste por la costa y hacia el Sureste por la zona central de la Bahía. Aunque a grandes rasgos los campos de la Figuras 10.19(a) y 10.19(b) son similares, se observa que en la zona del Canal Marítimo las intensidades con salinidad son menores a las calculadas sin salinidad y que en la zona del banco de Rouen ocurre lo inverso. El motivo son las corrientes inducidas por densidad, entrantes al río por las zonas más profundas que se oponen a la mayor descarga por el Canal Marítimo y favorecen la descarga por las zonas poco profundas.

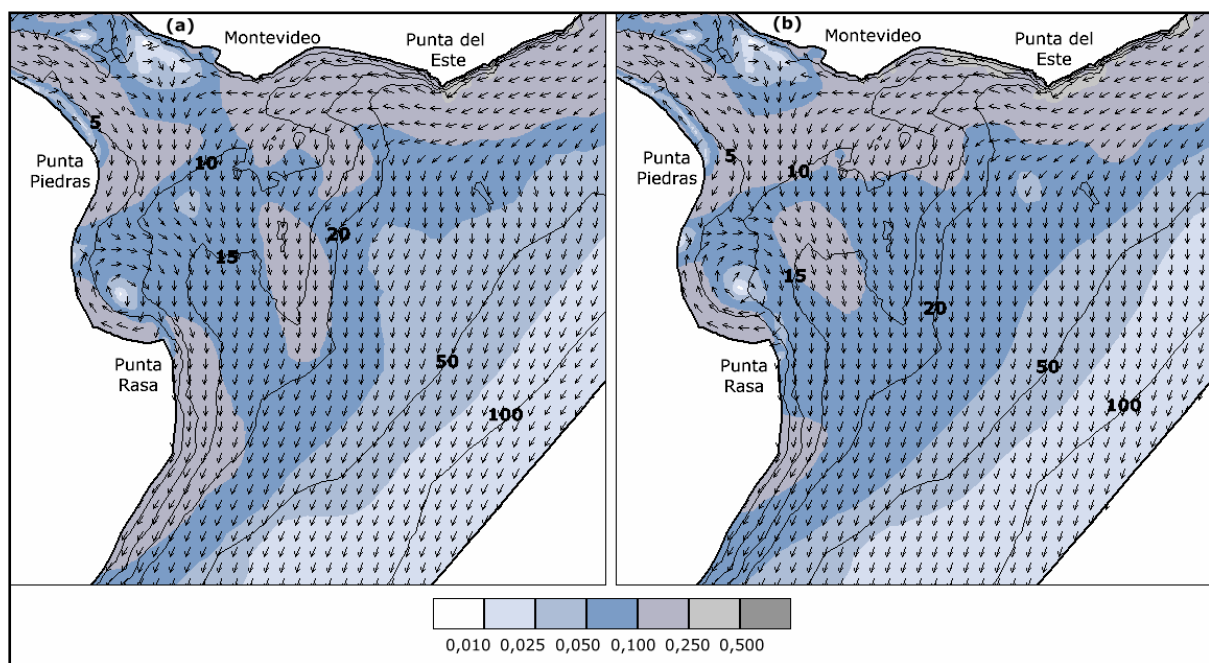


Figura 10.19: Campos de corrientes (m/s) luego de 48 horas de simulación con viento Este considerando (a) un fluido no homogéneo y (b) un fluido homogéneo. Batimetría en metros.

A partir del análisis de los campos de corriente generados por los vientos del Norte, Noreste y Este, se deduce que los vientos de estas direcciones provocan efectos similares sobre las distribuciones de velocidad en el Río de la Plata, de la misma forma que se observaron efectos similares sobre las distribuciones de salinidad. Es posible afirmar que los vientos del sector Norte a Este pasando por el Noreste generan un flujo entrante al río por la zona Norte y un flujo saliente por la zona central hacia el Sur y por la costa argentina. Las características del flujo en la zona del Canal Marítimo y en la costa Sur de la Bahía de Samborombón dependerán más específicamente de la dirección de cada viento, ya que no se observaron los mismos comportamientos en los tres casos.

El campo de corrientes obtenido con un viento proveniente del Sureste considerando un fluido no homogéneo se presenta en la Figura 10.20(a). Se observa en la misma que la descarga fluvial ocurre sobre la costa uruguaya con intensidades entre 10 y 25 cm/s principalmente, mientras que por la costa argentina se genera un ingreso de agua oceánica con intensidades del mismo orden. En la boca de la Bahía de Samborombón se produce una rotación del flujo con un flujo saliente al río por la zona central y entrante por la Bahía. Sobre la zona poco profunda de los Bancos de Arquímedes e Inglés el flujo tiene dirección Norte y se termina desplazando hacia el Este con el flujo saliente por la costa uruguaya. Al comparar esta distribución de velocidades con la correspondiente a la condición inicial presentada en la Figura 10.16(a) se observa que el viento generó una inversión del flujo salvo en la zona cercana a la costa uruguaya donde se producía una descarga también sin considerar el efecto del viento. La influencia del viento del Sureste sin tener en cuenta la componente baroclínica del flujo se observa comparando las distribuciones de velocidades presentadas en la Figura 10.16(b) y en la Figura 10.20(b). La comparación muestra que los vientos del Sureste potencian la descarga por la costa uruguaya, generan un flujo entrante por la costa argentina, un flujo saliente por la zona del Canal Marítimo y un flujo hacia el Norte por la zona central. Por otro lado, comparando las distribuciones presentadas en la Figura 10.20(a) y Figura 10.20(b) se observan diferencias principalmente en las intensidades del flujo, lo que indica que la componente baroclínica en este caso tiene cierta influencia sobre el campo de velocidades.

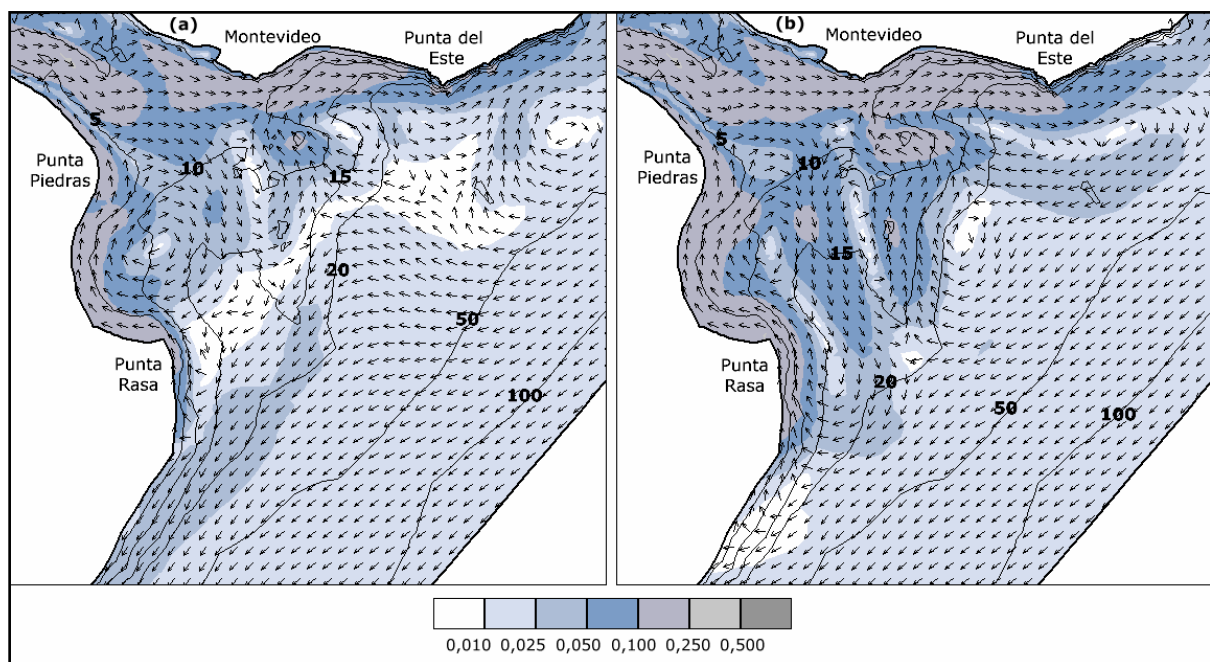


Figura 10.20: Campos de corrientes (m/s) luego de 48 horas de simulación con viento Sureste considerando (a) un fluido no homogéneo y (b) un fluido homogéneo. Batimetría en metros.

En la Figura 10.21(a) se observa que los vientos del Sur generan una inversión de la distribución de corrientes correspondiente a la situación sin viento. En todo el Río de la Plata salvo sobre al costa uruguaya se produce un flujo entrante al río, de dirección Norte principalmente. Por

la zona Norte del río se produce la descarga fluvial con las intensidades mayores sobre la costa uruguaya, mayores a 25 cm/s. La distribución de velocidades obtenida con vientos del Sur para un fluido homogéneo, presentada en la Figura 10.21(b), presenta las mismas características que la distribución obtenida para un fluido no homogéneo. El flujo principalmente es entrante al río en dirección Norte y el flujo saliente ocurre por la costa Norte.

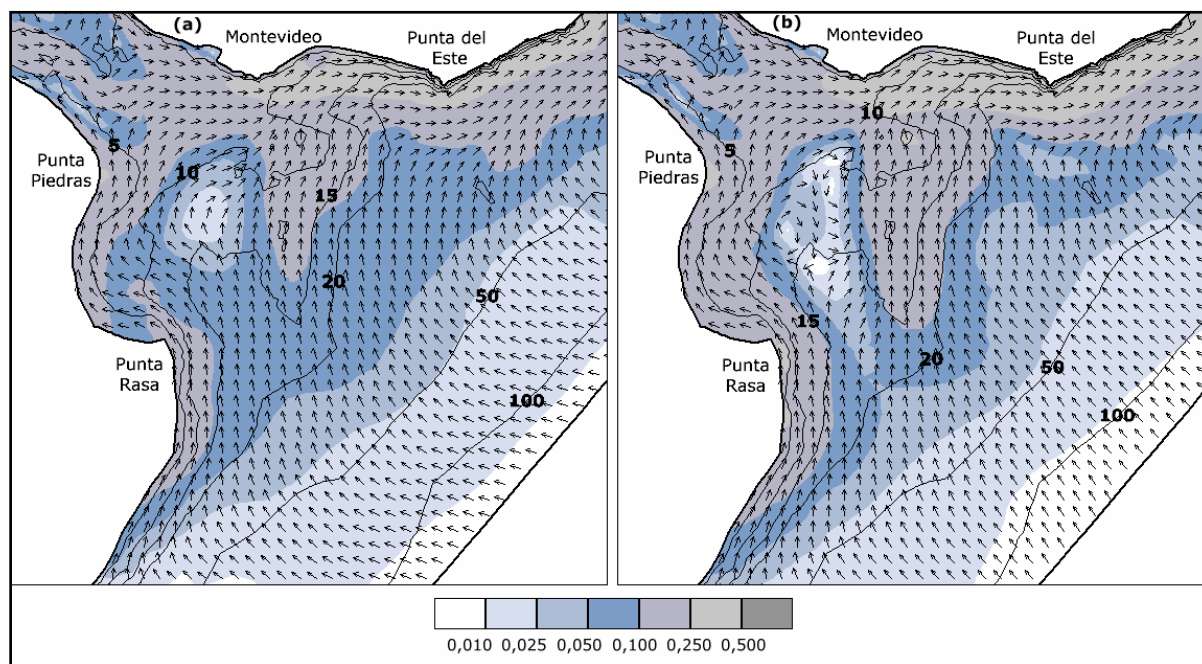
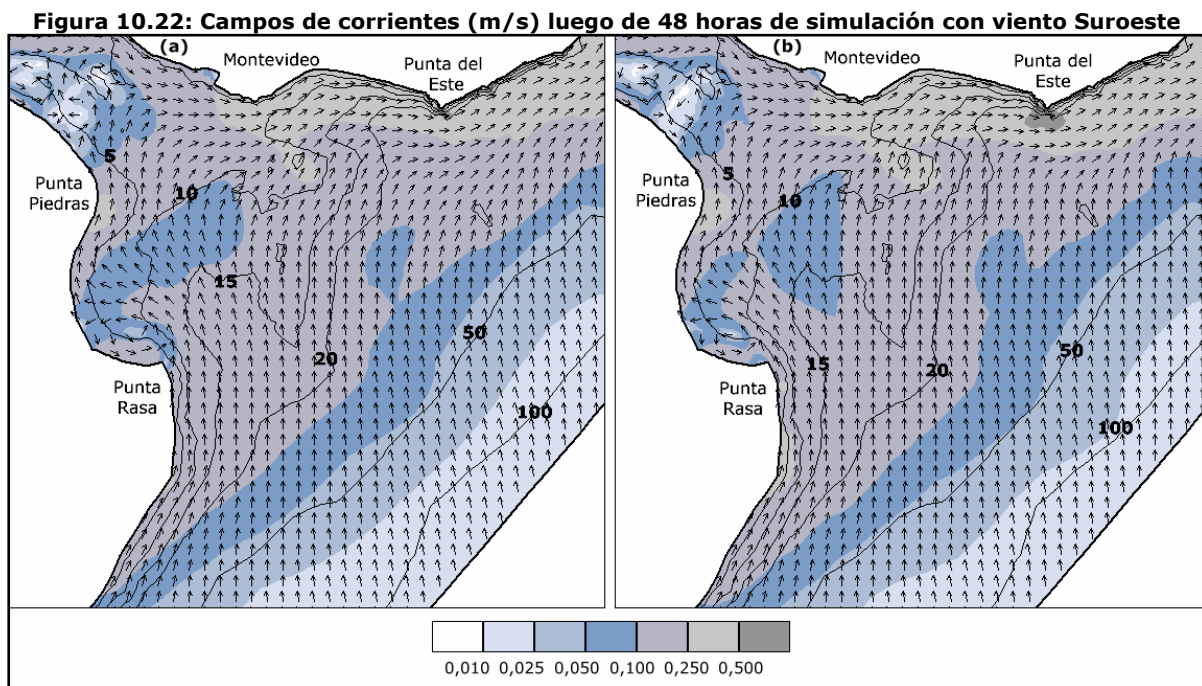


Figura 10.21: Campos de corrientes (m/s) luego de 48 horas de simulación con viento Sur considerando (a) un fluido no homogéneo y (b) un fluido homogéneo. Batimetría en metros.



considerando (a) un fluido no homogéneo y (b) un fluido homogéneo. Batimetría en metros.

En la Figura 10.22(a) se observa el campo de corrientes obtenido con vientos del Suroeste en un fluido no homogéneo. Comparando con la situación sin vientos se observa que los vientos del Suroeste generan una inversión del flujo en la costa argentina, generando un flujo entrante en todo el río salvo en la costa uruguaya, donde se produce la descarga hacia el exterior. Aunque el sentido del campo de flujo es similar al obtenido para los vientos del Sur, en este caso se observan intensidades mayores en la zona central del río, entre 10 y 25 cm/s. La distribución de velocidades con vientos del Suroeste sin considerar la variación de salinidad, que se presenta en la Figura 10.22(b), muestra un resultado similar al obtenido considerando el campo salino. Esto significa que las corrientes inducidas por los vientos del Suroeste tienen gran influencia en la distribución de velocidades en el Río de la Plata.

Las distribuciones de velocidades obtenidas con el modelo cuando los vientos provienen del Oeste para un fluido de densidad variable y de densidad constante se presentan en la Figura 10.23. Se observa en la misma que los vientos del Oeste también generan un flujo saliente por la zona Norte del río de la misma forma que los vientos del Sur y Suroeste. En el resto del río el efecto es diferente, generándose en este caso una flujo entrante al río por la zona central pero una descarga por la costa argentina en la Bahía de Samborombón. Este flujo se observa con y sin salinidad, lo que significa que las corrientes inducidas por los vientos del Oeste son las responsables de esta distribución y no la componente baroclínica del flujo.

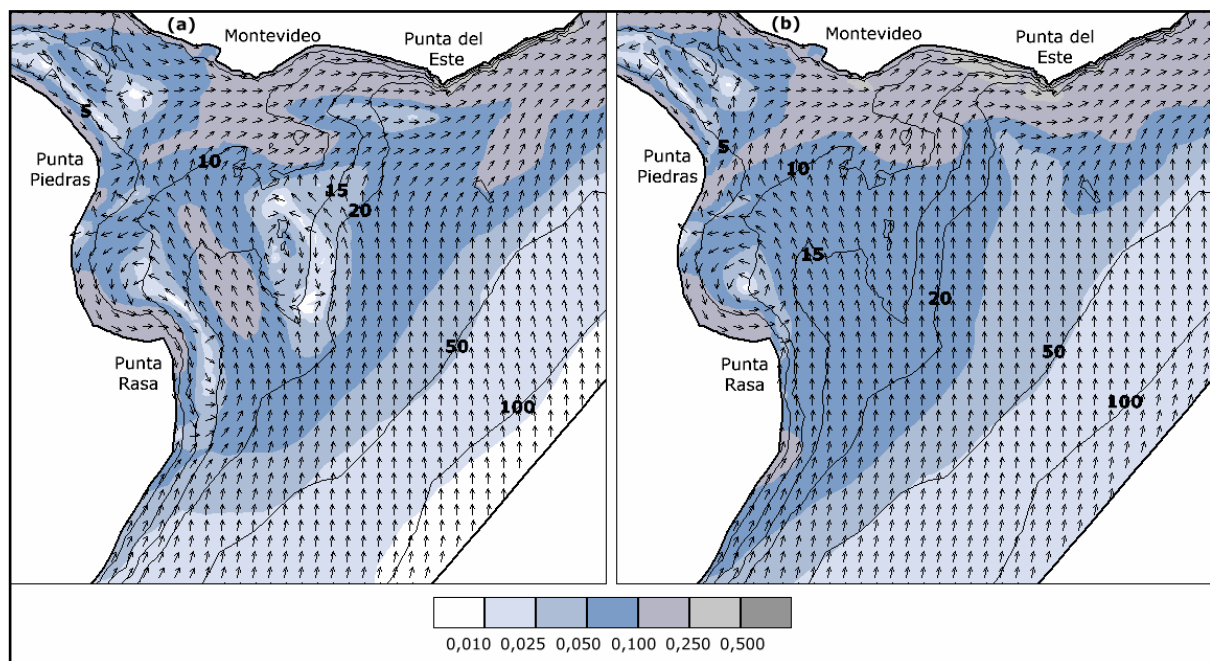


Figura 10.23: Campos de corrientes (m/s) luego de 48 horas de simulación con viento Oeste considerando (a) un fluido no homogéneo y (b) un fluido homogéneo. Batimetría en metros.

Los efectos generados por los vientos de los sectores Sur, Suroeste y Oeste sobre el campo de velocidades son similares en algunos aspectos y pueden agruparse. Los vientos de este sector

producen un flujo saliente por la costa uruguaya y un ingreso de flujo en todo el resto del río, salvo cuando ocurren vientos del Oeste que sobre la costa argentina se produce una zona de descarga.

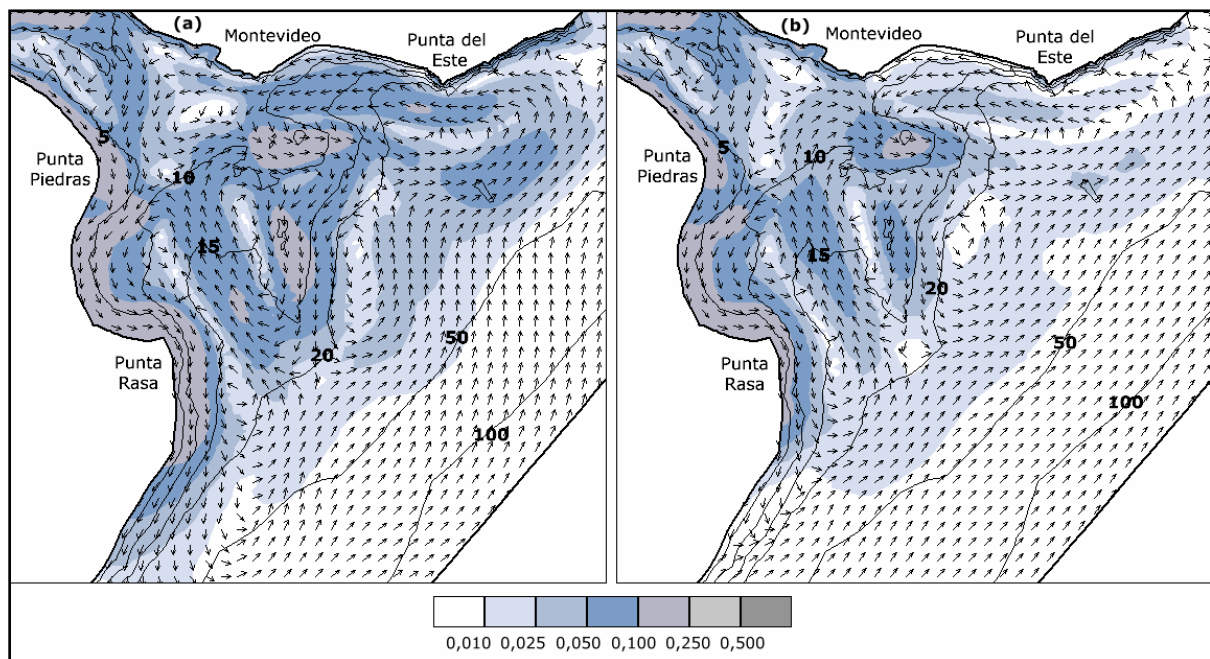


Figura 10.24: Campos de corrientes (m/s) luego de 48 horas de simulación con viento Noroeste considerando (a) un fluido no homogéneo y (b) un fluido homogéneo. Batimetría en metros.

Por último, el campo de corrientes obtenido con vientos del Noroeste para un fluido no homogéneo se presenta en la Figura 10.24(a). Al comparar dicha distribución con la situación sin vientos se observa que ambos campos de corrientes son similares, con un flujo entrante por la zona Norte del río, una descarga por la costa argentina y por la zona central poco profunda, y un ingreso de flujo por el Canal Marítimo. La principal diferencia es el aumento de la intensidad de corriente en todo el río cuando se incluye el viento y un flujo más marcado entrante al río por la zona Norte. Esto significa que los vientos del Noroeste no producen un efecto tan importante sobre la distribución de velocidades como los que generan los otros vientos que se analizaron anteriormente. Sin embargo, los campos de corrientes determinados para un fluido homogéneo sin viento (Figura 10.16(b)) y con viento del Noroeste (Figura 10.24(b)) son diferentes. Los vientos del Noroeste generan un flujo de descarga por la costa argentina y sobre la zona poco profunda del río, y un flujo entrante por el Canal Marítimo y la zona Norte del Río de la Plata. Nuevamente la distribuciones de velocidades con y sin salinidad cuando se incluye el viento son similares. La principal diferencia son las características del flujo entrante por la zona Norte, con mayores intensidades cuando se modelan las componentes baroclínicas del flujo. Esto muestra que las corrientes generadas por la diferencia de densidad, que tienen dirección entrante al río e intensifican el efecto de los vientos del Noroeste en la costa Norte, influyen en la distribución de velocidades en este caso.

