

Tesis de Maestría

Desarrollo de un sistema integrado mar-atmósfera para predecir la altura del Río de la Plata

Asikian, Vanesa A.

2008

Tesis presentada para obtener el grado de Magíster de la
Universidad de Buenos Aires en Ciencias Ambientales de la
Universidad de Buenos Aires

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en digital.bl.fcen.uba.ar. Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the Master's and Doctoral Theses Collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in digital.bl.fcen.uba.ar. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:

Asikian, Vanesa A.. (2008). Desarrollo de un sistema integrado mar-atmósfera para predecir la altura del Río de la Plata. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. http://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n4509_Asikian

Cita tipo Chicago:

Asikian, Vanesa A.. "Desarrollo de un sistema integrado mar-atmósfera para predecir la altura del Río de la Plata". Tesis de Magíster. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 2008. http://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n4509_Asikian

EXACTAS UBA

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales



UBA

Universidad de Buenos Aires

BIBLIOTECA CENTRAL
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS
Y NATURALES / UBA

Maestría en Ciencias Ambientales

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA INTEGRADO MAR-
ATMOSFERA PARA PREDECIR LA ALTURA DEL RIO
DE LA PLATA”**

Vanesa A. Asikian

DIRECTORA: Dra. Silvina Solman
Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera
(CIMA/CONICET-UBA)

79045

Septiembre 2008

A orillas del viento...

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a la Dra. Silvina Solman por haberme dirigido en este trabajo y al Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA) donde me dieron el espacio para desarrollar el mismo.

Al Dr. Mario Nuñez quien, mas allá de su indiscutible trayectoria científica-académica es una persona de gran corazón, siempre cerca de los becarios dispuesto a escuchar a todos quienes lo necesiten. Valoro, respeto y admiro profundamente eso. Gracias por dejarme ser parte de algo de lo que nunca me voy a olvidar, compartir el lugar de trabajo con meteorólogos, oceanógrafos y físicos fue para mi un verdadero lujo y placer, vos fuiste el gestor de esto.

Agradezco a la Agencia de Promoción Científica que aportó los fondos para financiar el proyecto. Al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), al Servicio de Hidrografía Naval (SHN) y el Instituto Nacional del Agua (INA) por proveerme los datos utilizados en este estudio. A la Dra. Claudia Simionato por su colaboración en las corridas del modelo hidrodinámico.

A Virna, a quien quiero agradecer formalmente en su total y completa ayuda a la hora de mis numerosas e incansables consultas. Grazie Mille!!!

Quiero agradecer también muy especialmente a Alfredo Rolla por su invaluable ayuda para correr el modelo, aportando sus amplios conocimientos y por sobre todas las cosas siempre con buena onda.

A mis amigas y compañeras becarias del CIMA: Vir, Fer, Jose, Naty y Lau con quienes compartí y disfruté cada momento, a quines consulté siempre todo antes de dar cada paso, así lo definen ellas, quiero decirles gracias por ayudarme a dar este gran paso!!! Gracias por aconsejarme y ser siempre tan compañeras!! A Diego y Moira los nuevos becarios, con quienes pasamos poco tiempo juntos pero fue suficiente para reconocer lo buenos que son, siempre con buena onda y contagiando entusiasmo!!

A toda la gente del CIMA con quienes compartí nutridas charlas en cada almuerzo, quiénes me hicieron sentir siempre en casa y en familia. Gracias!!

Agradezco a mi familia y amigos, por su constante apoyo!!! A todos muchas gracias!!

INDICE

Resumen.....	1
--------------	---

Capítulo 1

1.1	Características generales del estuario del Río de la Plata	3
1.2	Batimetría.....	5
1.3	Circulación estuarina.....	7
1.4	Circulación atmosférica.....	9
1.5	Motivación.....	11

Capítulo 2

2.1	Descripción general del Modelo Regional MM5.....	13
2.1.1	Elección del Dominio y resolución.....	15
2.2	Descripción general del Modelo hidrodinámico HamSOM.....	19
2.3	Periodos simulados.....	22
2.4	Diseño de simulaciones.....	22
2.4.1	Modelo Atmosférico MM5.....	22
2.4.2	Modelo Hidrodinámico HamSOM.....	24

Capítulo 3

3.1	Resultados MM5.....	28
3.1.1	Series Temporales.....	28
3.1.2	Campos de Circulación.....	36
3.1.3	Cálculos Estadísticos.....	59
3.2	Resultados HamSOM.....	67

Capítulo 4

Conclusiones.....	82
Referencias.....	87

RESUMEN

El Río de la Plata es un estuario ancho y poco profundo ubicado en la costa sudeste de Sudamérica, aproximadamente a 35°S. Es uno de los sistemas estuarios más importantes del mundo y la cuenca más desarrollada del este de Sudamérica.