10.3.5 - Conclusiones

En función del análisis presentado, se puede afirmar en primer lugar que los vientos tienen una gran influencia sobre las distribuciones de salinidad y de corrientes en el Río de la Plata. La intensidad de las variaciones generadas en ambos campos dependerán de la intensidad y de la duración de los mismos, pero su efecto es inmediato y en muchos casos puede llegar a dominar sobre otros procesos, como ser las corrientes inducidas por densidad.

En segundo lugar se ha observado que cada una de las ocho direcciones de vientos presentan un efecto diferente sobre el campo salino y de corrientes en el Río de la Plata. Sin embargo, algunos efectos son similares y es posible agrupar los diferentes vientos en tres grupos: los vientos del Norte, Noreste y Este por un lado, los vientos del Sur, Sureste y Oeste por otro, y por último los vientos del Sureste y Noroeste.

Los vientos del Norte, Noreste y Este generan un aumento de la salinidad sobre la costa uruguaya debido al flujo entrante que provocan por la zona Norte del río. Por otro lado, en la mayor parte de la costa argentina la salinidad disminuye, debido al flujo de descarga que ocurre en dicha zona. En definitiva el campo salino se desplaza hacia el Oeste por la zona Norte del río y hacia el Sur por la costa argentina. En la zona central del río de baja profundidad también se genera un flujo saliente en dirección Sur que genera un desplazamiento en sentido antihorario del campo salino.

Los vientos del Sur, Suroeste y Oeste generan una disminución de la salinidad sobre la costa uruguaya y un aumento de la misma sobre la costa argentina. El campo salino se desplaza por la costa uruguaya hacia el Este y sobre la costa argentina hacia el Norte. Este comportamiento es generado por el flujo saliente que se observa en este caso por la costa uruguaya y el ingreso de flujo desde el océano en la zona Sur y central del río.

Los vientos del Sureste y Noroeste no presentan una influencia tan clara como en los otros casos, lo que dificulta su caracterización. Los vientos del Noroeste generan el desplazamiento del campo salino hacia el exterior del río en sentido Sureste. Este efecto suave se relaciona con la poca variación que generan estos vientos sobre la distribución de velocidades. Los vientos del Sureste tampoco generan un comportamiento característico en el campo salino y su efecto depende de la duración de los vientos. Para duraciones grandes el campo de corrientes generado muestra una descarga por la costa uruguaya y un ingreso de flujo por la costa argentina que generan un aumento de salinidad en la zona Sur y una disminución de la misma en la zona Norte.

Tesis de Maestría - Junio 2005

Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental - IMFIA

Facultad de Ingeniería - Universidad de la República

Montevideo - Uruguay

CONCLUSION

MODELACION BIDIMENSIONAL

DEL CAMPO SALINO EN EL RIO DE LA PLATA

CONCLUSION

Estudios anteriores realizados en el IMFIA (Guarga et al 1992, CARP 1992, IMFIA 2002 y otros) efectuaban la modelación del flujo en el Río de la Plata considerando un fluido homogéneo en todo el dominio de cálculo. Sin embargo, la variación de la densidad de las aguas del río debido a la confluencia del agua dulce de los tributarios con el agua salada del Océano Atlántico debe ser representada en el modelo y es necesario entonces incluir a la salinidad como variable en la modelación. Aunque la salinidad varía en el plano horizontal y en el plano vertical, como primera aproximación se realizó la modelación bidimensional integrada en vertical del campo salino, con el objeto de representar las variaciones horizontales del mismo. Además de permitir el análisis de la distribución horizontal de salinidad, la introducción de la salinidad como variable de modelación permite modelar las corrientes generadas por los gradientes horizontales de densidad y mejorar de esta forma la representación del campo de corrientes en el Río de la Plata. Con una mejor representación del campo de corrientes es posible mejorar también otras aplicaciones del modelo en las cuales interviene la distribución de velocidades, como ser por ejemplo el transporte de contaminantes y la dinámica de sedimentos en la zona de estudio.

El principal resultado de este trabajo es que luego de la calibración y validación del modelo RMA-10 bidimensional integrado en vertical se ha obtenido una buena representación de la dinámica del campo salino en el Río de la Plata. Considerando el efecto del viento, del caudal fluvial y de la marea, se ha logrado una buena aproximación de los registros de salinidad medidos en la costa uruguaya, la única zona en donde se cuenta con una serie de mediciones de salinidad durante un largo período de tiempo en posiciones relativamente fijas. Aunque se realizaron algunas pruebas con datos dispersos de salinidad tomados en el río, no fue posible acceder a series de mediciones de salinidad en otras zonas del Río de la Plata que sin duda mejorarían la calidad del modelo. La incorporación de nuevos datos de salinidad en otras zonas del dominio de cálculo es un punto importante a tener en cuenta en futuros trabajos sobre la modelación de la salinidad en el Río de la Plata.

Dos aplicaciones del modelo fueron realizadas en este trabajo una vez efectuada la calibración y la verificación del modelo. En primer lugar se estudió la estacionalidad del campo salino, comparando los resultados con distribuciones estacionales del mismo existentes en la bibliografía sobre el tema. En segundo lugar se analizó la influencia sobre el campo salino y de corrientes de cada uno de los forzantes que actúan en el sistema, estudiando también en este caso la importancia de la fuerza baroclínica en relación a otras fuerzas que afectan la dinámica del Río de la Plata.

La variación anual del campo salino puede dividirse en dos períodos, el período cálido y el período frío, siendo el viento el principal responsable de esta estacionalidad que presenta la distribución de salinidades en el Río de la Plata. El período cálido está formado por los meses

comprendidos entre noviembre y marzo, y está caracterizado por vientos medios provenientes del sector Este. El período frío está formado por los meses comprendidos entre junio y setiembre y a diferencia del período cálido no domina ningún viento particular y el valor medio resulta ser un viento muy suave, sin dirección preponderante. Por otro lado el caudal fluvial durante el período cálido es menor al caudal fluvial durante el período frío. Este comportamiento estacional que presentan los forzantes genera diferencias en la distribución horizontal de salinidad de ambas estaciones. En el período frío la salinidad a lo largo de la costa uruguaya es menor que la salinidad durante el período cálido, y sobre la costa argentina la salinidad es mayor durante el período frío que durante el período cálido. Las corrientes residuales muestran un flujo de descarga por las zonas poco profundas del río: por el Sur sobre la costa argentina, por una zona central del río formada por los Bancos de Arquímedes, Inglés y de Rouen, y por la costa Norte sobre la costa uruguaya. Por otro lado se observa un flujo entrante por las zonas más profundas del Canal Oriental sobre la costa Norte y en el Canal Marítimo en la zona Sur del río. En el período cálido las corrientes residuales muestran en cambio una mayor descarga por la costa argentina y una menor descarga por la costa uruguaya respecto al período frío.

Las distribuciones de salinidad para cada estación determinadas con el modelo se compararon con distribuciones de salinidad para los mismos períodos calculadas a partir de un análisis de registros de salinidad en todo el dominio de cálculo realizadas por Guerrero et al (2004). Esta comparación ha mostrado que principalmente en la zona central estuarina del Río de la Plata el modelo representa correctamente los campos medios estacionales. Por otro lado, también se observó a partir de las modelaciones que la salinidad en cada punto costero disminuye a medida que aumenta el caudal fluvial y que aumenta a medida que disminuye el caudal fluvial.

La segunda aplicación del modelo ha mostrado que la descarga fluvial genera un flujo residual entrante al Río de la Plata en las áreas profundas y saliente sobre las áreas poco profundas. En la zona cercana a la costa uruguaya, sobre los bancos de Arquímedes, Inglés y Rouen, y sobre la zona costera argentina se observa una descarga, mientras que en el Canal Oriental y en el Canal Marítimo se observa un ingreso de flujo. Por otro lado, la marea astronómica genera un incremento de las intensidades del flujo saliente sobre la costa uruguaya y una disminución de la intensidad del flujo saliente por la costa argentina. Con relación a la distribución de salinidades en estos casos, la aplicación del modelo ha mostrado que el campo salino es afectado por las variaciones en la topografía del Río de la Plata. Las curvas de isoconcentración de salinidad muestran una advección hacia aguas arriba del río en las áreas profundas y una advección hacia aguas abajo en las áreas poco profundas.

La influencia de los vientos sobre la distribución de salinidad horizontal y sobre la distribución de corrientes en el Río de la Plata se divide en función de la dirección de los mismos. Los vientos provenientes del Norte, Noreste y Este generan un flujo de agua salada entrante al río a lo largo de la costa uruguaya, lo que aumenta los valores de salinidad sobre la misma, y un flujo saliente por

la costa argentina, lo que genera una disminución de la salinidad en dicha costa. En cambio los vientos del Sur, Suroeste y Oeste aumentan el flujo de descarga por la costa uruguaya, disminuyendo la salinidad, y generan un flujo entrante por la costa argentina aumentando la salinidad. Por último los vientos del Sureste y Noroeste no generan un efecto claro sobre las distribuciones de salinidad y de corrientes, aunque se puede observar un efecto de los vientos del Sureste similar al generado por los vientos del sector Sur, Suroeste y Oeste.

A lo largo de este estudio se han obtenido resultados satisfactorios aunque en algunos casos el modelo no es capaz de reproducir las variaciones de salinidad registradas. Aunque esta primera aproximación constituye una herramienta importante para entender y analizar aspectos de la dinámica del área de estudio, mayores esfuerzos son necesarios para mejorar las simulaciones del campo salino. La siguiente etapa es la implementación y calibración del modelo en su modo tridimensional, de forma de representar la variación vertical del campo salino y su efecto sobre el campo de corrientes. Además, la estratificación vertical por densidad afecta a otros procesos como ser la dinámica de sedimentos, y determinados procesos biológicos, por lo que es muy importante representar dicha estratificación vertical en la modelación del Río de la Plata. Actualmente en una nueva etapa de la modelación del Río de la Plata se está trabajando en esta línea de actuación.

Tesis de Maestría - Junio 2005

Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental - IMFIA

Facultad de Ingeniería - Universidad de la República

Montevideo - Uruguay

BIBLIOGRAFIA

MODELACION BIDIMENSIONAL

DEL CAMPO SALINO EN EL RIO DE LA PLATA

BIBLIOGRAFIA

Acha M. y Mianzan H., 2003. El estuario del Plata: donde el río se encuentra con el mar. *Ciencia Hoy*, vol 13, nº 73, pp. 10-20.

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.

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

Dyer K. R., 1997. *Estuaries. A physical introduction*. 2nd edition. John Wiley & Sons. 192 pp.

ECOPLATA. 1997. El Río de la Plata. Una revisión ambiental. Un Informe de Antecedentes del Proyecto Ecoplata. Universidad de Dalhausie, Halifax, Nova Scotia, Canadá. 282 pp.

ECOPLATA, 2001. El Río de la Plata. Investigación para la Gestión del Ambiente, los Recursos Pesqueros y la Pesquería en el Frente Salino. Programa Ecoplata, Montevideo, Uruguay. 313 pp.

Elliott A. J., 1978. Observations of the meteorologically induced circulation in the Potomac estuary. *Estuarine, Coastal and Marine Science* 6, pp. 285-300.

Framiñan M., Brown O., 1996. Study of the Rio de la Plata turbidity front, Part I: spatial and temporal distribution. *Continental Shelf Research*, Vol. 16 (10), pp. 727-742.

Geyer W. R., 1997. Influence of Wind on Dynamics and flushing of Shallow Estuaries. *Estuarine, coastal, and Shelf Science*, 44, pp. 713-722.

Guarga R., Kaplan E., Vinzón S., Rodríguez H., Piedra-Cueva I., 1992. Aplicación de un modelo de corrientes en diferencias finitas al Río de la Plata. *Revista Latinoamericana de Hidráulica*. No 4, pp. 93-115, San Pablo, Brasil.

Guerrero R.A., Acha M. E., Framiñan M. E., Lasta C., 1997. Physical Oceanography of the Rio de la Plata Estuary. *Continental Shelf Research*. Vol. 17 (7), pp. 727-742.

Guerrero, R. A., Piola, A., Osiroff, A. P., Molinari, G. y Jauregui, S. 2004 b. Análisis de datos oceanográficos históricos. Informe Final. Informe FREPLATA-INIDEP-SHN A5.20, 92 pp.

IMFIA 2002. Estudio técnico de la alternativa de descarga en Punta Lobos de las unidades funcionales Pantanoso, Miguelete y Cerro-Casabó del sistema de saneamiento de Montevideo. Informe final.

Jaime, P., Menéndez, A. N. 2002. Análisis del régimen hidrológico de los ríos Paraná y Uruguay. Informe FREPLATA-INA A4.1. Informe INA LHA 05-216-02. 140 pp.

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.

Kowalik Z., Murty T. S., 1993. Numerical modelling of ocean dynamics. Advanced series of ocean engineering, volume 5. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

Kurup G. R., Hamilton D. P. and Patterson J. C., 1998. Modelling the effect of seasonal flow variations on the position of salt wedge in a microtidal estuary. *Estuarine, coastal, and Shelf Science*, 47 pp. 191-208.

Officer C. B., 1992. Physics of estuarine circulation. *Estuaries and Enclosed Seas. Ecosystems of the World*, ed. B. H. Ketchum, Vol 26, pp. 15-41. Elsevier, Oxford.

Piola A.R., Guerrero R.A., Osiroff A.P. y Molinari G., 2003. Climatología de frentes y estratificación del Río de la Plata. 5º Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar, Mar del Plata, Argentina.

Proyecto Freplata (2004): Patrones de circulación en el Río de la Plata y su área de influencia. Análisis diagnóstico transfronterizo. Silvana Giordano y Carlos Lasta. Unidad ejecutora Proyecto Freplata.

Sepúlveda H., Valle-Levinson A., Framiñan M., 2003. Observations of subtidal and tidal flow in the Río de la Plata Estuary. *Continental Shelf Research*. Vol 24, pp. 509 –525.

Simionato, C.; Nuñez, M.; Engel, M., 2001: The salinity front of the Rio de la Plata - a numerical case study for winter and summer conditions. *Geophysical Research Letters*, Vol 28, Nº13, pp. 2641-2644.

Stewart Robert H., 2003. Introduction To Physical Oceanography. Department of Oceanography. Texas A & M University.

Uncles R. J., 2002. Estuarine Physical Processes Research: some recent studies and progress. *Estuarine, coastal and shelf science*, vol 55, pp 829-856.

Urien, M. A., 1972: Rio de la Plata Estuary Environments. Geological Society of America, Memoir 133, pp. 213-234.

Warner, J. C., 2000. Barotropic and Baroclinic Convergence Zones in Tidal Channels. Tesis of doctorat. University of California. Davis. pp. 333.

Weisberg R. H., 1976. The nontidal flow in the Providence River of Narragansett Bay: a stochastic approach to estuarine circulation. *Journal of Physical Oceanography*, 6, pp. 721-734.

Tesis de Maestría - Junio 2005

Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental - IMFIA

Facultad de Ingeniería - Universidad de la República

Montevideo - Uruguay

ANEXOS

MODELACION BIDIMENSIONAL

DEL CAMPO SALINO EN EL RIO DE LA PLATA

Anexo 1

DERIVADAS UTILIZADAS EN EL METODO DE NEWTON RAPHSON

En el Capítulo 5 se presentó una descripción de la formulación en elementos finitos que se aplica en el modelo numérico RMA-10 para resolver el sistema de ecuaciones. El método de convergencia que utiliza el modelo es el método de Newton Raphson. En dicha formulación intervienen las derivadas parciales de los vectores residuales correspondientes a las ecuaciones del sistema, respecto a los valores en los nodos de cada variable dependiente. En este anexo se presentan las fórmulas de estas derivadas para los elementos tridimensionales y para los elementos bidimensionales integrados en vertical.

1 - Elementos tridimensionales

Las derivadas del vector residual $\mathbf{f}_x$ (ecuación 5.8), que representa el error residual en la ecuación de cantidad de movimiento según x de cada elemento, están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_x}{\partial u} = & \int_V \left(N^T \left[\rho \left(h \frac{\alpha}{\Delta t} + h \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} (b-a) T_x \right) \right] N + N^T \left[\rho h u - \varepsilon_{xx} \frac{h}{(b-a)} \frac{\partial a}{\partial x} \right] N_x \right) dV + \\ & \int_V \left(N^T \left[\rho h v - \varepsilon_{xy} \frac{h}{(b-a)} \frac{\partial a}{\partial y} \right] N_y + N^T \left[\rho (b-a) (w - u T_x - v T_y) - (z-a) \frac{\partial h}{\partial t} \right] N_z \right) dV + \\ & \int_V \left(N_x^T h \varepsilon_{xx} N_x + N_y^T h \varepsilon_{xy} N_y + N_z^T (b-a) \varepsilon_{xz} N_z \right) dV \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial v} = \int_V N^T \left[\rho \left(h \frac{\partial u}{\partial y} - h \Omega - \frac{\partial u}{\partial z} (b-a) T_y \right) \right] N dV \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_x}{\partial h} = & \int_V N^T \left[\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial z} \left(\frac{z-b}{(b-a)} \left(u \frac{\partial a}{\partial x} + v \frac{\partial a}{\partial y} \right) - (z-a) \frac{\alpha}{\Delta t} \right) - \Omega v \right) \right] M dV + \\ & \int_V N^T \left[\rho_s g \frac{\partial a}{\partial x} - g h \frac{\partial \rho_s}{\partial x} + g_x - \varepsilon_{xx} \frac{1}{(b-a)} \frac{\partial a}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} - \varepsilon_{xy} \frac{1}{(b-a)} \frac{\partial a}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} \right] M dV + \\ & \int_V \left(-N^T \rho \frac{\partial u}{\partial z} (z-a) u M_x - N^T \rho \frac{\partial u}{\partial z} (z-a) v M_y + N_x^T \left(\varepsilon_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} - \rho_s g h \right) M \right) dV + \\ & \int_V N_y^T \varepsilon_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} M dV \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial s} = \int_V N^T \frac{\partial \rho}{\partial s} \left(h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \left((b-a)(w - uT_x - vT_y) - (z-a) \frac{\partial h}{\partial t} \right) \right) NdV + \int_V N^T \frac{\partial (g_x h)}{\partial s} NdV \quad (4)$$

Las derivadas del vector residual $\mathbf{f}_y$ (ecuación 5.9), que representa el error residual en la ecuación de cantidad de movimiento según y de cada elemento, están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial f_y}{\partial u} = \int_V N^T \left[\rho \left(h \frac{\partial v}{\partial x} + h\Omega - \frac{\partial v}{\partial z} (b-a)T_x \right) \right] NdV \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_y}{\partial v} = & \int_V \left(N^T \left[\rho \left(h \frac{\alpha}{\Delta t} + h \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} (b-a)T_y \right) \right] N + N^T \left[\rho hv - \varepsilon_{yy} \frac{h}{(b-a)} \frac{\partial a}{\partial y} \right] N_y \right) dV + \\ & \int_V \left(N^T \left[\rho hu - \varepsilon_{yx} \frac{h}{(b-a)} \frac{\partial a}{\partial x} \right] N_x + N^T \left[\rho (b-a)(w - uT_x - vT_y) - (z-a) \frac{\partial h}{\partial t} \right] N_z \right) dV + \\ & \int_V \left(N_y^T h \varepsilon_{yy} N_y + N_x^T h \varepsilon_{yx} N_x + N_z^T (b-a) \varepsilon_{yz} N_z \right) dV \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_y}{\partial h} = & \int_V N^T \left[\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \left(\frac{(z-b)}{(b-a)} \left(u \frac{\partial a}{\partial x} + v \frac{\partial a}{\partial y} \right) - (z-a) \frac{\alpha}{\Delta t} \right) + \Omega u \right) \right] MdV + \\ & \int_V N^T \left[\rho_s g \frac{\partial a}{\partial y} - gh \frac{\partial \rho_s}{\partial y} + g_y - \varepsilon_{yy} \frac{1}{(b-a)} \frac{\partial a}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial y} - \varepsilon_{yx} \frac{1}{(b-a)} \frac{\partial a}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} \right] MdV + \\ & \int_V \left(-N^T \rho \frac{\partial v}{\partial z} (z-a) v M_y - N^T \rho \frac{\partial v}{\partial z} (z-a) u M_x + N_y^T \left(\varepsilon_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} - \rho_s gh \right) M \right) dV + \\ & \int_V N_x^T \varepsilon_{yx} \frac{\partial v}{\partial x} MdV \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{\partial f_y}{\partial s} = \int_V N^T \frac{\partial \rho}{\partial s} \left(h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \left((b-a)(w - uT_x - vT_y) - (z-a) \frac{\partial h}{\partial t} \right) \right) NdV + \int_V N^T \frac{\partial (g_y h)}{\partial s} NdV \quad (8)$$

Las derivadas del vector residual $\mathbf{f}_c$ (ecuación 5.10), que representa el error residual en la ecuación de continuidad de cada elemento, están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial f_c}{\partial u} = \int_V \left(M^T \frac{h}{(b-a)} N_x - M^T T_x N_z \right) dV \quad (9)$$

$$\frac{\partial f_c}{\partial v} = \int_V \left(M^T \frac{h}{(b-a)} N_y - M^T T_y N_z \right) dV \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_c}{\partial h} = & \int_V \left(M^T \left(\frac{1}{(b-a)} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{(b-z)}{(b-a)} \left(\frac{\partial a}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial a}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) M + M^T \frac{(a-z)}{(b-a)} \frac{\partial u}{\partial z} M_x \right) dV + \\ & \int_V M^T \frac{(a-z)}{(b-a)} \frac{\partial v}{\partial z} M_y dV + \int_A \left(M_h^T \frac{\alpha}{\Delta t} M_h + M_h^T u_s (M_h)_x + M_h^T v_s (M_h)_y \right) dA \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{\partial f_c}{\partial s} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial f_c}{\partial u_s} = \int_A M_h^T \frac{\partial(a+h)}{\partial x} N dA \quad (13)$$

$$\frac{\partial f_c}{\partial v_s} = \int_A M_h^T \frac{\partial(a+h)}{\partial y} N dA \quad (14)$$

$$\frac{\partial f_c}{\partial u_b} = - \int_A M_h^T \frac{\partial a}{\partial x} N dA \quad (15)$$

$$\frac{\partial f_c}{\partial v_b} = - \int_A M_h^T \frac{\partial a}{\partial y} N dA \quad (16)$$

Las derivadas del vector residual $\mathbf{f}_s$ (ecuación 5.11), que representa el error residual en la ecuación de advección difusión de salinidad de cada elemento, están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial f_s}{\partial u} = \int_V N^T \left(h \frac{\partial s}{\partial x} - \frac{\partial s}{\partial z} (b-a) T_x \right) N dV \quad (17)$$

$$\frac{\partial f_s}{\partial v} = \int_V N^T \left(h \frac{\partial s}{\partial y} - \frac{\partial s}{\partial z} (b-a) T_y \right) N dV \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_s}{\partial h} = & \int_V N^T \left(\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} - \frac{\partial s}{\partial z} \left((b-a) \left(u \frac{\partial T_x}{\partial h} + v \frac{\partial T_y}{\partial h} \right) + (z-a) \frac{\alpha}{\Delta t} \right) - D_x \frac{\partial a}{\partial x} \frac{1}{(b-a)} \frac{\partial s}{\partial x} \right) M dV + \\ & \int_V \left(N^T \left(-D_y \frac{\partial a}{\partial y} \frac{1}{(b-a)} \frac{\partial s}{\partial y} - \theta_s \right) M - N^T u (z-a) \frac{\partial s}{\partial z} M_x - N^T v (z-a) \frac{\partial s}{\partial z} M_y \right) dV + \\ & \int_V \left(N_x^T D_x \frac{\partial s}{\partial x} M + N_y^T D_y \frac{\partial s}{\partial y} M - N_z^T D_z (b-a) M \right) dV \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_s}{\partial s} = & \int_V \left(N^T h \frac{\alpha}{\Delta t} N + N^T \left(hu - D_x \frac{\partial a}{\partial x} \frac{h}{(b-a)} \right) N_x + N^T \left(hv - D_y \frac{\partial a}{\partial y} \frac{h}{(b-a)} \right) N_y \right) dV + \\ & \int_V \left(N^T \left((b-a)(w - uT_x - vT_y) - (z-a) \frac{\partial h}{\partial t} \right) N_z + N_x^T h D_x N_x + N_y^T h D_y N_y + N_z^T (b-a) D_z N_z \right) dV \end{aligned} \quad (20)$$

2 - Elementos bidimensionales integrados en vertical

Las derivadas del vector residual $\mathbf{f}_x$ (ecuación 5.12), que representa el error residual en la ecuación de cantidad de movimiento según x de cada elemento, están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_x}{\partial u} = & \int_{Ah} \left(N^T \rho(b-a) \left(h \frac{\alpha}{\Delta t} + h \frac{\partial u}{\partial x} + q_s + \frac{g}{C^2|V|} (2u^2 + v^2) \right) N + N^T \left[\rho(b-a)hu - \varepsilon_{xx} h \frac{\partial a}{\partial x} \right] N_x \right) dA + \\ & \int_{Ah} \left(N^T \left[\rho(b-a)hv - \varepsilon_{xy} h \frac{\partial a}{\partial y} \right] N_y + N_x^T \varepsilon_{xx} (b-a)h N_x + N_y^T h \varepsilon_{xy} (b-a) N_y \right) dA \end{aligned} \quad (21)$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial v} = \int_{Ah} N^T \left[\rho(b-a) \left(h \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{g}{C^2|V|} uv - \Omega h \right) \right] N dA \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_x}{\partial h} = & \int_{Ah} N^T \left[\rho(b-a) \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \Omega v + g \frac{\partial a}{\partial x} \right) - \varepsilon_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial a}{\partial x} - \varepsilon_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial a}{\partial y} + \rho g h \frac{\partial a}{\partial x} \right] N dA + \\ & \int_{Ah} \left(N_x^T \left(\varepsilon_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} (b-a) - \rho g (b-a)h \right) M + N_y^T \varepsilon_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} (b-a) M \right) dA \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_x}{\partial s} = & \int_{Ah} N^T \frac{\partial \rho}{\partial s} (b-a) \left(h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} + gh \frac{\partial a}{\partial x} \left(1 + \frac{h}{2(b-a)} \right) \right) N dA - \\ & \int_{Ah} N^T \frac{\partial \rho}{\partial s} (b-a) g \frac{h^2}{2} N_x dA \end{aligned} \quad (24)$$

Las derivadas del vector residual $\mathbf{f}_y$ (ecuación 5.13), que representa el error residual en la ecuación de cantidad de movimiento según y de cada elemento, están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial f_y}{\partial u} = \int_{Ah} N^T \left[\rho(b-a) \left(h \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{g}{C^2|V|} uv + \Omega h \right) \right] N dA \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_y}{\partial v} = & \int_{Ah} \left(N^T \rho(b-a) \left(h \frac{\alpha}{\Delta t} + h \frac{\partial v}{\partial y} + q_s + \frac{g}{C^2 |V|} (2v^2 + u^2) \right) N + N^T \left[\rho(b-a) h v - \varepsilon_{yy} h \frac{\partial a}{\partial y} \right] N_y \right) dA + \\ & \int_{Ah} \left(N^T \left[\rho(b-a) h u - \varepsilon_{yx} h \frac{\partial a}{\partial x} \right] N_x + N_y^T \varepsilon_{yy} (b-a) h N_y + N_x^T h \varepsilon_{yx} (b-a) N_x \right) dA \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_y}{\partial h} = & \int_{Ah} N^T \left[\rho(b-a) \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \Omega u + g \frac{\partial a}{\partial y} \right) - \varepsilon_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial a}{\partial y} - \varepsilon_{yx} \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial a}{\partial x} + \rho g h \frac{\partial a}{\partial y} \right] N dA + \\ & \int_{Ah} \left(N_y^T \left(\varepsilon_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} (b-a) - \rho g (b-a) h \right) M + N_x^T \varepsilon_{yx} \frac{\partial v}{\partial x} (b-a) M \right) dA \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_y}{\partial s} = & \int_{Ah} N^T \frac{\partial \rho}{\partial s} (b-a) \left(h \frac{\partial v}{\partial t} + h u \frac{\partial v}{\partial x} + h v \frac{\partial v}{\partial y} + g h \frac{\partial a}{\partial y} \left(1 + \frac{h}{2(b-a)} \right) \right) N dA - \\ & \int_{Ah} N^T \frac{\partial \rho}{\partial s} (b-a) g \frac{h^2}{2} N_y dA \end{aligned} \quad (28)$$

Las derivadas del vector residual $\mathbf{f}_c$ (ecuación 5.14), que representa el error residual en la ecuación de advección difusión de salinidad de cada elemento, están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial f_c}{\partial u} = \int_{Ah} \left(M^T \frac{\partial h}{\partial x} N + M^T h N_x \right) dA \quad (29)$$

$$\frac{\partial f_c}{\partial v} = \int_{Ah} \left(M^T \frac{\partial h}{\partial y} N + M^T h N_y \right) dA \quad (30)$$

$$\frac{\partial f_c}{\partial h} = \int_{Ah} \left(M^T \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\alpha}{\Delta t} \right) M + M^T u M_x + M^T v M_y \right) dA \quad (31)$$

$$\frac{\partial f_c}{\partial s} = 0 \quad (32)$$

Las derivadas del vector residual $\mathbf{f}_s$ (ecuación 5.15), que representa el error residual en la ecuación de advección difusión de salinidad de cada elemento, están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial f_s}{\partial u} = \int_{Ah} N^T h (b-a) \frac{\partial s}{\partial x} N dA \quad (33)$$

$$\frac{\partial f_s}{\partial v} = \int_{Ah} N^T h(b-a) \frac{\partial s}{\partial y} N dA \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_s}{\partial h} = & \int_{Ah} N^T \left((b-a) \left(\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} \right) - D_x \frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial a}{\partial x} - D_y \frac{\partial s}{\partial y} \frac{\partial a}{\partial y} - (b-a)(\theta_s + q_s(s_s - s)) \right) M dA + \\ & \int_{Ah} \left(N_x^T D_x (b-a) \frac{\partial s}{\partial x} M + N_y^T D_y (b-a) \frac{\partial s}{\partial y} M \right) dA \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_s}{\partial s} = & \int_{Ah} \left(N^T h(b-a) \frac{\alpha}{\Delta t} N + N^T \left(h(b-a)u - D_x h \frac{\partial a}{\partial x} \right) N_x + N^T \left(h(b-a)v - D_y h \frac{\partial a}{\partial y} \right) N_y \right) dA + \\ & \int_{Ah} \left(N_x^T D_x h(b-a) N_x + N_y^T D_y h(b-a) N_y \right) dA \end{aligned} \quad (36)$$

Anexo 2

MODELACION DEL CAMPO SALINO CON UNA MALLA DE ALTA RESOLUCION

En el Capítulo 7 se presentó la calibración del modelo numérico RMA-10 utilizando la malla de baja resolución definida en el Capítulo 6. A partir de los resultados obtenidos en esa etapa, se realizó posteriormente una recalibración del modelo utilizando una malla de mayor resolución. En este anexo se presenta una descripción de esta malla y los resultados obtenidos en la recalibración.

1 - Malla de cálculo

La malla de alta resolución utilizada en esta etapa se presenta en la Figura 1.

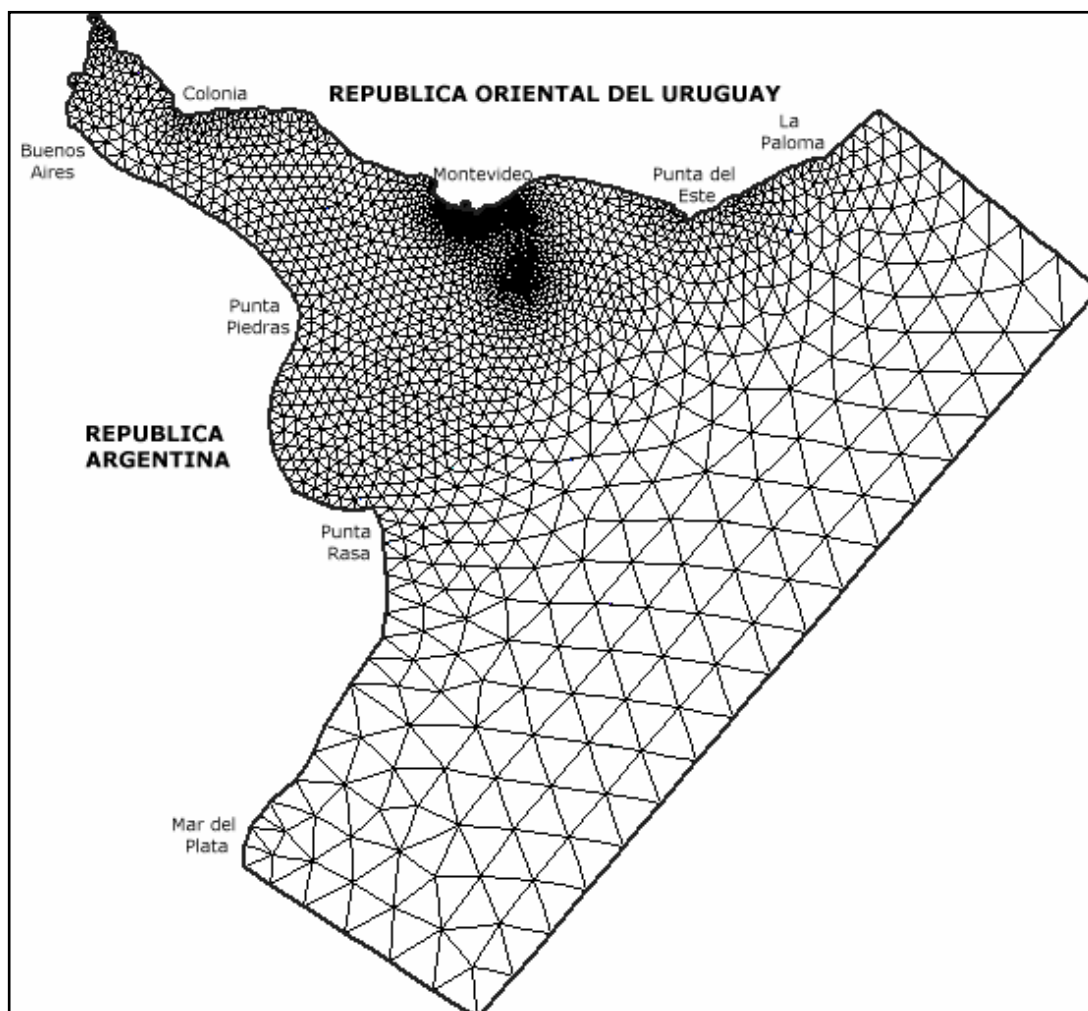


Figura 1: Malla en elementos finitos de alta resolución del Río de la Plata.

Esta malla de alta resolución está formada por elementos de menor tamaño que los utilizados en la malla de baja resolución. La misma fue definida durante trabajos anteriores

realizados en el IMFIA y principalmente tiene un aumento del nivel de detalle en la zona cercana a Montevideo, donde los elementos tienen 500 m de longitud.

Se emplearon en esta malla elementos triangulares de seis nodos para obtener una mayor estructuración de la malla. De esta forma, además de mejorar la descripción del dominio espacial, se obtiene una mayor precisión en la resolución del campo de velocidades y del transporte, aunque a costo de incrementar sensiblemente el número de elementos y nodos de la malla, lo que se refleja en el tiempo de cálculo computacional. Esta malla está formada por 4.870 elementos y 10.156 nodos. En la Figura 2 se muestra un detalle de la zona estuarina del Río de la Plata donde se aprecian los elementos de menor tamaño.

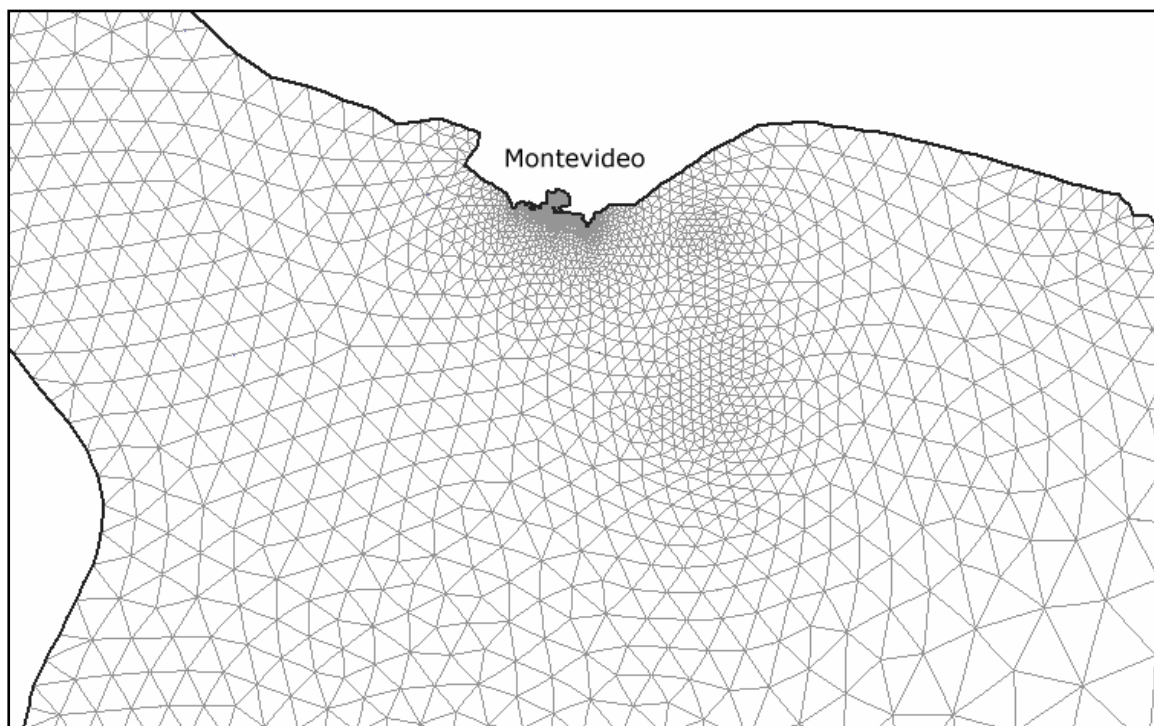


Figura 2: Detalle en la zona cercana a Montevideo de la malla de alta resolución.

2 - Calibración del modelo

2.1 - Consideraciones generales

El procedimiento realizado en la recalibración del modelo utilizando la malla de alta resolución fue el mismo que se realizó en la etapa de calibración del modelo presentada en el Capítulo 7. Los períodos de calibración fueron los definidos anteriormente, febrero de 1998 y marzo del 2000. Cada mes se modeló con el período previo mínimo de modelación de tres meses definido en el Capítulo 6. De esta forma la recalibración se realizó modelando los períodos noviembre 1997 – febrero 1998 y diciembre 1999 – marzo 2000. Los forzantes ingresados al modelo en cada uno de estos meses fueron presentados también en el Capítulo 7. Nuevamente el proceso de calibración se realizó considerando los vientos medidos en las estaciones de Punta Brava y Pontón Recalada, correspondientes a cada período de simulación.

Inicialmente las simulaciones se realizaron con los parámetros de calibración obtenidos luego de calibrar el modelo con la malla de baja resolución y luego durante el proceso de recalibración se fueron ajustando para obtener finalmente los parámetros correspondientes a la modelación con la malla de alta resolución. Este proceso de ajuste de parámetros se realizó a partir de la comparación de valores modelados y medidos de salinidad. Los puntos de control definidos sobre la costa de Montevideo en la malla de alta resolución, representativos de los puntos de medición de salinidad Escollera Sarandí, playa Ramírez, Punta Brava, playa Pocitos y playa Verde, se muestran en la Figura 3.

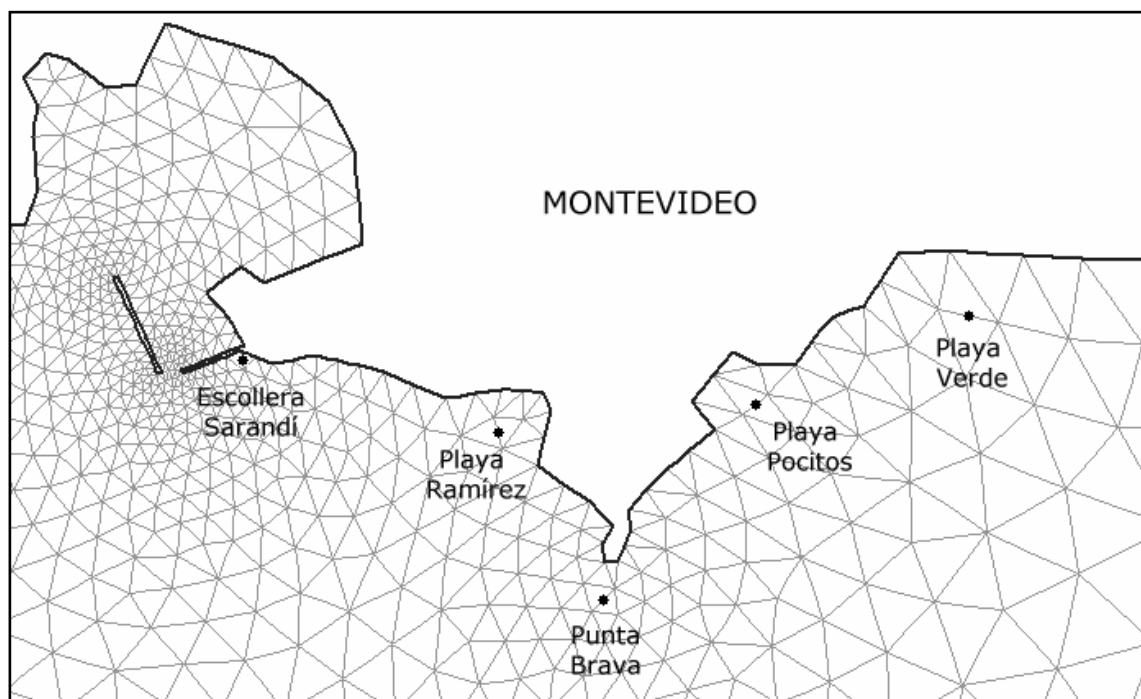


Figura 3: Ubicación de los puntos de control de salinidad en la malla de alta resolución.

2.2 - Resultados obtenidos – Vientos Punta Brava

En este punto se muestran los resultados obtenidos luego del proceso de recalibración del modelo utilizando los vientos registrados en la estación de Punta Brava. En este caso los parámetros de ajuste obtenidos fueron $\psi = 11 \times 10^{-06}$ y $\beta = 0,6 \text{ m}^2/\text{s}$. Si se comparan estos parámetros con los obtenidos para la malla de baja resolución y vientos de Punta Brava ($\psi = 10 \times 10^{-06}$ y $\beta = 0,4 \text{ m}^2/\text{s}$), se observa que debido al menor tamaño de los elementos para representar el campo salino fue necesario aumentar la difusión de la salinidad y la tensión de corte del viento sobre la superficie de agua. El ajuste del campo salino obtenido para febrero de 1998 utilizando la malla de alta resolución y los vientos de Punta Brava se presenta en la Figura 4.

A partir de la comparación entre los valores de salinidad medidos y modelados para las cinco estaciones de control consideradas, que se muestra en la Figura 4, se observa que en general los valores registrados son reproducidos aceptablemente por el modelo. El aumento de salinidad registrado durante los primeros días del mes es reproducido por el modelo en todos los puntos de

control salvo en playa Pocitos. Por otro lado, el aumento de salinidad producido entre los días 14 y 18 también es reproducido aceptablemente en todos los puntos, aunque en playa Pocitos y playa Verde se obtuvieron diferencias de hasta 5 ppm. Los días 19 y 20 en la mayoría de las estaciones el modelo calcula salinidades mucho mayores a las registradas, principalmente en la Escollera Sarandí y en playa Ramírez. Por último, el modelo reproduce aceptablemente la salinidad registrada a partir del día 21 y hasta el final del mes en todos los puntos de control salvo en playa Verde, donde calcula salinidades menores a las registradas.

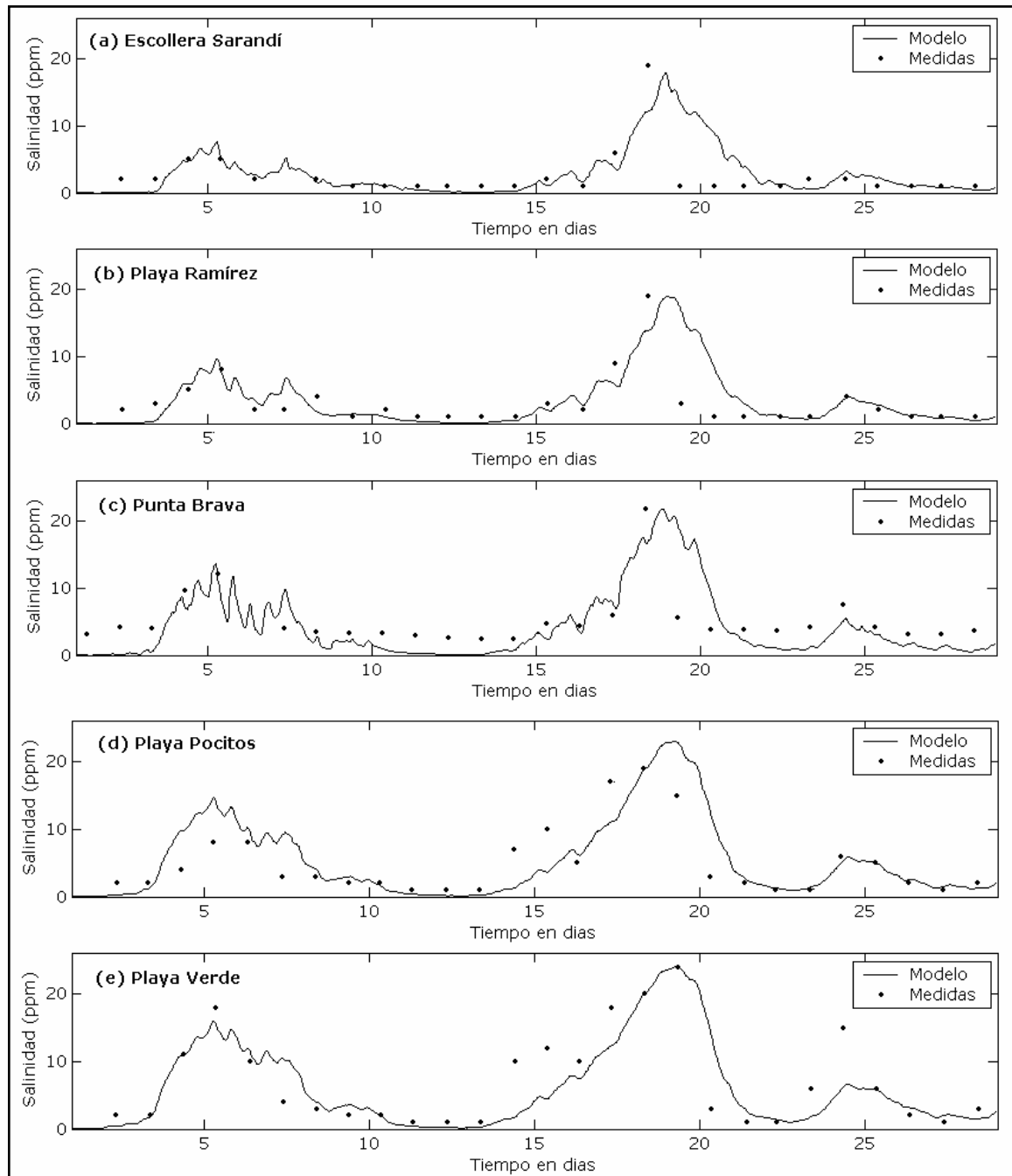


Figura 4: Comparación entre los valores de salinidad medidos y modelados con vientos de Punta Brava en (a) Escollera Sarandí, (b) playa Ramírez, (c) Punta Brava, (d) playa Pocitos y (e) playa Verde, durante febrero de 1998.