El estuario del Río de la Plata es un sistema complejo que responde a un número de forzantes. Los tres más importantes, son la descarga continental, la marea astronómica y la atmósfera (viento y presión). La coincidencia de altas o moderadas pleamares con grandes ondas de tormenta inducidas atmosféricamente han causado catastróficas inundaciones en muchas áreas costeras, produciendo grandes daños económicos y materiales. Algunas partes bajas del litoral atlántico argentino son vulnerables a este tipo de fenómenos, en este caso la ciudad de Buenos Aires y otros sitios suburbanos ubicados sobre el margen derecho del Río de la Plata.

En este trabajo se propone la implementación de un modelo atmosférico de área limitada no hidrostático para el estuario del Río de la Plata que brinde los forzantes atmosféricos (presión, campos de viento, etc.) en alta resolución al modelo oceánico, con el fin de desarrollar un sistema de previsión a corto plazo del nivel del río para proporcionar alertas en el margen argentino del Río de la Plata.

El trabajo se desarrolló en el marco del proyecto PICT/2002 12246- "Estudio de la dinámica oceánica y atmosférica de Estuario del Río de la Plata mediante un sistema de modelado numérico integral", en el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA/CONICET-UBA).

Las simulaciones atmosféricas fueron realizadas utilizando el Modelo Regional MM5 (Fifth Generation Penn State University/NCAR, Mesoscale Model version 3.6), desarrollado por U.S National Center for Atmospheric Research (Grell et al., 1993) y adaptado en el CIMA para las condiciones geográficas locales. En este trabajo realizamos un anidado de tres dominios mediante la técnica de anidado unidireccional, el dominio de mayor tamaño cubre el cono sur de Sudamérica y se extiende sobre los océanos adyacentes, la resolución horizontal del dominio 1 es de 54 km. El dominio 2 tiene una resolución de 18 km, finalmente un tercer dominio con 6 km de resolución centrados aproximadamente en la zona del estuario del Río de la Plata.

Los periodos simulados fueron Junio y Julio de 1996, Agosto, Septiembre y Octubre del 2007. Utilizamos datos provenientes de estaciones meteorológicas de Argentina (Servicio Meteorológico Nacional, SMN) y datos provenientes de una Estación Davis Weather Monitor II (propiedad del CIMA) para verificar el funcionamiento del modelo MM5 y evaluar la capacidad de este en representar la componente zonal (u) y meridional (v) del viento a 10 m y presión en superficie. En términos generales el modelo acompaña satisfactoriamente las rotaciones del viento a 10 metros y esto se evidencia al comparar las series observadas con las modeladas.

Por otro lado, para evaluar la calidad de las simulaciones en reproducir los patrones de circulación de la escala sinóptica, comparamos los campos de viento en 10m y presión en superficie calculados por el modelo MM5 con los proporcionados por el reanálisis NCEP/NCAR.

Observamos que los campos de viento en 10 m y presión en superficie calculados por el modelo MM5 consiguen reproducir satisfactoriamente las características de circulación en capas bajas, siguiendo el forzamiento de la situación de gran escala. En general la dirección del viento está bien representada por el modelo en sus tres resoluciones, se logra así mejorar la resolución espacial del forzante atmosférico a través de la implementación del modelo Regional MM5.

De esta forma generamos los bordes en tres resoluciones para forzar el modelo hidrodinámico, las variables atmosféricas utilizadas para forzar el modelo hidrodinámico HamSOM fueron la componente zonal (u), y meridional (v) del viento a 10 m y presión en superficie. Se determinó la influencia del aumento en la resolución de los forzantes atmosféricos, al forzar el modelo hidrodinámico HamSOM, de esta forma, los campos de vientos que actuaron sobre la superficie del agua fueron generados a partir de los vientos modelados por MM5 en tres resoluciones (Dominio 1= 54 km, Dominio 2= 18 km y Dominio 3= 6 km). Denominamos corrida AAA, ABB y ABC a las simulaciones realizadas en el modelo HamSOM, corrida AAA el dominio 1 del MM5 provee forzantes atmosféricos a los tres dominios del modelo HamSOM, corrida ABB el dominio 1 del MM5 da los forzantes atmosféricos al dominio A del HamSOM, mientras que el dominio 2 del MM5 provee los forzantes al los dominios B y C del modelo HamSOM, corrida ABC el dominio 1 da los forzantes atmosféricos al dominio A del modelo HamSOM, el dominio 2 da los forzantes al dominio B del modelo hidrodinámico y finalmente el dominio 3 del MM5 da los forzantes atmosféricos al dominio C del HamSOM.