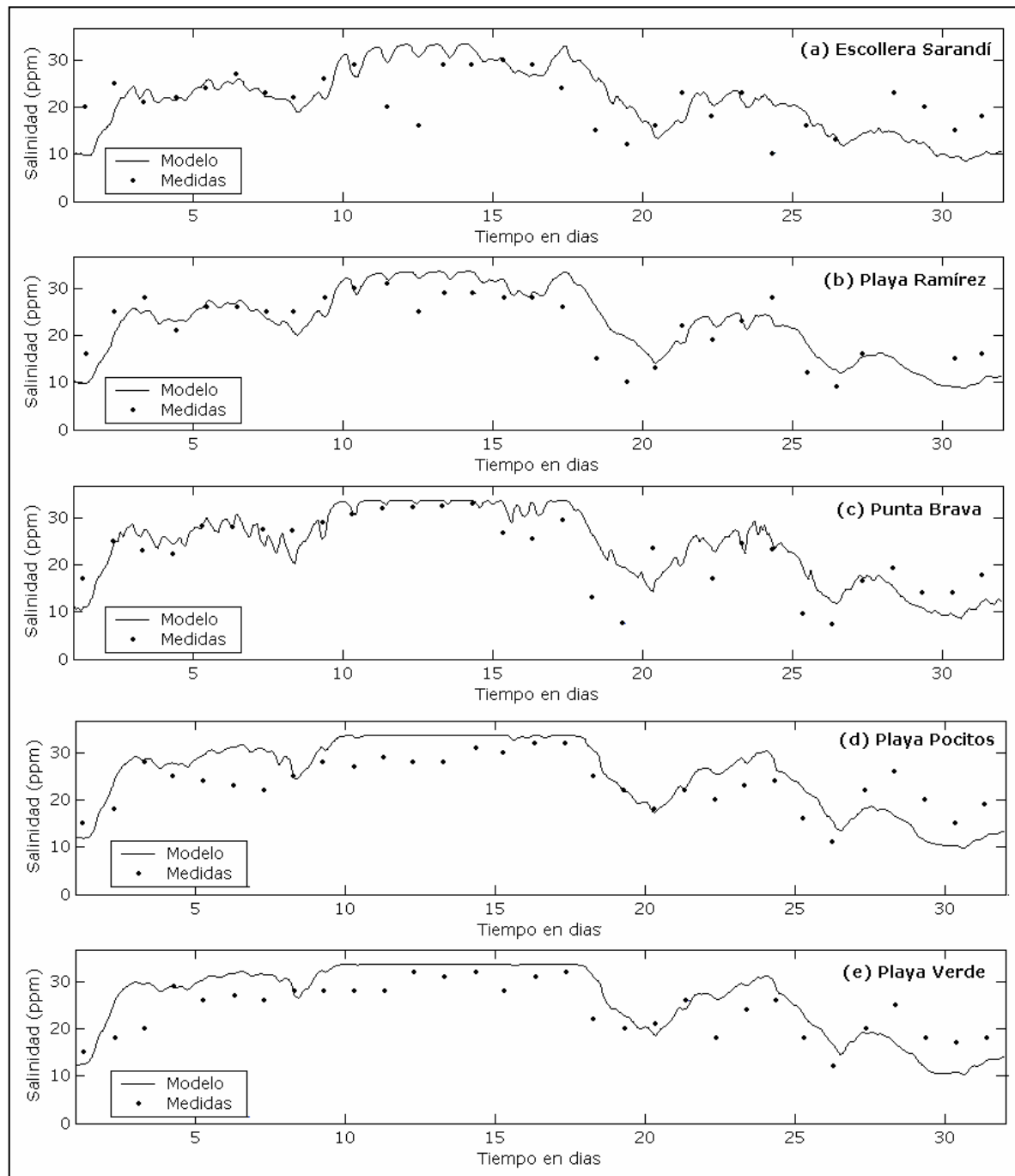


Figura 5: Comparación entre los valores de salinidad medidos y modelados con vientos de Punta Brava en (a) Escollera Sarandí, (b) playa Ramírez, (c) Punta Brava, (d) playa Pocitos y (e) playa Verde, durante marzo del 2000.

En la Figura 5 se observa la comparación entre los valores de salinidad medidos y modelados utilizando los vientos de Punta Brava y la malla de alta resolución para el segundo período de calibración utilizado, el mes de marzo del 2000. Como se observa en la misma, las variaciones de salinidad calculadas con el modelo en los cinco puntos de control representan correctamente las variaciones de salinidad que muestran las mediciones de salinidad. Hasta el día 10 el modelo reproduce casi perfectamente los valores de salinidad medidos en la Escollera Sarandí, en la playa Ramírez y en Punta Brava. En los otros dos puntos de control en cambio durante esos días existen

diferencias entre el modelo y los datos de hasta 10 ppm. Entre el día 10 y el día 17 la mayoría de los valores medidos de salinidad fueron mayores a los 25 ppm y los valores calculados por el modelo esos días en general también superan dicho valor. Por lo tanto, en general se representa correctamente con el modelo la variación de salinidad en este período en la mayoría de los puntos de control, aunque en algunos casos existen diferencias de más de 5 ppm. En particular en la Escollera Sarandí los días 11 y 12 las diferencias son significativas, mayores a los 15 ppm. Entre los días 18 y 27 la salinidad medida muestra un período de gran variación, la cual a veces es correctamente reproducida por el modelo y en otros casos no. Por ejemplo en playa Pocitos y en playa Verde la salinidad modelada reproduce aceptablemente las variaciones de salinidad con algunas diferencias puntuales de más de 5 ppm. En Punta Brava en cambio el modelo representa la variación general de salinidad pero las diferencias entre los valores medidos y modelados son grandes en casi todo este período. Por otro lado en la Escollera Sarandí y en playa Ramírez el modelo reproduce la variación de salinidad pero entre los días 18 y 20 la salinidad modelada es considerablemente mayor a la registrada. Por último, al final del mes el modelo reproduce en todas las estaciones de control valores de salinidad menores a los medidos, con diferencias del entorno de 10 ppm.

Punto Medición	Salinidad media mensual		Salinidad media mensual	
	Febrero 1998		Marzo 2000	
	Medidas	Modelo	Medidas	Modelo
Escollera Sarandí	2,5	2,9	21,3	21,8
Playa Ramírez	3,0	3,4	22,2	22,8
Punta Brava	5,0	4,2	22,7	24,2
Playa Pocitos	4,9	5,4	23,5	25,7
Playa Verde	7,0	6,1	24,0	26,4

Tabla 1: Valores medios de salinidad registrados y obtenidos con el modelo con vientos de Punta Brava para cada punto de control durante los dos períodos de calibración.

En la Tabla 1 se muestran los valores de salinidad media mensual correspondientes a los dos períodos utilizados en la calibración, febrero de 1998 y marzo del 2000, obtenidos a partir de las mediciones diarias de salinidad y de los valores de salinidad calculados con el modelo. Se observa en la misma que durante febrero de 1998 los valores medios calculados con los valores del modelo son muy similares a los obtenidos con los datos, siendo las diferencias mayores 0,8 y 0,9 ppm en Punta Brava y playa Verde, respectivamente. En marzo del 2000, aunque las mayores diferencias son un poco más grandes, 2,2 ppm en Playa Pocitos y 2,4 ppm en Playa Verde, las salinidades medias mensuales obtenidas con el modelo son muy similares a lo que indican los valores reales.

2.3 - Resultados obtenidos – Vientos Pontón Recalada

En este punto se muestran los resultados obtenidos luego del proceso de recalibración del modelo para la malla de alta resolución utilizando los vientos registrados en la estación de Pontón Recalada. Los parámetros de ajuste obtenidos para este caso fueron $\psi = 8 \times 10^{-06}$ y $\beta = 0,4 \text{ m}^2/\text{s}$,

siendo los parámetros anteriormente obtenidos para la malla de baja resolución y vientos de Pontón Recalada $\psi = 8 \times 10^{-06}$ y $\beta = 0,2 \text{ m}^2/\text{s}$. En este caso solamente fue necesario modificar el factor del modelo que interviene en la difusión de sal para representar el campo salino.

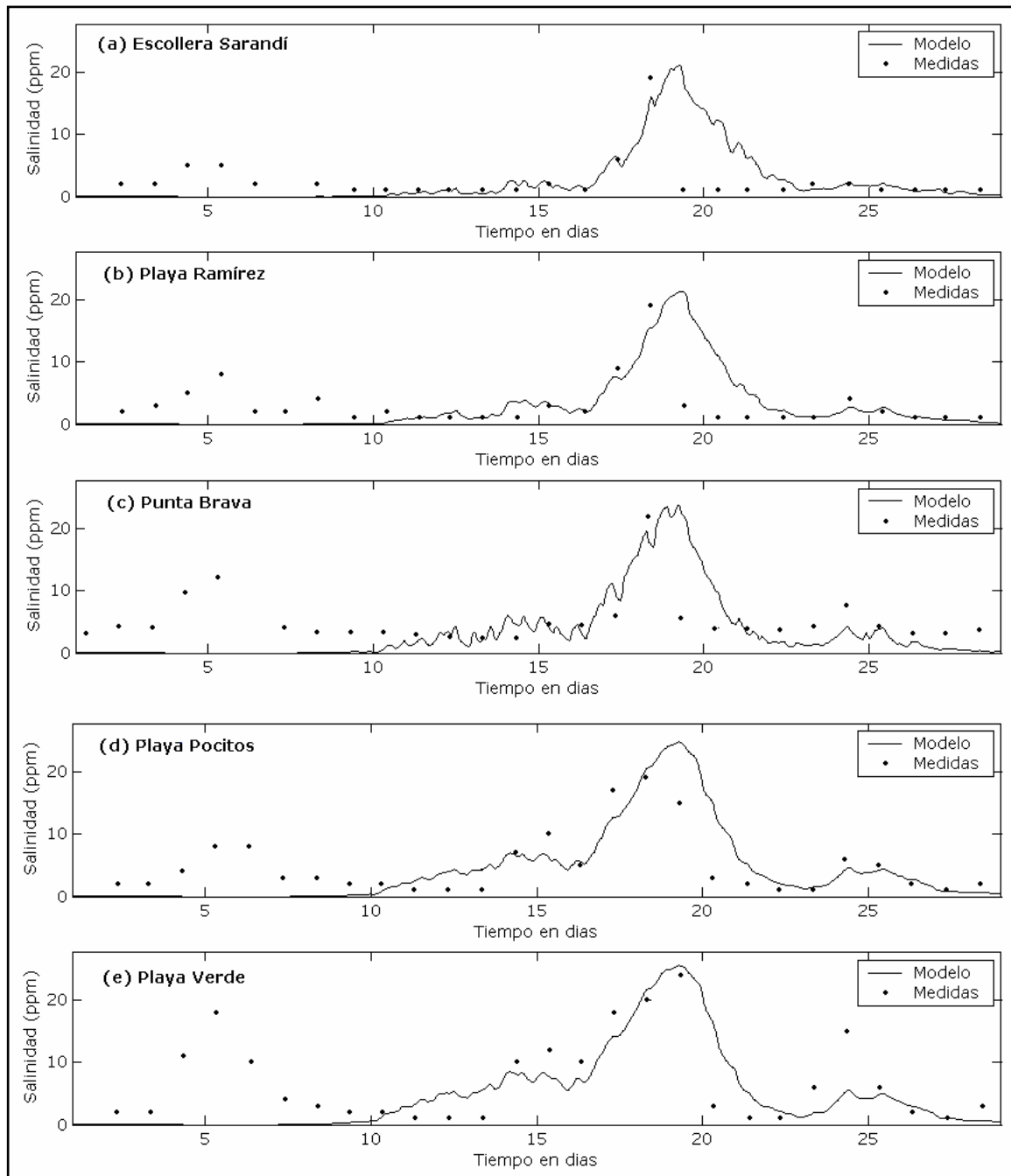


Figura 6: Comparación entre los valores de salinidad medidos y modelados con vientos de Pontón Recalada en (a) Escollera Sarandí, (b) Playa Ramírez, (c) Punta Brava, (d) Playa Pocitos y (e) Playa Verde, durante febrero de 1998.

El ajuste del modelo obtenido para el período de febrero de 1998 utilizando la malla de alta resolución y los vientos de Pontón Recalada se observa en la Figura 6. Los primeros días del mes los valores medidos de salinidad muestran un aumento y una posterior disminución de salinidad mientras que el modelo representa valores casi nulos de salinidad. Esto también se observó en los

resultados obtenidos para la malla de baja resolución en el Capítulo 7 y se vinculó con las características de los vientos registrados en Pontón Recalada durante esos días. A partir del día 10 el modelo representa correctamente los valores medidos de salinidad en todos los puntos de control. Entre los días 15 y 19 los datos muestran un aumento de salinidad importante que el modelo reproduce correctamente. Los últimos días del mes en general el modelo reproduce de forma aceptable los registros de salinidad, salvo en playa Verde donde las diferencias son mayores a 10 ppm.

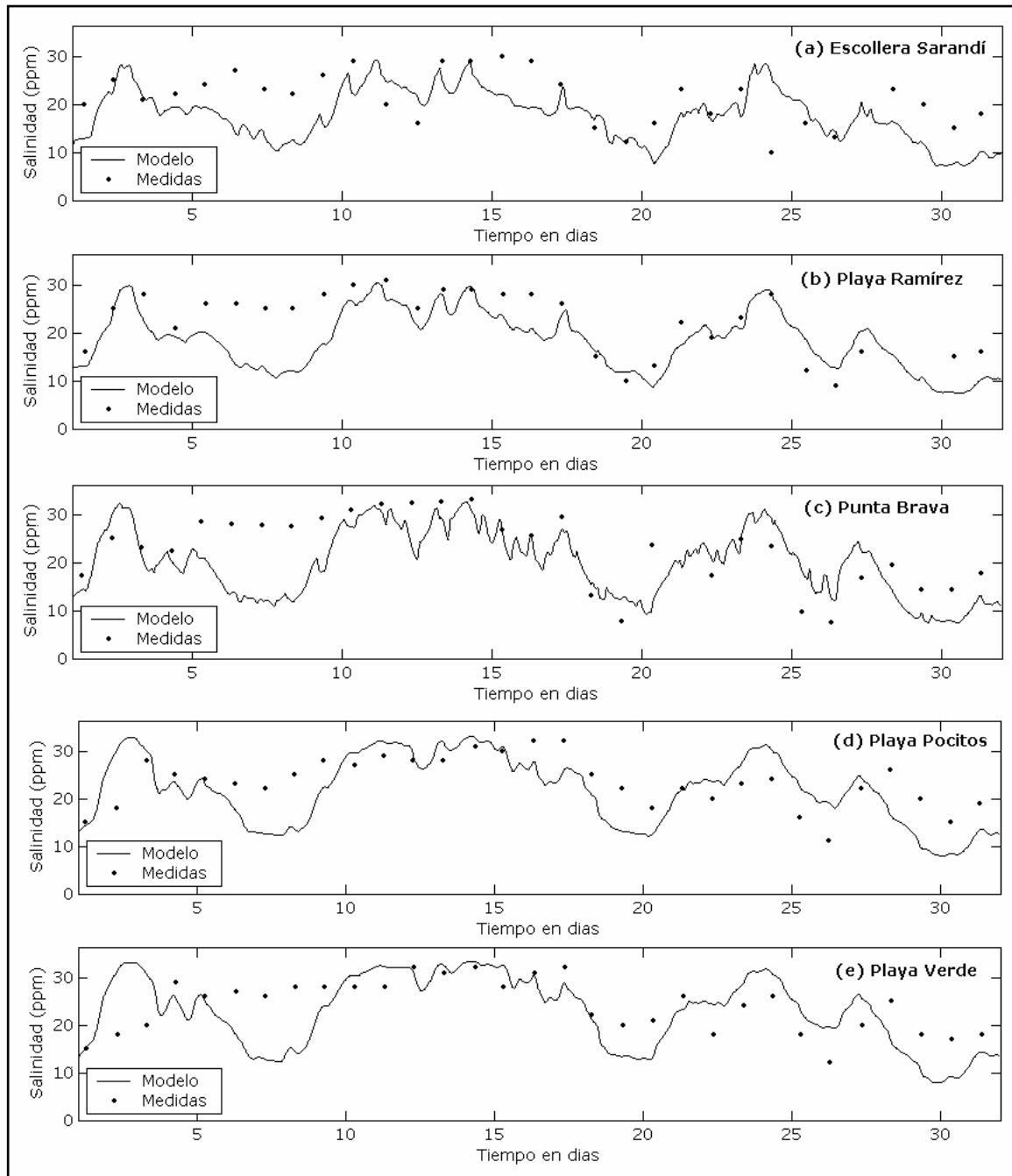


Figura 7: Comparación entre los valores de salinidad medidos y modelados con vientos de Pontón Recalada en (a) Escollera Sarandí, (b) playa Ramírez, (c) Punta Brava, (d) playa Pocitos y (e) playa Verde, durante marzo del 2000.

La comparación entre los valores modelados y registrados de salinidad para el período de marzo del 2000 utilizando la malla de alta resolución y la versión del modelo que utiliza los vientos de Pontón Recalada se presenta en la Figura 7. Como se observa en la misma el modelo reproduce aceptablemente el comportamiento de la salinidad registrada durante marzo del 2000 en los cinco puntos de control. Hasta el día 5 en la Escollera Sarandí, playa Ramírez y Punta Brava la variación de salinidad se reproduce con algunas diferencias pequeñas pero en playa Pocitos y playa Verde se dan diferencias de más de 10 ppm. Entre los días 6 y 9 el modelo calcula valores muchos menores a los registrados en todos los puntos de control con diferencias de más de 15 ppm. Este comportamiento también se observó en la malla de baja resolución y se debe a los vientos ingresados al modelo. Entre los días 10 y 20 el modelo representa correctamente la salinidad medida, con algunas diferencias puntuales de 5 ppm. Entre el día 20 y el último día del mes la salinidad registrada presenta una gran variación que el modelo en general reproduce aunque los últimos días las diferencias son mayores a 5 ppm.

Punto Medición	Salinidad media mensual		Salinidad media mensual	
	Febrero 1998		Marzo 2000	
	Medidas	Modelo	Medidas	Modelo
Escollera Sarandí	2,5	2,6	21,3	17,8
Playa Ramírez	3,0	2,9	22,2	18,5
Punta Brava	5,0	3,4	22,7	19,9
Playa Pocitos	4,9	4,3	23,5	21,9
Playa Verde	7,0	4,9	24,0	22,9

Tabla 2: Valores medios de salinidad registrados y obtenidos con el modelo con vientos de Pontón Recalada para cada punto de control durante los dos períodos de calibración.

En la Tabla 2 se muestra la comparación de salinidades medias mensuales obtenidas con los datos y con el modelo, para los dos períodos de calibración utilizando la versión del modelo que utiliza los vientos de Pontón Recalada. Para el período febrero de 1998 las salinidades medias del modelo y de los datos son muy similares, siendo la diferencia más importante en Playa Verde igual a 2,1 ppm. En marzo del 2000 las salinidades medias mensuales calculadas con el modelo son un poco mayores a las calculadas con los datos en los cinco puntos de control. En este caso las diferencias mayores son 2,8 ppm en Punta Brava, 3,5 ppm en la Escollera Sarandí y 3,7 en Playa Ramírez.

3 - Verificación del modelo

3.1 - Consideraciones generales

De la misma forma que se realizó para la malla de baja resolución, luego de ajustar los parámetros del modelo a partir de la comparación de salinidades medidas y modeladas durante los períodos definidos para la calibración, se procedió a su verificación o validación. Nuevamente este proceso se realizó considerando las dos versiones del modelo con los vientos respectivos y los

diferentes parámetros determinados en la calibración. Los períodos de tiempo utilizados para la verificación del modelo fueron los mismos que se definieron en el Capítulo 8. Estos son el período marzo a junio de 1997 denominado junio de 1997 y el período octubre de 1998 a enero de 1999 denominado enero 1999. Las características de los forzantes presentadas en el Capítulo 8 se mantuvieron durante estas simulaciones con la malla de alta resolución. Se utilizaron los puntos de control Escollera Sarandí, playa Ramírez, playa Pocitos y playa Verde para comparar los resultados obtenidos con el modelo con los registros de salinidad correspondientes a esas zonas.

3.2 - Resultados obtenidos – Vientos Punta Brava

La comparación de la salinidad medida y obtenida con la versión del modelo que utiliza los vientos de Punta Brava con los parámetros de calibración correspondientes a la malla de alta resolución durante el mes de junio de 1997 se presenta en la Figura 8.

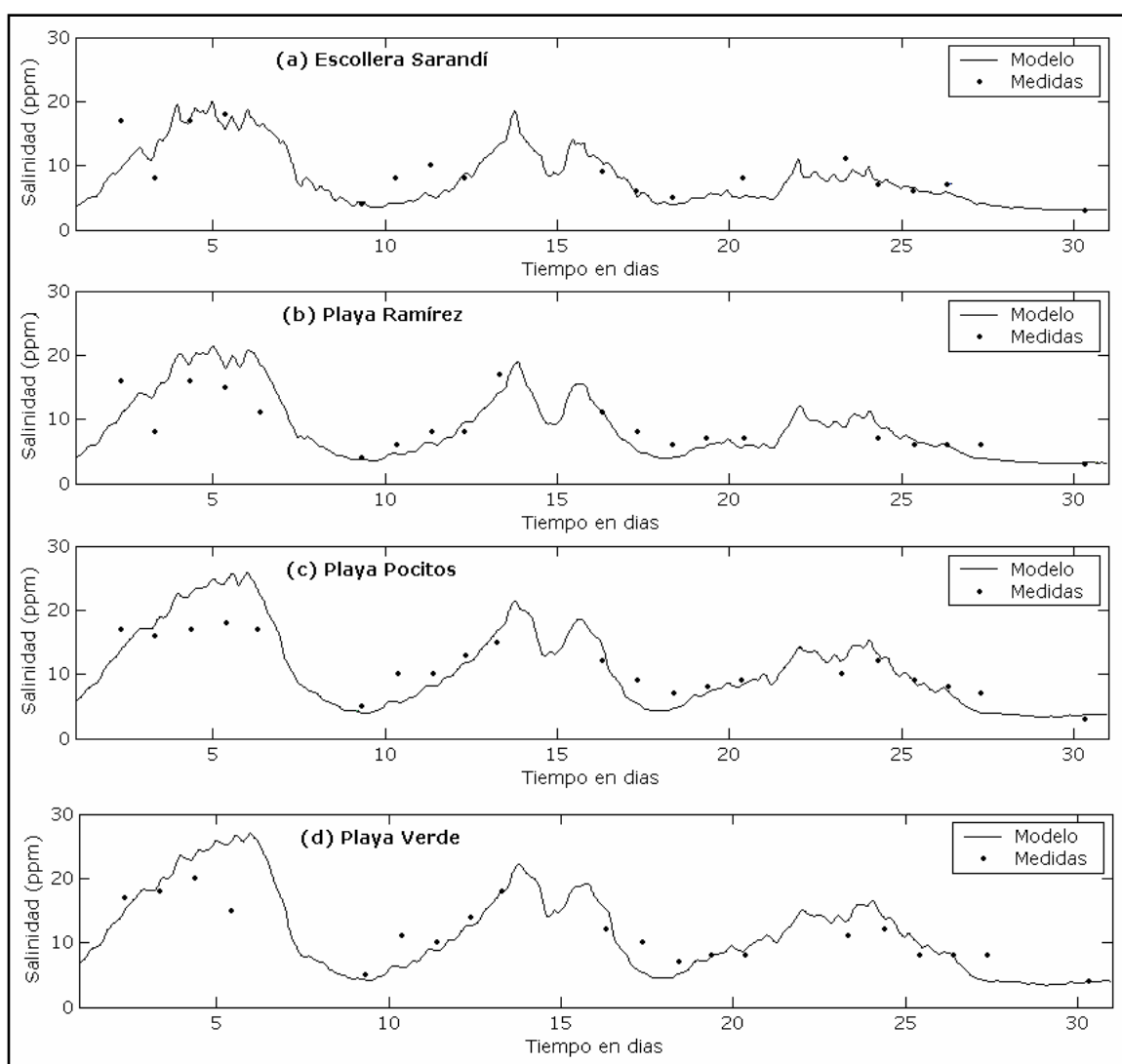


Figura 8: Comparación entre los valores de salinidad medidos y modelados con vientos de Punta Brava en (a) Escollera Sarandí, (b) playa Ramírez, (c) playa Pocitos y (d) playa Verde, durante junio de 1997.

En la Figura 8 se observa que la representación de las pocas medidas de salinidad que existen en los cuatro puntos de medición durante junio de 1997 es muy buena. Durante los primeros días del mes el modelo reproduce valores un poco mayores de salinidad en las playas Ramírez, Pocitos y Verde, con diferencias de más de 10 ppm. Sin embargo durante el resto del mes los valores modelados representan correctamente los valores de salinidad medidos en todos los puntos de control, reproduciéndose varios valores exactos.

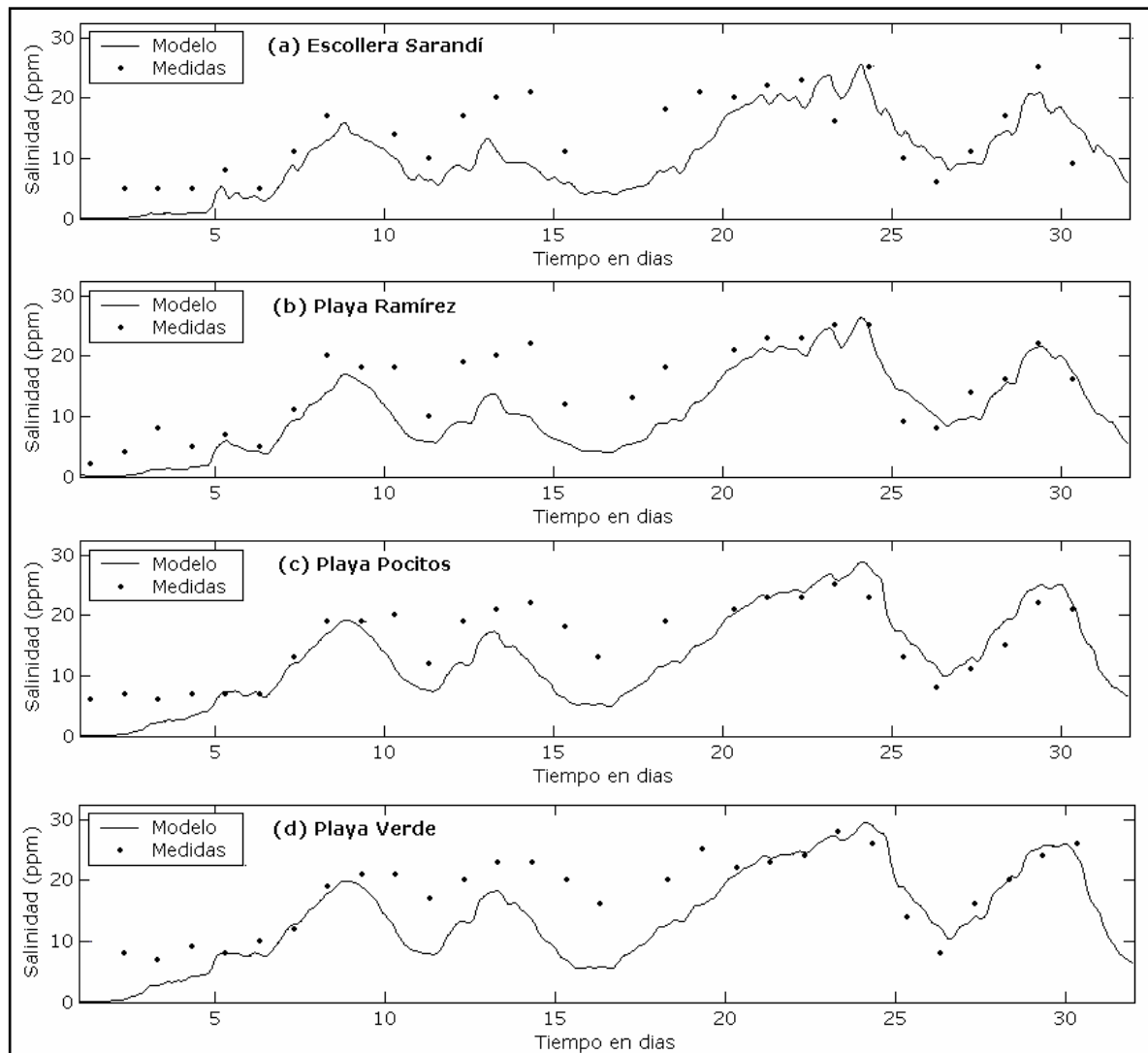


Figura 9: Comparación entre los valores de salinidad medidos y modelados con vientos de Punta Brava en (a) Escollera Sarandí, (b) playa Ramírez, (c) playa Pocitos y (d) playa Verde, durante enero de 1999.

La comparación de los resultados obtenidos con el modelo y la salinidad medida, durante el segundo período utilizado en la verificación, enero de 1999, se muestra en la Figura 9. En la misma se observa que en general el modelo reproduce la variación de salinidad registrada con las medidas en la mayoría de los puntos de control. Hasta el día 5 la representación no es buena, pues el modelo calcula salinidades menores a las registradas. Hasta el día 10 los datos muestran un aumento de salinidad que el modelo reproduce. Los siguientes días el modelo representa la

variación de salinidad aunque con salinidades menores a las registradas. Entre el día 20 y fines del mes el modelo reproduce casi perfectamente los valores de salinidad en todos los puntos de control.

En la Tabla 3 se presentan las salinidades medias mensuales calculadas según los resultados del modelo utilizando los vientos de Punta Brava y según los datos de salinidad medidos, para los dos períodos utilizados en la verificación del modelo, junio de 1997 y enero de 1999. En la misma se observa que la salinidad media de junio de 1997 obtenida con el modelo es casi igual a la obtenida con los datos, siendo la mayor diferencia 0,8 ppm en la Escollera Sarandí. Esto coincide con el buen ajuste que en general se observa en la Figura 8. En cambio en el período de enero de 1999 la salinidad media mensual obtenida con el modelo es menor a la calculada con los datos, con diferencias del orden de 4 ppm.

Punto Medición	Salinidad media mensual Junio 1997		Salinidad media mensual Enero 1999	
	Medidas	Modelo	Medidas	Modelo
Escollera Sarandí	8,9	8,1	14,3	10,3
Playa Ramírez	8,8	8,8	14,8	10,9
Playa Pocitos	11,0	10,9	15,7	13,2
Playa Verde	11,2	11,6	18,2	14,0

Tabla 3: Valores medios de salinidad registrados y obtenidos con el modelo con vientos de Punta Brava para cada punto de control durante los dos períodos de verificación.

3.3 - Resultados obtenidos – Vientos Pontón Recalada

En este punto se presentan los resultados obtenidos en la etapa de verificación de la versión del modelo que utiliza los vientos de Pontón Recalada con los parámetros determinados en la etapa de calibración para la malla de alta resolución.

La comparación entre los valores de salinidad modelados y medidos durante junio de 1997 en los cuatros puntos de control de la costa de Montevideo se presenta en la Figura 10. Los resultados obtenidos muestran que con la versión del modelo que utiliza los vientos de Pontón Recalada se obtienen en general salinidades un poco menores a las registradas en los cuatro puntos de control. Durante los primeros días el modelo representa correctamente la salinidad medida salvo en la Escollera Sarandí. Entre los días 10 y 20 la salinidad calculada con el modelo es menor a la real, con diferencias del orden de 5 ppm en todos los puntos. Hacia finales del mes el modelo reproduce correctamente las salinidades de los días 23 y 24 y luego nuevamente calcula valores menores a los registrados.

La comparación de los resultados obtenidos con la versión del modelo que utiliza los vientos de Pontón Recalada y la salinidad medida, durante el segundo período utilizado en la verificación, enero de 1999, se muestra en la Figura 11.

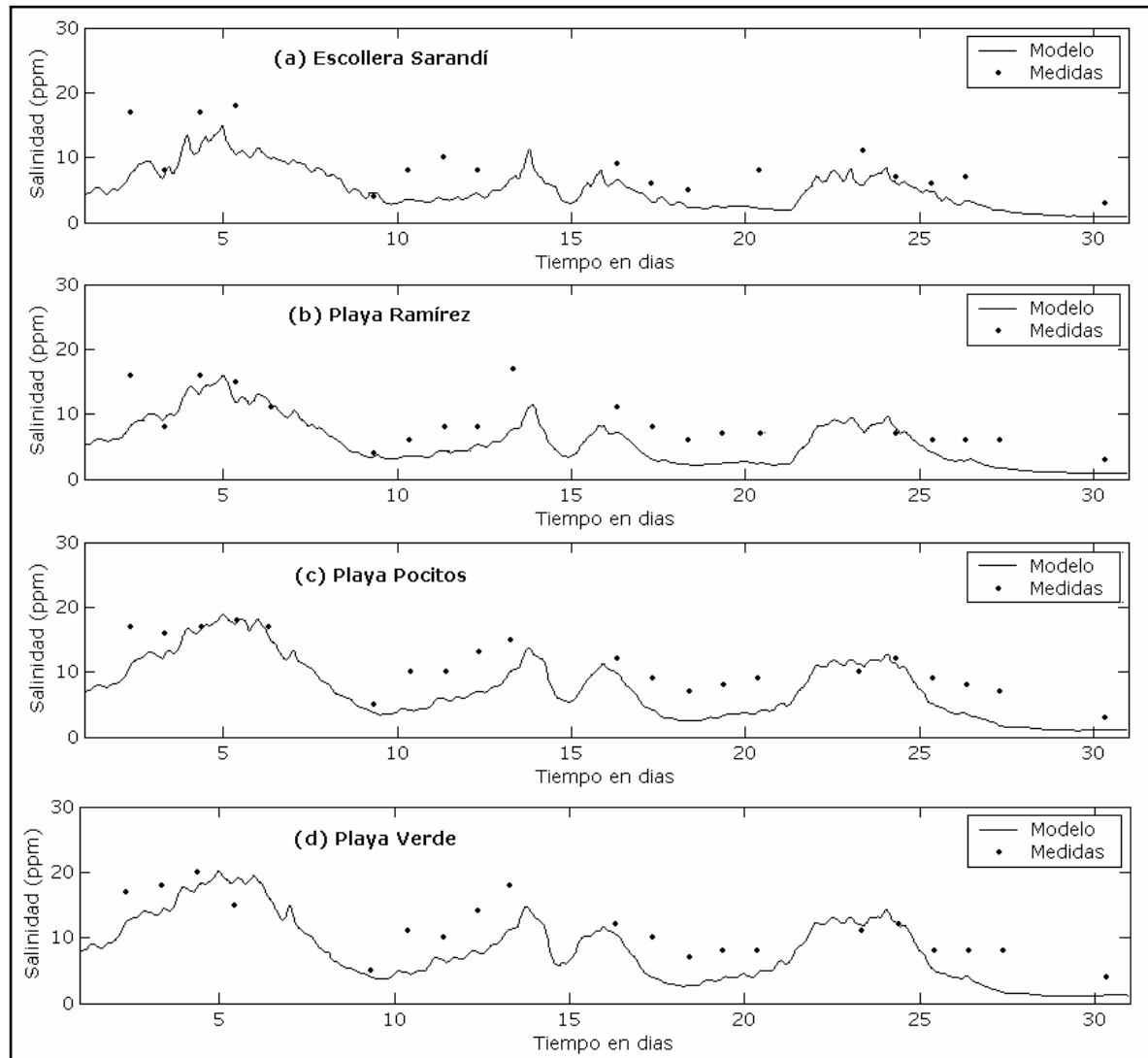


Figura 10: Comparación entre los valores de salinidad medidos y modelados con vientos de Pontón Recalada en (a) Escollera Sarandí, (b) playa Ramírez, (c) playa Pocitos y (d) playa Verde, durante junio de 1997.

En general se observa en la Figura 11 que el modelo representa la gran variación de salinidad que muestran los registros durante enero de 1999 aunque existen en algunos casos diferencias importantes. Hasta el día 10 el modelo reproduce salinidades menores a las registradas aunque se representa el aumento de salinidad que registran los datos. Entre los días 10 y 20 en general el modelo reproduce la variación de salinidad registrada a través de las mediciones en todos los puntos de control, aunque puntualmente se dan algunas diferencias de hasta 10 ppm. Entre los días 20 y 25 el modelo representa una disminución y un aumento posterior de salinidad, mientras que los datos no muestran este comportamiento. Debido a esto durante esos días las diferencias entre los valores medidos y modelados son grandes, de hasta 20 ppm. Los últimos días del mes el modelo representa la gran variación de salinidad que registraron los datos aunque se observan también diferencias importantes.

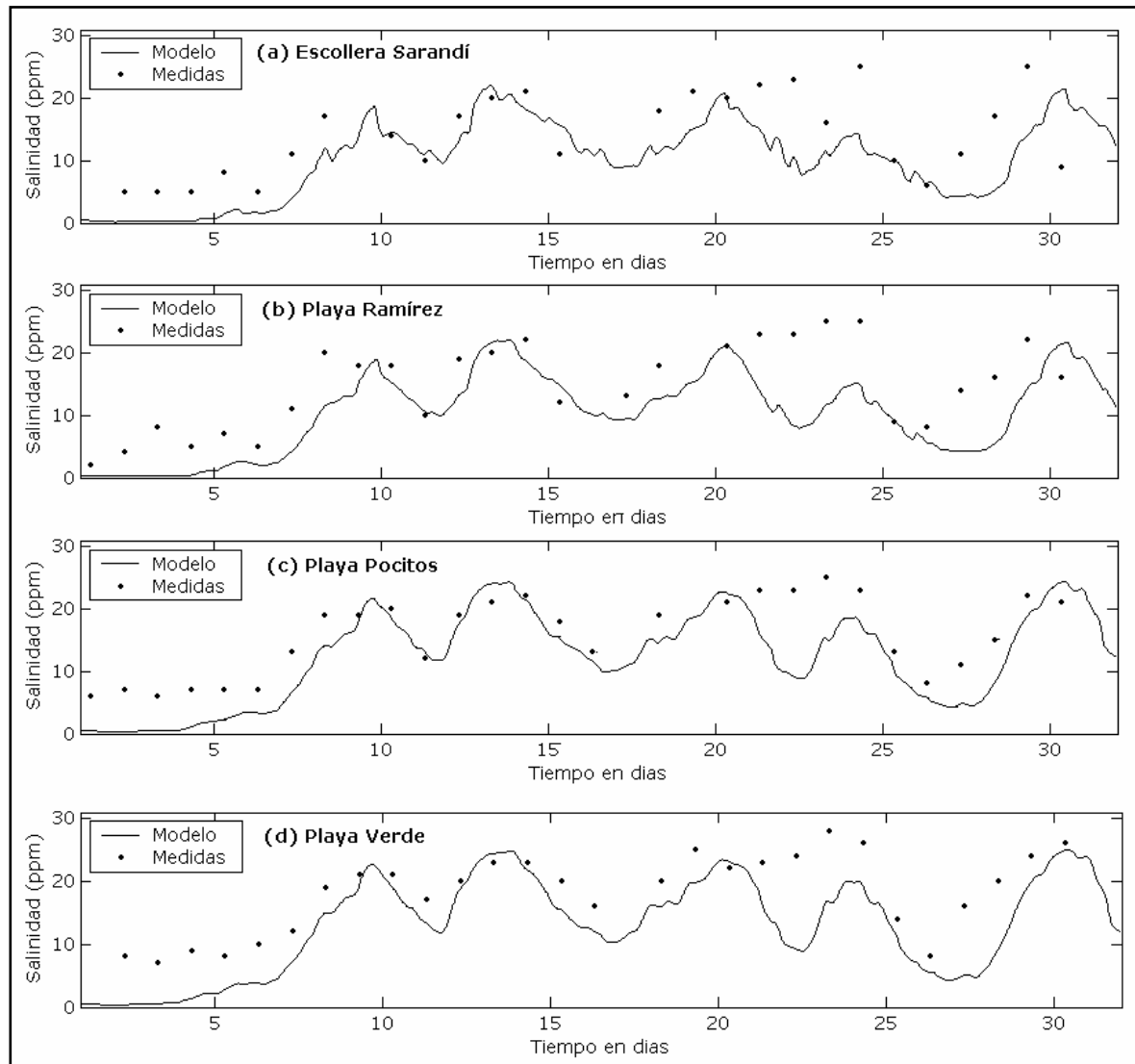


Figura 11: Comparación entre los valores de salinidad medidos y modelados con vientos de Pontón Recalada en (a) Escollera Sarandí, (b) Playa Ramírez, (c) Playa Pocitos y (d) Playa Verde, durante enero de 1999.

Punto Medición	Salinidad media mensual Junio 1997		Salinidad media mensual Enero 1999	
	Medidas	Modelo	Medidas	Modelo
Escollera Sarandí	8,9	5,2	14,3	10,3
Playa Ramírez	8,8	5,7	14,8	10,5
Playa Pocitos	11,0	7,5	15,7	12,4
Playa Verde	11,2	8,1	18,2	13,0

Tabla 4: Valores medios de salinidad registrados y obtenidos con el modelo con vientos de Pontón Recalada para cada punto de control durante los dos períodos de verificación.

La comparación de los valores medios mensuales de salinidad calculados con la salinidad modelada utilizando los vientos de Pontón Recalada y con la salinidad medida en los cuatro puntos de control para los dos períodos de tiempo utilizados en la calibración se presenta en la Tabla 4. Las salinidades medias de junio de 1997 obtenidas con el modelo son menores a las obtenidas con

los datos, con diferencias mayores a 3 ppm. Esto coincide con el comportamiento de los valores modelados que se observó en la Figura 10. En enero de 1999 se observa el mismo resultado, las salinidades medias mensuales calculadas con los valores del modelo son menores a las calculadas con los datos, siendo la mayor diferencia 5,2 ppm en playa Verde.

3.4 - Conclusiones

Aunque la representatividad del modelo es mayor cuando se utiliza la malla de alta resolución, debido a la mejor representación del dominio de cálculo, el tiempo computacional requerido por cada modelación es elevado. Por otro lado, los resultados aquí presentados obtenidos durante el procedimiento de ajuste del campo salino, no presentan grandes diferencias respecto a las que se obtuvieron con la malla de baja resolución. Teniendo esto en cuenta, no parece necesario el sacrificio de utilizar este tipo de malla para el propósito de la modelación general del campo salino. De todas formas en las aplicaciones donde se requiera un mayor detalle de la zona estuarina del Río de la Plata o en la zona costera de Montevideo es preferible utilizar esta malla de alta resolución con las versiones del modelo con los parámetros obtenidos en este ajuste, ya sea utilizando los vientos de Punta Brava o los vientos de Pontón Recalada.

Anexo 3

VERIFICACION DE TRANSECTAS DE SALINIDAD

En el Capítulo 8 se presentó la verificación de las dos versiones del modelo a partir de las únicas medidas de salinidad con las que se cuenta en una posición fija durante un determinado período de tiempo. Dichas mediciones son registros diarios de salinidad en varios puntos de la costa de Montevideo realizadas por la Intendencia Municipal de dicha ciudad. Por otro lado, se cuenta con algunas mediciones de salinidad puntuales tomadas a lo largo del Río de la Plata en varias campañas de mediciones diarias realizadas por Freplata. Algunas de estas situaciones fueron simuladas con las dos versiones del modelo según la disponibilidad de los datos necesarios para realizar una simulación completa, como ser caudales fluviales y vientos. En este anexo se presenta la comparación entre la salinidad modelada y medida a lo largo de estas transectas como otra forma de verificación del modelo.

1 - Características generales

A partir de un conjunto de mediciones de salinidad realizadas por Freplata en varias campañas de medición se realizó una comparación entre la salinidad calculada por el modelo y la salinidad real. Una de las campañas fue realizada el 5 de febrero de 1999 y se tomaron 11 mediciones de salinidad en varios puntos cercanos a la costa de Montevideo. Las otras series de datos son mediciones de salinidad cercanas a la costa uruguaya realizadas los días 17, 18 y 19 de noviembre de 1999. En total forman una serie de más de 50 medidas de salinidad.

Para obtener con el modelo el campo salino correspondiente al día 5 de febrero de 1999 se utilizaron las simulaciones de uno de los períodos seleccionados para la etapa de verificación, presentada en el Capítulo 8, enero 1999. A partir de la misma se modelaron los cinco días del mes de febrero considerando el caudal fluvial, la marea astronómica y el viento correspondientes a dicho período. Para obtener el campo salino durante los tres días de noviembre de 1999 se modeló el período previo agosto, setiembre y octubre de 1999 considerando el caudal fluvial, la marea astronómica y el viento en el mes de octubre. A partir de estos resultados se simuló hasta el día 19 de noviembre inclusive considerando el caudal fluvial, la marea astronómica y el viento correspondiente a esos días. Es importante mencionar que ni en la modelación de los días de febrero de 1999 ni en la modelación de noviembre de 1999 se incluyó el efecto de la marea real por no contar con la información requerida. Esto puede ser importante en el momento de evaluar los resultados obtenidos.

Las simulaciones se realizaron con las dos versiones del modelo, es decir, considerando el viento medido en Punta Brava y en Pontón Recalada, con los parámetros correspondientes

obtenidos luego de la calibración del modelo presentada en el Capítulo 7. Para la comparación de los resultados obtenidos con las mediciones se definieron puntos de control correspondientes a cada ubicación de las medidas.

2 - Resultados obtenidos

A continuación se presenta la comparación entre los valores medidos y modelados de salinidad en los cuatro días de series de datos. Aunque se cuenta con la fecha y ubicación de los registros de salinidad no se tiene la hora exacta de cada medida, por lo que se considera el dato de salinidad constante a lo largo del día y se compara con la variación diaria de salinidad en cada punto de medición.

2.1 - Transecta 1

La transecta 1 corresponde a la campaña realizada el 5 de febrero de 1999. La ubicación de los puntos de control representativos de los puntos de medición se presenta en la Figura 1. En cada punto de control se tiene una medida de salinidad, siendo 11 el número total de mediciones.

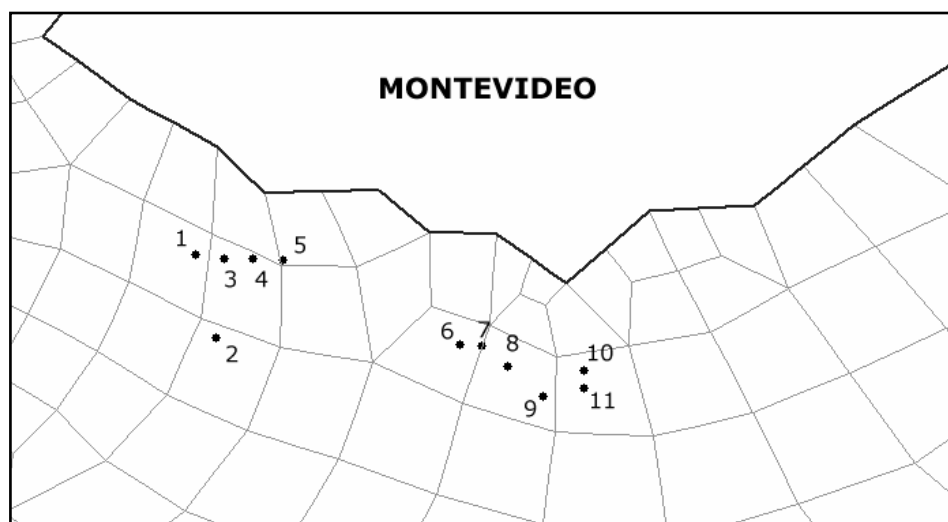


Figura 1: Ubicación de los puntos de medición de la Transecta 1.

En la Figura 2 se muestra la comparación entre los valores medidos y modelados en cada uno de los 11 puntos de medición con los vientos de Punta Brava y de Pontón Recalada. En primer lugar se observa que la salinidad calculada con las dos versiones del modelo es similar en todos los puntos de medición. En la Figura 2(a) se observa que con los vientos de Punta Brava, en los puntos de medición del 1 al 5 la salinidad modelada es un poco menor a la calculada pero las diferencias no son muy grandes. En los puntos 6 y 7 las diferencias aumentan un poco más y finalmente en los últimos cuatro puntos el modelo no reproduce aceptablemente la salinidad medida. En la Figura 2(b) se observa que con los vientos de Pontón Recalada se obtiene un comportamiento similar, aunque con diferencias de salinidad mayores entre el modelo y las medidas pues con los vientos de

Pontón Recalada los valores de salinidad calculados son menores a los calculados con los vientos de Punta Brava. Observando en la Figura 1 la ubicación de los puntos de medición y los resultados presentados en la Figura 2 se puede concluir que el modelo reproduce aceptablemente la salinidad en el grupo de puntos de medición ubicados hacia el Oeste de Montevideo pero no reproduce aceptablemente la salinidad en el grupo de puntos ubicados al Este. En consecuencia el modelo calcula en este caso un gradiente de salinidad sobre la costa uruguaya menor al gradiente de salinidad que muestran los datos.

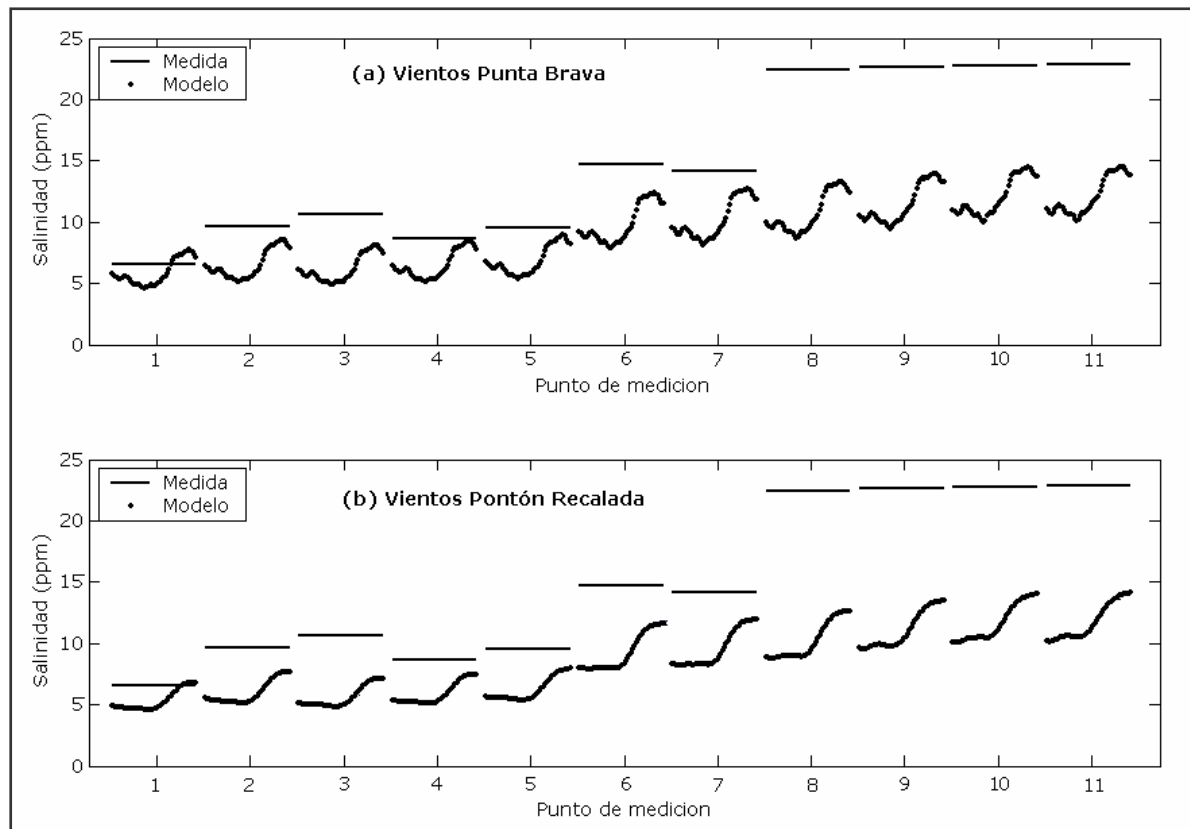


Figura 2: Comparación entre los valores de salinidad medidos a lo largo de la Transecta 1 y calculados con el modelo considerando los vientos medidos en (a) Punta Brava y (b) Pontón Recalada.

2.2 - Transecta 2

La transecta 2 está formada por las mediciones realizadas el 17 de noviembre de 1999. En total se tomaron 10 medidas ese día. La ubicación en la malla de cálculo de los puntos de medición que conforman esta transecta se presenta en la Figura 3.

La comparación entre los valores modelados considerando los vientos de Punta Brava y los vientos de Pontón Recalada con los valores medidos de salinidad en cada punto de la transecta 2 se presenta en la Figura 4. En la Figura 4(a) se observa que los valores de salinidad calculados por el modelo considerando los vientos registrados en Punta Brava son diferentes a las salinidades registradas en los 10 puntos de medición. En el punto 1 el modelo calcula una salinidad 5 ppm más pequeña; en los puntos 2, 3 y 4 la salinidad modelada es mayor a la registrada en más de 10 ppm.

En los otros puntos de medición la salinidad calculada también es mayor que la registrada pero con diferencias menores a 10 ppm. Los resultados obtenidos con los vientos de Pontón Recalada, presentados en la Figura 4(b) son similares a los obtenidos con los vientos de Punta Brava, salvo en el punto de medición 1, donde se observa una correcta representación de la salinidad medida.

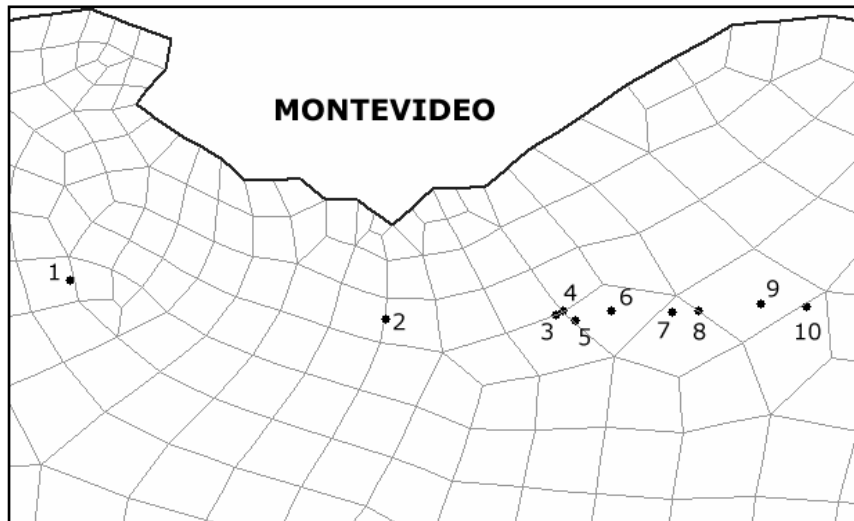


Figura 3: Ubicación de los puntos de medición de la Tansecta 2.

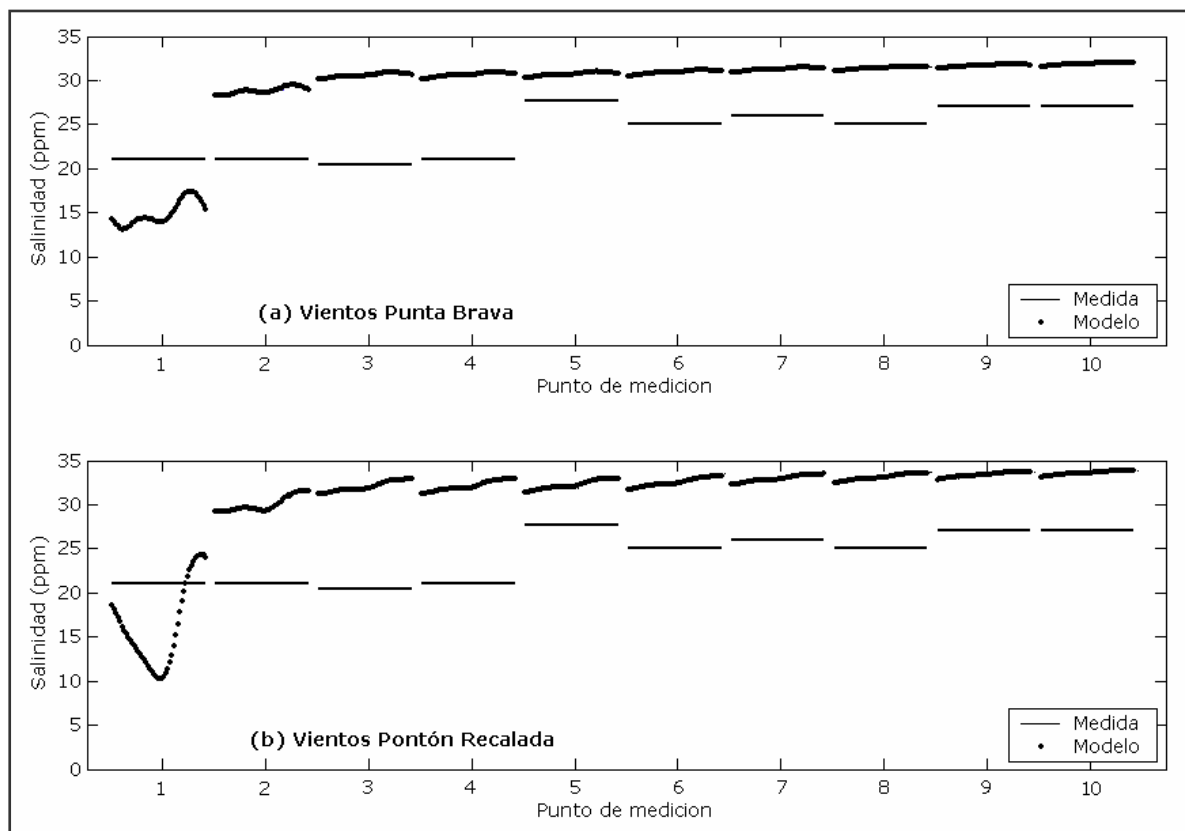


Figura 4: Comparación entre los valores de salinidad medidos a lo largo de la Transecta 2 y calculados con el modelo considerando los vientos medidos en (a) Punta Brava y (b) Pontón Recalada.

2.3 - Transecta 3

La transecta 3 está formada por 24 medidas que se tomaron el 18 de noviembre de 1999 en distintas ubicaciones sobre la costa uruguaya del Río de la Plata. La ubicación de los puntos de medición que forman esta transecta se presenta en la Figura 5.

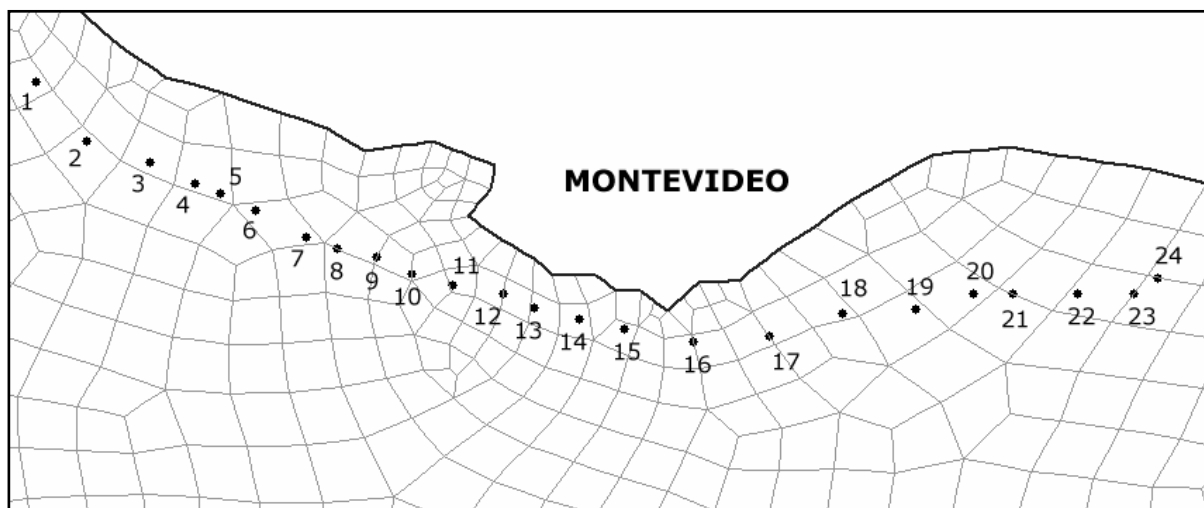


Figura 5: Ubicación de los puntos de medición de la Transecta 3.

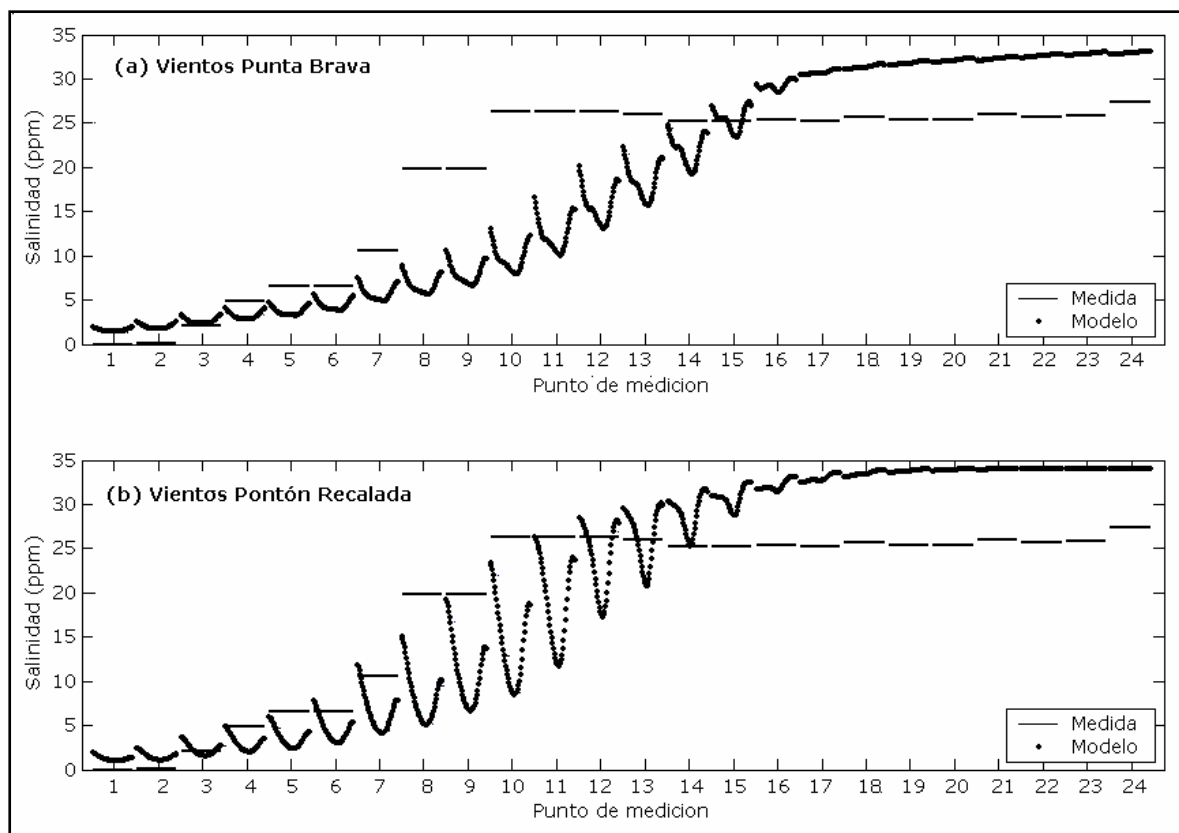


Figura 6: Comparación entre los valores de salinidad medidos a lo largo de la Transecta 3 y calculados con el modelo considerando los vientos medidos en (a) Punta Brava y (b) Pontón Recalada.

La comparación entre los valores de salinidad medidos y modelados a lo largo de la transecta 3 se muestra en la Figura 6. En la misma se observa que aunque no se reproducen valores exactos, las dos versiones del modelo calculan aceptablemente el aumento de salinidad que ocurre en los datos a medida que los puntos de medición se ubican más hacia el Este. Utilizando los registros de vientos de Punta Brava en los puntos de medición 8, 9, 10, 11 y 12 el modelo reproduce valores menores de salinidad a los registrados, con diferencias de más de 10 ppm. En ese caso el gradiente de salinidad sobre la costa uruguaya calculado por el modelo es menor al gradiente de salinidad registrado entre dichos puntos. Cuando se utilizan los vientos medidos en Pontón Recalada la salinidad modelada en esos puntos se aproxima más a la salinidad registrada. En los puntos de medición del 16 en adelante la salinidad calculada por las dos versiones del modelo representa salinidad mayores a las registradas.

2.4 - Transecta 4

La transecta 4 corresponde a las mediciones de salinidad tomadas el 19 de noviembre de 1999. La serie de datos está formada por 14 mediciones realizadas sobre la costa uruguaya al Oeste de Montevideo, cuya ubicación se muestra en la Figura 7.

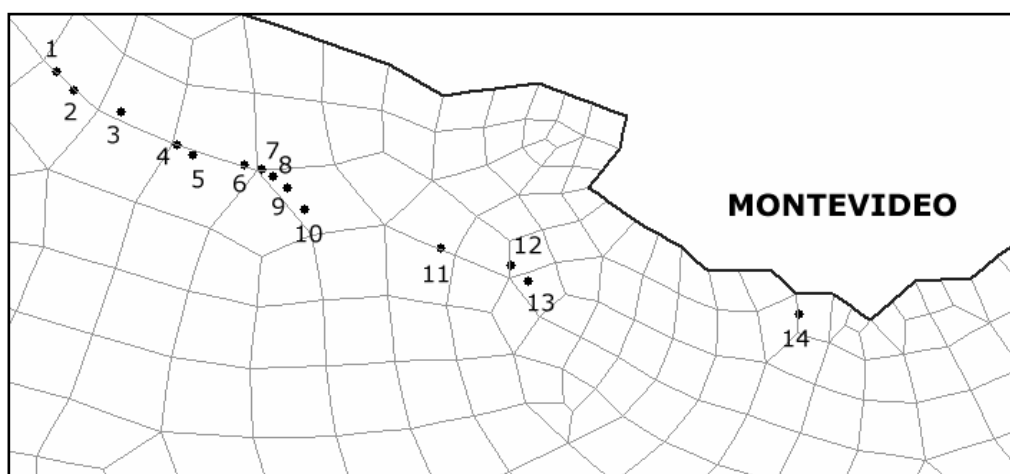


Figura 7: Ubicación de los puntos de medición de la Transecta 4.

La comparación entre los valores de salinidad medidos y modelados a lo largo de la transecta 4 se muestra en la Figura 8. En los primeros puntos de medición la salinidad modelada, especialmente cuando se usan los vientos de Punta Brava, es un poco mayor a la salinidad registrada. En el punto 14, ubicado sobre la costa de Montevideo, el modelo se aparta considerablemente del valor registrado. Sin embargo se observa en la Figura 8(a) y en la Figura 8(b) como las dos versiones del modelo reproducen correctamente la salinidad registrada en los restantes puntos de medición. En este caso el modelo reproduce correctamente el gradiente de salinidad existente entre la mayoría de los puntos de medición.

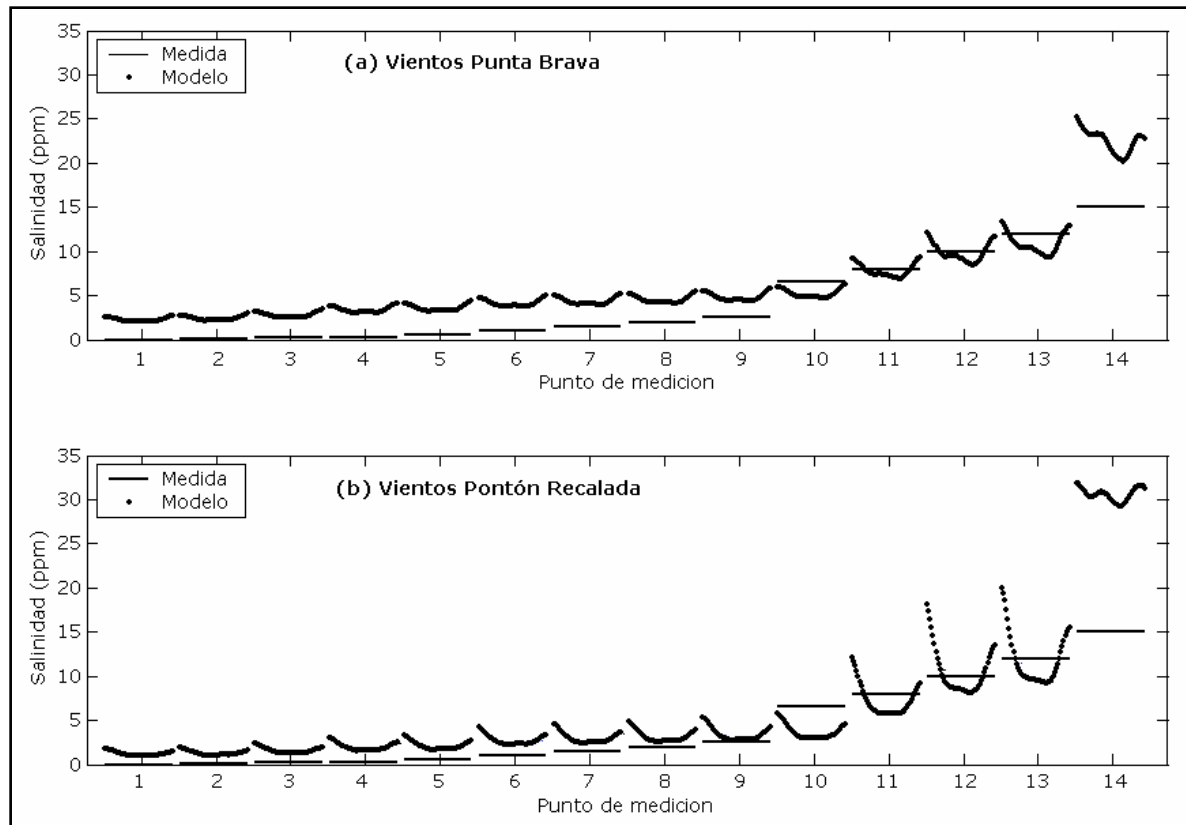


Figura 8: Comparación entre los valores de salinidad medidos a lo largo de la Transecta 4 y calculados con el modelo considerando los vientos medidos en (a) Punta Brava y (b) Pontón Recalada.

3 - Conclusión

Se han presentado algunas comparaciones de valores de salinidad calculados con las dos versiones del modelo con valores de salinidad registrados durante varias campañas de medición realizadas en el Río de la Plata. La mayoría de los resultados no muestran una aproximación exacta, pero si se observan valores modelados similares a los medidos en varios casos. Esto muestra que el modelo representa el campo salino en el Río de la Plata aceptablemente, siendo necesaria siempre la incorporación de información real en las simulaciones para obtener mejores resultados.

Anexo 4

ESTACIONALIDAD DEL CAMPO SALINO II

En el Capítulo 9 se presentó un análisis de la estacionalidad del campo salino a partir de la modelación de los períodos cálido y frío con caudal fluvial medio, máximo y mínimo. En dicho análisis la modelación de los escenarios se realizó considerando valores constantes de viento y caudal, característicos de cada período, durante todo el período de simulación. Otra forma de determinar las distribuciones medias de salinidad para cada escenario es simular determinados períodos de tiempo representativos de cada escenario y luego realizar un promedio a lo largo de los mismos para obtener los valores medios del campo salino. De esta forma el campo salino en cada instante se obtiene simulando la variación real de los forzantes de cada período y luego se realiza una integración temporal para obtener la distribución media característica de cada escenario.

1 - Características de los períodos de modelación

Según el análisis presentado en 9.2, el campo salino presenta dos períodos estacionales, el período cálido y el período frío. El período cálido está formado por los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo, y predominan los vientos provenientes del sector Este. El período frío comprende los meses de junio, julio, agosto y setiembre, y se caracteriza por una distribución homogénea de los vientos sin una dirección predominante.

Para determinar el campo salino medio característico de estos dos períodos se realizó la modelación del período cálido y del período frío del año 1999. El período cálido formado por los meses de noviembre y diciembre de 1998 y los meses de enero, febrero y marzo de 1999; y el período frío formado por los meses entre junio y setiembre de 1999. Se seleccionó este año en particular pues en los dos períodos la distribución media de los vientos es similar a la distribución media característica correspondiente, las cuales fueron determinadas en el Capítulo 9. Además, los caudales fluviales medios durante esos períodos de tiempo fueron normales. Esto garantiza una buena comparación con las distribuciones determinadas por Guerrero et al (2004), ya que como se presentó en el Capítulo 9, las distribuciones de salinidad media para los períodos cálido y frío con caudal medio fueron determinadas con una extensa base de datos.

En la Figura 1 se muestran las rosas de viento para el período cálido y el período frío, calculadas a partir de los vientos medidos en Punta Brava en el período noviembre 1998 – marzo 1999 y en el período junio 1999 – setiembre 1999, respectivamente. Durante el período cálido de 1999 la distribución direccional de los vientos muestra que dicho período estuvo caracterizado por vientos predominantes del sector Este, con una frecuencia de 30% y del sector Noreste, con

frecuencias mayores al 15%. Esta distribución es similar a la determinada para el período cálido a partir del análisis de varios años de datos, presentada en la Figura 9.1. Por otro lado, las intensidades medias del período cálido de 1999 también muestran una distribución similar a la característica del período cálido, con las intensidades medias mayores del orden de los 25 km/h (6,9 m/s) provenientes del Suroeste, Sur, Sureste y Este. El período frío de 1999 presenta una distribución de frecuencias direccionales de vientos similar a la distribución característica de los períodos fríos, aunque durante 1999 los vientos del Sureste presentan una frecuencia de ocurrencia menor. La distribución direccional de intensidad media del período frío de 1999 presenta también las mismas características que la distribución determinada para el período frío siendo en este caso la intensidad media del sector Sureste casi 30 km/h (8,3 m/s), valor un poco mayor al que se observa en la Figura 9.1 (25 km/h).

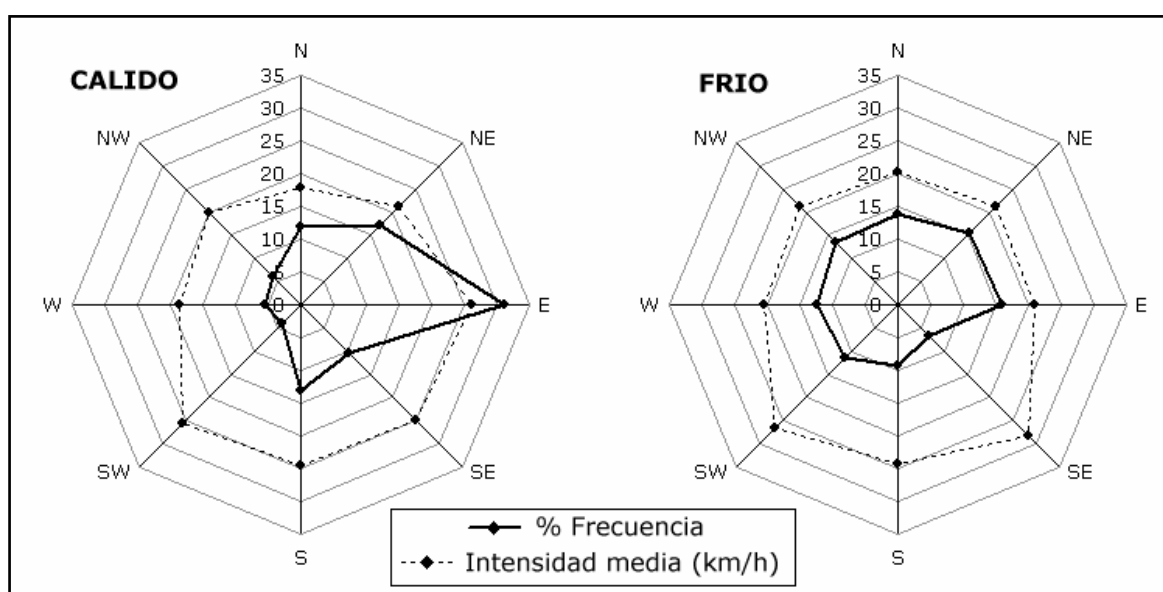


Figura 1: Distribución direccional de los vientos registrados en Punta Brava durante el período cálido y frío del año 1999.

En la Figura 2 se muestran las rosas de vientos para los períodos cálido y frío del año 1999 calculadas a partir de las mediciones de viento en la estación Pontón Recalada durante dichos períodos. Se observa que durante el período cálido de 1999 los vientos del sector Este tuvieron un 20% de frecuencia y que los vientos de las direcciones Sureste, Sur, Noreste y Norte tuvieron frecuencias cercanas al 15%. Las intensidades medias muestran valores de casi 40 km/h (11,1 m/s) del Sureste y Suroeste, siendo las intensidades medias del orden de 30 km/h (8,3 m/s) en las otras direcciones de viento. La distribución direccional característica del período cálido, determinada a partir del análisis de varios años de mediciones de la estación de Pontón Recalada se presentó en la Figura 9.2. La comparación entre ambas distribuciones muestra que son similares, con una frecuencia de vientos del Este en el año 1999 un poco menor a la de todo el período y intensidades medias en el período 1999 mayores a las que se observan en la Figura 9.2. El período frío de 1999 muestra que las direcciones Este y Oeste tienen un 15% de frecuencia y

que las otras direcciones tienen aproximadamente un 10%. Las intensidades medias mayores provienen del Oeste, Suroeste y Sur. Al comparar esta distribución con la característica del período frío para vientos de Pontón Recalada se observa que los vientos del sector Norte y Noreste tienen una frecuencia menor a la característica del período frío y que las intensidades medias son mayores.

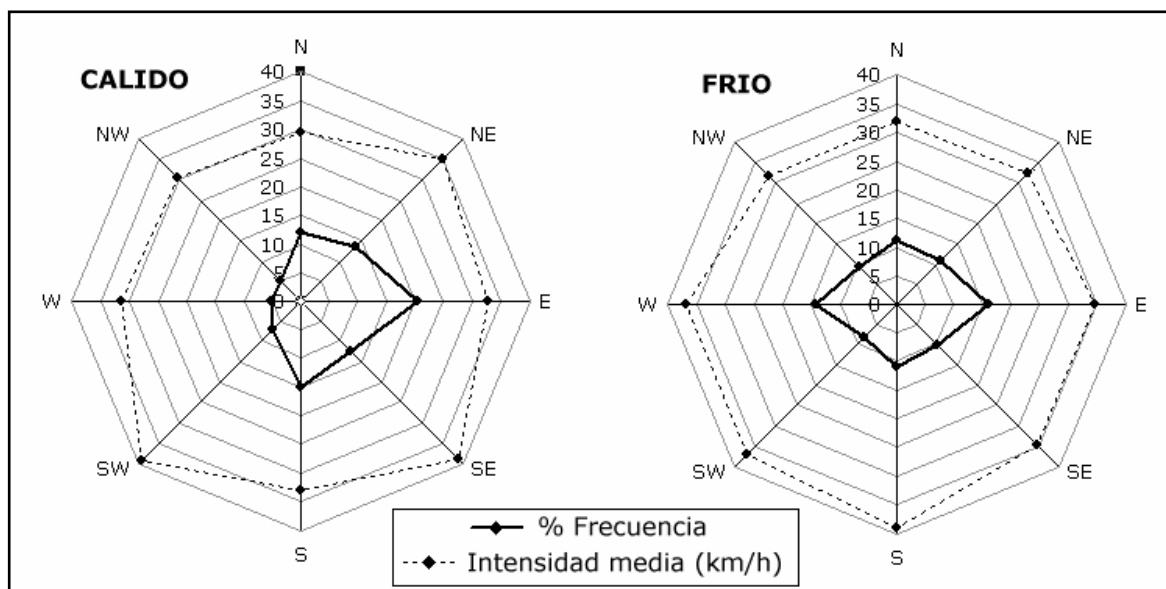


Figura 2: Distribución direccional de los vientos registrados en Pontón Recalada durante el período cálido y frío del año 1999.

El caudal fluvial medio mensual de los Ríos Paraná y Uruguay de los meses que conforman los períodos cálido y frío del año 1999 se presentan en la Tabla 1 y en la Tabla 2, respectivamente. Como se observa en las mismas, los caudales fluviales descargados durante estos dos períodos presentan una gran variabilidad. En el período cálido se registraron caudales medios mensuales de 32.000 m³/s y 15.000 m³/s, mientras que en el frío 27.000 m³/s y 15.000 m³/s. Sin embargo los caudales medios de ambos períodos, 21.400 m³/s para el período cálido y 20.200 m³/s para el período frío, pertenecen al rango de caudales medios, definido en el Capítulo 9 como el rango entre los caudales 17.370 m³/s y 28.000 m³/s. Debido a esto, se considera que estos dos períodos son representativos de los escenarios cálido y frío con caudal fluvial medio.

Período Cálido 1999	Caudal fluvial medio mensual (m ³ /s)		
	Río Uruguay	Río Paraná	Total
Noviembre 1998	2.954	29.048	32.002
Diciembre 1998	1.293	14.871	16.164
Enero 1999	933	14.568	15.501
Febrero 1999	1.903	19.856	21.759
Marzo 1999	1.139	20.323	21.462

Tabla 1: Caudal fluvial medio mensual para el período cálido de 1999.
Fuente: Instituto Nacional del Agua Argentino, INA.

Período Frío 1999	Caudal fluvial medio mensual (m ³ /s)		
	Río Uruguay	Río Paraná	Total
Junio 1999	4.736	14.947	19.683
Julio 1999	7.870	19.629	27.499
Agosto 1999	2.953	15.287	18.240
Setiembre 1999	2.901	12.418	15.319

Tabla 2: Caudal fluvial medio mensual para el período frío de 1999.
Fuente: Instituto Nacional del Agua Argentino, INA.

Las simulaciones se realizaron considerando la variación temporal del caudal fluvial, la marea astronómica y el viento real, correspondientes a cada período de tiempo. Se utilizó la malla de baja resolución presentada en el Capítulo 6 y las simulaciones se realizaron con las dos versiones del modelo, es decir, con los vientos medidos en Punta Brava y en Pontón Recalada y los parámetros correspondientes a cada versión. Para cada período se realizó la simulación previa de tres meses a partir de la condición inicial del campo salino presentada en el Capítulo 6.

2 - Distribución estacional del campo salino

El campo salino medio característico del período cálido del año 1999 se obtuvo promediando el período noviembre 1998 – marzo 1999 y el campo salino del período frío de 1999 se obtuvo promediando los meses entre junio 1999 y setiembre 1999. A continuación se presenta la distribución horizontal de salinidad calculada con las dos versiones del modelo y la comparación con las distribuciones de salinidad determinadas a partir de los datos por Guerrero et al (2004). En el Capítulo 9 se describió el procedimiento y los resultados obtenidos durante ese trabajo. Para la comparación entre los resultados del modelo y los de Guerrero et al (2004) se utiliza el mismo procedimiento que se utilizó en el Capítulo 9.

2.1 - Período Cálido

En la Figura 3 se muestran las distribuciones medias de salinidad calculadas para el período cálido de 1999 con las dos versiones del modelo, y su comparación con las curvas de isoconcentración de salinidad, determinadas para el período cálido y caudal fluvial medio, en el trabajo de Guerrero et al (2004).

En la Figura 3(a) se observa que la versión del modelo que utiliza los vientos de Punta Brava representa correctamente los rangos de variación de salinidad media para el período cálido sobre la costa uruguaya y sobre la zona central del Río de la Plata, hasta la salinidad de 20 ppm. Sobre la costa argentina el modelo reproduce salinidades medias mayores a las que determinan las curvas de isoconcentración de salinidad de Guerrero et al (2004). En cambio, la versión que utiliza los vientos de Pontón Recalada (Figura 3(b)) representa mejor los rangos de salinidad sobre la costa argentina hasta los 15 ppm que sobre la costa uruguaya, donde la salinidad del modelo es menor a la determinada con los datos.

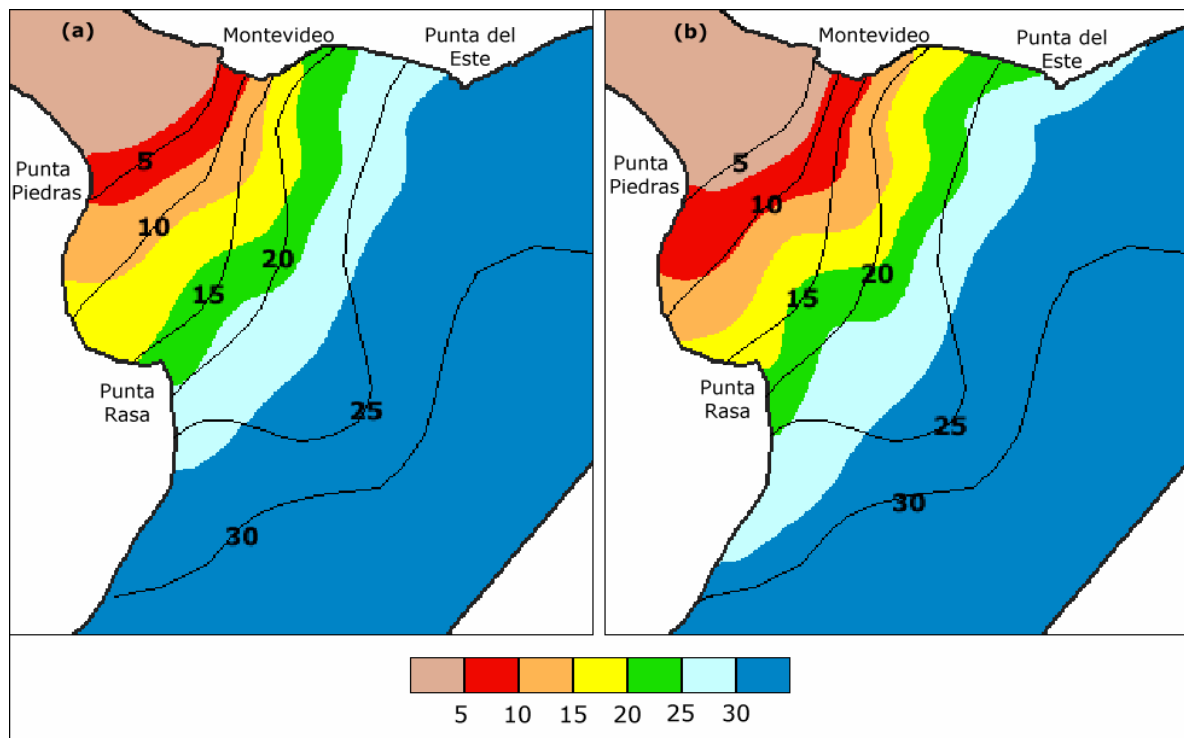


Figura 3: Comparación de las curvas de isoconcentración de salinidad (ppm) para el período cálido de 1999 obtenidas con el modelo utilizando (a) vientos de Punta Brava y (b) vientos de Pontón Recalada, con la distribución correspondiente determinada por Guerrero et al (2004).

Al comparar las distribuciones de salinidad estacional obtenidas a partir de la simulación del período cálido de 1999 (Figura 3) con las distribuciones de salinidad determinadas a partir de los forzantes medios para el período cálido y caudal medio presentadas en la Figura 9.6 se observa lo siguiente. En primer lugar, con la versión del modelo que utiliza los vientos de Punta Brava la distribución de salinidades en la costa argentina y en la zona central del río son muy similares, mientras que en la costa uruguaya se observan algunas diferencias, sobretudo al Este de Montevideo. Al utilizar la versión de Pontón Recalada ambas distribuciones presentan mayores diferencias, principalmente en la costa argentina.

En la Tabla 3 se presenta la comparación de los parámetros estadísticos presentados por Guerrero et al (2004) para el período cálido y caudal medio, con los valores obtenidos con el modelo para los cuadrantes definidos en el Capítulo 9. Los valores marcados corresponden a resultados del modelo que no pertenecen al rango de salinidad definido por los parámetros estadísticos. Se observa en la Tabla 3 que en 17 de los 28 cuadrantes (61%) la versión de Punta Brava representa salinidades medias correctas, mientras que la versión de Pontón Recalada lo hace en 21 de los 28 cuadrantes (75%). Si se comparan estos resultados con los presentados en el Capítulo 9, correspondientes al período cálido y caudal fluvial medio, 61% con versión Punta Brava y 68% con versión Pontón Recalada (Tabla 9.4); se observa que en este caso el porcentaje de representación con la versión de Pontón Recalada es mayor, se representan dos cuadrantes más, y que con la versión de Punta Brava el porcentaje es el mismo.

Nº Cuadrante	Parámetros estadísticos (Guerrero et al 2004)			Salinidad media modelo	
	Salinidad Media	Número Datos	Desviación Estándar	Versión PB	Versión PR
1	3,33	39	3,16	1,9	0,6
2	4,28	7	5,28	8,3	5,2
3	21,80	13	9,00	22,4	16,4
4	25,62	4	7,62	29,1	24,5
5	---	---	---	---	---
6	28,56	7	2,61	33,3	31,9
7	0,07	7	0,05	4,0	2,5
8	7,10	55	6,94	6,6	3,5
9	12,36	53	7,06	13,8	9,7
10	22,28	28	6,46	23,8	19,9
11	27,64	28	4,15	30,2	28,3
12	27,24	21	5,39	32,5	31,5
13	27,23	12	4,72	33,5	33,3
14	7,98	11	2,45	13,6	8,9
15	12,42	36	6,20	16,3	13,1
16	19,46	24	4,54	21,2	18,0
17	25,00	21	5,17	26,7	24,1
18	25,88	9	6,17	31,4	30,7
19	29,62	8	2,59	33,1	32,9
20	10,78	6	3,31	17,5	14,0
21	19,03	29	6,49	22,1	19,1
22	19,71	21	5,17	27,4	26,0
23	26,15	10	3,48	30,6	29,4
24	25,65	2	3,69	32,7	32,5
25	28,04	9	2,69	28,9	25,8
26	25,86	19	3,67	30,8	29,4
27	27,33	4	3,75	32,8	32,5
28	31,40	5	1,64	32,5	30,5
29	32,20	5	2,85	32,8	32,2

Tabla 3: Parámetros estadísticos determinados por Guerrero et al (2004) y salinidad media obtenida con la versión del modelo con vientos de Punta Brava (versión PB) y con vientos de Pontón Recalada (versión PR), para cada cuadrante, para el período cálido y caudal fluvial medio.

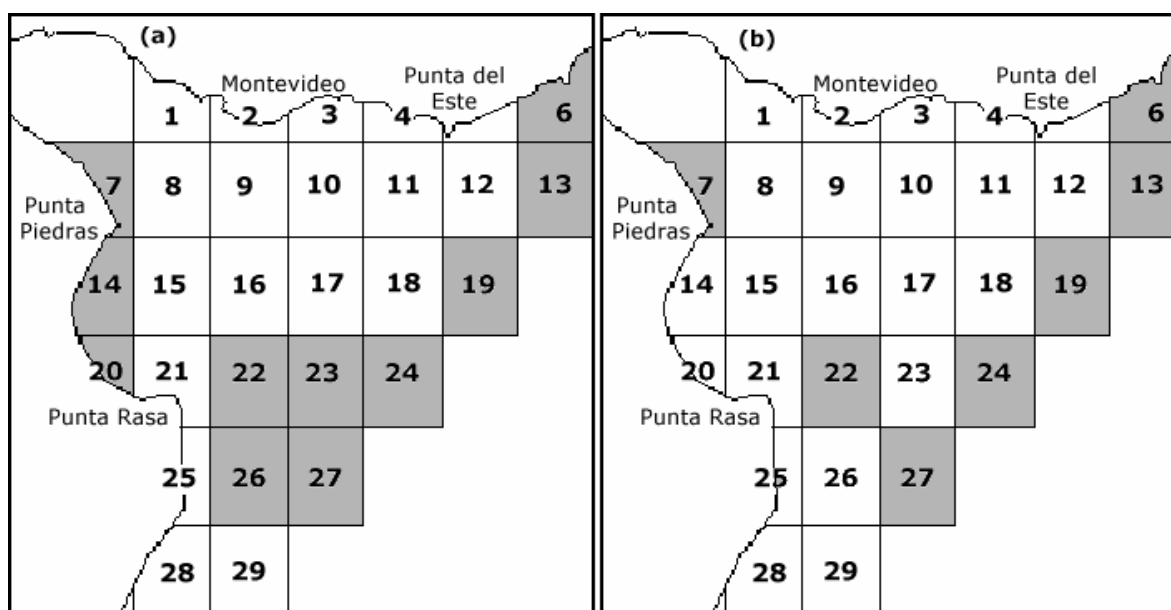


Figura 4: Distribución de los cuadrantes (marcados en gris) para el período cálido de 1999 en donde los valores medios obtenidos con (a) la versión de Punta Brava del modelo y (b) la versión de Pontón Recalada, no reproducen los valores obtenidos con los datos.

La distribución espacial de los cuadrantes bien representados y mal representados por el modelo se presenta en la Figura 4. Se observa en la misma que la versión de Punta Brava representa correctamente las salinidades medias en la zona costera uruguaya y la zona central estuarina del Río de la Plata. Por otro lado la versión de Pontón Recalada representa correctamente la región costera uruguaya, la región costera argentina y la zona central del Río de la Plata, obteniéndose resultados incorrectos sobre la parte exterior. Al comparar estos resultados con los obtenidos en el Capítulo 9 para el período cálido y caudal fluvial medio, presentados en la Figura 9.7, se observa que con la versión de Punta Brava la representación es igual, salvo en los cuadrantes 12 y 19, lo cual era previsible ya que las distribuciones medias de salinidad obtenidas con los dos métodos son muy similares. Como se mencionó anteriormente, con la versión de Pontón Recalada mejora la representación al simular el período cálido de 1999 y esto se observa al comparar las Figuras 4(b) y 9.7(b).

2.2 - Período Frío

Las curvas de isoconcentración de salinidad obtenidas con las dos versiones del modelo para el período frío del año 1999, consideradas como representativas del período frío, y su comparación con la distribución horizontal de salinidad obtenida con los datos, se presentan en la Figura 5. Se observa en la misma que la versión de Punta Brava del modelo representa rangos de salinidades medias para el período frío que coinciden con los datos solamente entre 15 y 20 ppm en la zona central del Río de la Plata y para salinidades mayores que 25 ppm en una zona cercana a la costa argentina. En la Figura 5(b) se observa que la versión de Pontón Recalada representa en cambio correctamente los rangos de variación de salinidad media hasta 15 ppm sobre la costa uruguaya y el rango de salinidades mayores a 25 ppm sobre la costa argentina. Al comparar estos resultados con las distribuciones de salinidad obtenidas en el Capítulo 9 correspondientes al período frío y caudal fluvial medio (Figura 9.12), se observa que con la versión de Punta Brava las distribuciones son diferentes principalmente sobre la costa uruguaya y que con la versión de Pontón Recalada las distribuciones son diferentes principalmente en la zona interior del río.

Si no se considera el cuadrante 19 como válido por tener solo un dato de salinidad, lo que dificulta la comparación con los resultados del modelo, se observa en la Tabla 4 que la versión de Punta Brava representa correctamente 17 de los 28 cuadrantes (61%) y la versión de Pontón recalada lo hace en 20 (71%). Por otro lado, en los cuadrantes 24, 26 y 27 las diferencias entre la salinidad media del cuadrante según los datos y según el modelo son pequeñas, menores a 2 ppm. En el Capítulo 9 se presentaron en la Tabla 9.7 los resultados obtenidos con la modelación para el período frío y caudal fluvial medio. En ese caso con la versión de Punta Brava el porcentaje de representación fue un 71% y con la versión de Pontón Recalada un 64%. Se observa entonces que al utilizar en la modelación los forzantes medios, con la versión de Punta Brava se obtuvo una mejor representación y que con la versión de Pontón Recalada una peor. No obstante los resultados no presentan grandes diferencias.

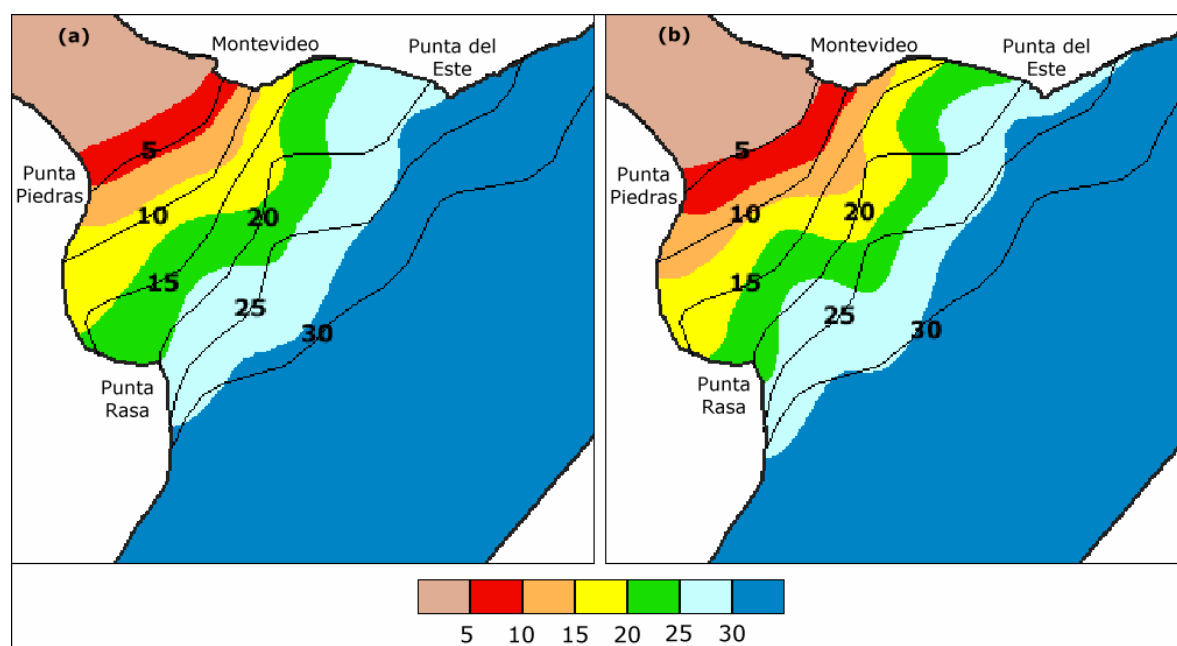


Figura 5: Comparación de las curvas de isoconcentración de salinidad (ppm) para el período frío de 1999 obtenidas con el modelo utilizando (a) vientos de Punta Brava y (b) vientos de Pontón Recalada, con la distribución correspondiente determinada por Guerrero et al (2004).

Nº Cuadrante	Parámetros estadísticos (Guerrero et al 2004)			Salinidad media modelo	
	Salinidad Media	Número Datos	Desviación Estándar	Versión PB	Versión PR
1	0,69	4	0,59	2,5	0,7
2	13,29	5	8,06	9,2	5,7
3	14,21	14	6,29	22,3	17,8
4	15,27	6	5,44	28,4	25,6
5	23,94	7	5,44	31,3	29,2
6	25,52	13	4,79	32,9	31,6
7	0,67	6	0,50	5,6	3,5
8	4,42	50	5,07	9,5	6,1
9	11,76	42	7,97	15,9	12,1
10	18,61	34	6,70	24,3	21,6
11	22,18	27	7,24	29,9	29,3
12	27,18	15	6,10	32,0	31,9
13	30,97	15	3,34	33,3	33,4
14	14,22	14	5,73	17,2	14,0
15	17,47	40	8,63	20,8	19,1
16	19,92	27	8,29	24,2	22,1
17	25,39	17	7,33	27,6	25,9
18	29,48	12	4,03	31,4	31,6
19	28,72	1	0,00	33,0	33,2
20	12,72	6	1,65	20,4	18,6
21	21,34	43	8,68	25,1	23,5
22	27,34	34	5,21	29,4	28,8
23	32,50	7	2,04	31,2	30,6
24	33,71	3	0,06	32,8	33,0
25	32,37	7	2,72	30,8	29,4
26	33,50	16	0,98	32,0	31,7
27	33,32	8	0,81	33,1	33,1
28	33,85	10	0,25	33,4	32,9
29	33,26	7	1,30	33,4	33,3

Tabla 4: Parámetros estadísticos determinados por Guerrero et al (2004) y salinidad media obtenida con la versión del modelo con vientos de Punta Brava (versión PB) y con vientos de Pontón Recalada (versión PR), para cada cuadrante, para el período frío y caudal fluvial medio.

En la Figura 6 se muestra la distribución espacial de los cuadrantes en donde no se representan los valores medios de salinidad determinados a partir de los datos de salinidad por Guerrero et al (2004). Se observa en la misma que ambas versiones del modelo representan en general correctamente la salinidad media en la zona central del Río de la Plata y que con la versión de Pontón Recalada la representación de la salinidad sobre la costa uruguaya es mejor que la representación obtenida con la versión de Punta Brava. Al comparar los resultados presentados en la Figura 6 con los presentados en la Figura 9.13 correspondientes al período cálido y caudal fluvial medio se observa que la representación en la costa uruguaya con la versión de Punta Brava es de menor calidad al simular el período frío de 1999 y que con la versión de Pontón Recalada los resultados son similares.

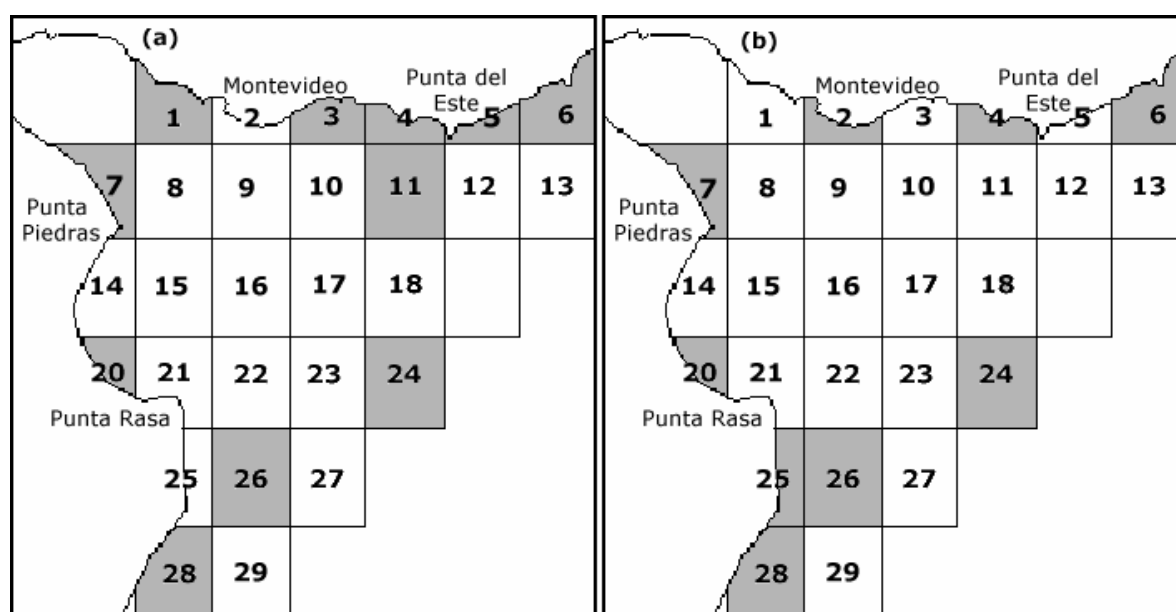


Figura 6: Distribución de los cuadrantes (marcados en gris) para el período frío de 1999 en donde los valores medios obtenidos con (a) la versión de Punta Brava del modelo y (b) la versión de Pontón Recalada, no reproducen los valores obtenidos con los datos.

3 - Distribución estacional del campo de corrientes residual

De forma similar a lo realizado en el Capítulo 9, se presentan a continuación los campos medios de corriente residual, determinados a partir de la modelación de los períodos cálido y frío del año 1999 con las dos versiones del modelo.

3.1 - Período Cálido

El campo de corrientes residual para el período cálido de 1999 se obtuvo promediando el campo de velocidades instantáneo de los meses de noviembre y diciembre de 1998, y enero, febrero y marzo de 1999. El resultado obtenido con las dos versiones del modelo se muestra en la Figura 7.

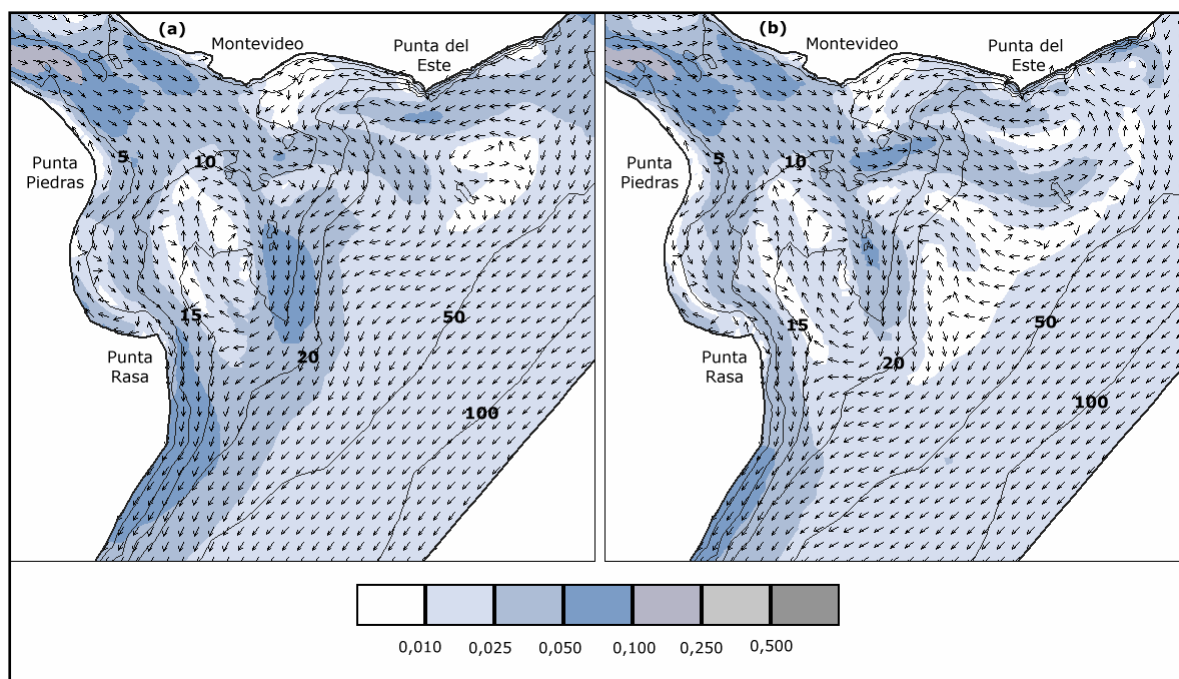


Figura 7: Campo de corrientes residuales (m/s) para el período cálido de 1999 obtenido con la versión del modelo de (a) vientos de Punta Brava y (b) vientos de Pontón Recalada.

El campo residual del período cálido con ambas versiones del modelo muestra un flujo saliente por la zona Sur del Río de la Plata que atraviesa la Bahía de Samborombón y un flujo saliente por la zona central del río que se desvía y sale por el Sur. Por otro lado se observan flujos entrantes por la costa Norte y por el Canal Marítimo, presentando el primero intensidades mayores que el segundo. Salvo en el Río de la Plata Intermedio las intensidades son menores a 10 cm/s. Existen pequeñas diferencias entre ambas versiones del modelo. Por ejemplo que con la versión de Punta Brava la intensidad del flujo entrante en general es mayor que la obtenida con la versión de Pontón Recalada. Al comparar estas características de la circulación residual media del período cálido de 1999 con las analizadas en 9.6.2 se observa que son similares, salvo que en este caso no se observa un flujo saliente por la costa uruguaya como se observó en los campos de corriente residuales presentados en la Figura 9.18.

3.2 - Período Frío

El campo de corrientes residual para el período frío de 1999 se obtuvo promediando el campo de velocidades instantáneo calculado con el modelo durante el período junio - setiembre de 1999. El resultado obtenido con las dos versiones del modelo se muestra en la Figura 8.

Para el período frío el campo residual obtenido a partir de la modelación de 1999 muestra una descarga por la zona Sur del Río de la Plata y un flujo saliente por la zona central, que a diferencia del período cálido, en su mayor parte descarga hacia el océano por la zona Norte del Río de la Plata. Por otro lado se observan flujos entrantes al río por el Canal Oriental en el tramo frente a la costa uruguaya entre Punta del Este y hasta casi Montevideo; y por el Canal Marítimo sobre la

parte central del Río de la Plata. La intensidad de la descarga por la zona Sur observada en el período frío es menor a la intensidad del flujo saliente en la misma zona que se observó para el período cálido. Con las dos versiones del modelo las intensidades máximas de corriente residual obtenidas son menores a 10 cm/s en todo el Río de la Plata. Al comparar estos resultados con los presentados en el Capítulo 9, en las Figuras 9.19(a) y 9.19(b), se observa que los campos de corrientes residuales determinados con los dos métodos son similares para ambas versiones del modelo.

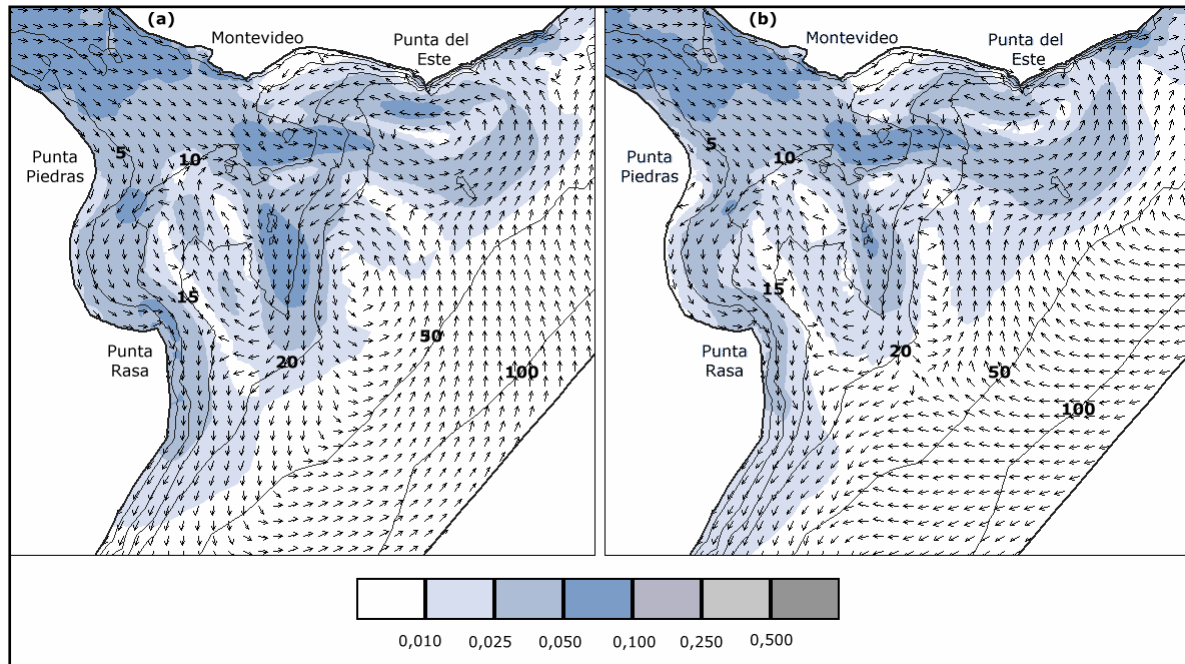


Figura 8: : Campo de corrientes residuales (m/s) para el período frío de 1999 obtenido con la versión del modelo de (a) vientos de Punta Brava y (b) vientos de Pontón Recalada.

AGRADECIMIENTOS:

- A Ismael, mi tutor y jefe, por el apoyo, consejos, enseñanzas y críticas que me ha brindado durante este trabajo.
- A la CAP de la Facultad de Ingeniería que me otorgó una beca para realizar la maestría.
- A todos los profesionales que participan del Proyecto Freplata, por toda la información suministrada y el apoyo que siempre me han manifestado.
- A todos los profesores de la Facultad de Ingeniería que participaron en los cursos de la maestría. En especial a los docentes del IMFIA: Eugenio Lorenzo, Rafael Guarga, Alvaro Acosta, Julio Borghi, Ismael Piedra-Cueva, Luis Silveira, Jorge de los Santos, Alejandro Oleaga, Luis Teixeira, José Cataldo y Rafael Terra; que dedicaron su tiempo para transmitirnos su conocimiento y experiencia.
- A todos mis compañeros de la maestría, en especial a Mariana, Coqué, Jime y Christian, por su aliento y apoyo constante.

**MODELACION BIDIMENSIONAL
DEL CAMPO SALINO EN EL RIO DE LA PLATA**