Utilizamos datos de altura del Río de la Plata en forma horaria, facilitados por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) para las estaciones Palermo y Oyarvide. Realizamos los cálculos entre los datos observados y los simulados con el modelo HamSOM al ser forzado con las distintas resoluciones del modelo atmosférico MM5.

Observamos que mientras las simulaciones logran reproducir correctamente la variabilidad temporal y la dirección de la elevación de la superficie del Río de la Plata, la intensidad de los eventos modelados con MM5 tiende a ser más débil que la observada. Esto sugiere que el modelo captura la dirección del viento pero subestima la intensidad. Por otro lado, al evaluar la sensibilidad del modelo hidrodinámico al aumento en la resolución de los forzantes atmosféricos no observamos diferencias significativas con las distintas resoluciones, pero si un mejor ajuste al comparar la utilización de los forzantes atmosféricos modelados con MM5, respecto del reanálisis NCEP. Esto indica que el modelo MM5 logra representar adecuadamente los eventos que determinan la elevación de la columna, indicando una (leve) mejora respecto de la utilización de NCEP como forzante atmosférico al modelo hidrodinámico.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Características generales del estuario del Río de la Plata y sus principales forzantes

El Río de la Plata es un estuario ancho y poco profundo, ubicado en la costa sudeste de Sudamérica, entre 34° y 36° 20' de latitud sur y 55° y 58° 30' de longitud oeste. Con un área estuarina de 35.000 Km² y un área de drenaje fluvial de $3,5 \times 10^6$ Km² que se extiende a través de Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay, se ubica en 5^{to} y 4^{to} lugar en el mundo en descarga de agua dulce y área de drenaje, respectivamente (Framiñan *et al.*, 1999), es uno de los principales sistemas fluvio-marítimos del mundo. Tiene forma de embudo con orientación noroeste-sudeste y longitud de 320 Km que se angosta de 220 Km hasta 40 Km en la parte superior (Balay, 1961; Nagy *et al.*, 1997). Con una profundidad media de 10 metros, descarga al Océano Atlántico un promedio de alrededor de 22.000 m³ s⁻¹, aunque se han registrado valores superiores a 50.000 m³ s⁻¹ bajo condiciones extremas (Jaime *et al.*, 2002). La descarga proviene fundamentalmente de dos de los ríos más importantes de América del Sur, los ríos Paraná y el Uruguay, cuyas descargas medias son de 16.000 y 6.000 m³ s⁻¹, respectivamente (Nagy *et al.*, 1997; Jaime *et al.*, 2002). De esta manera, más del 97% del ingreso de agua dulce al Río de la Plata proviene de los ríos mencionados mientras que el resto es aportado por ríos menores y arroyos a lo largo de ambas márgenes del estuario (Figura 1.1). El río Paraná presenta una estacionalidad marcada con el caudal medio mensual máximo en marzo o abril y el mínimo en septiembre. La estacionalidad del río Uruguay es menos evidente (Jaime *et al.*, 2002). Este sistema contribuye sustancialmente a los intercambios de nutrientes, sedimentos, carbono y agua dulce con el Océano Atlántico (Framiñan *et al.*, 1999), tiene importancias en las pesquerías costeras e influencia la dinámica costera hasta 23° S aproximadamente (Campos *et al.*, 1999; Framiñan *et al.*, 1999; Piola *et al.*, 2000). El estuario es también la principal fuente de agua dulce para millones de habitantes y es área de desove y cría para muchas especies costeras, varias de ellas de importancia económica (Cousseau, 1985; Boschi, 1988).



Figura 1.1: Cuenca del estuario del Río de la Plata con los principales ríos y afluentes menores que descargan en el mismo.

La Bahía Samborombón es uno de los humedales de condición natural más ricos, extensos y relevantes de la Argentina (Lasta, 1998; Canevari *et al.*, 1999). Un amplio reconocimiento de ello determinó su declaración como "Humedal de Importancia Internacional", declarada sitio RAMSAR en 1997. La Bahía Samborombón, comprende áreas protegidas de diferente categoría, jurisdicción y administración como: la Reserva Natural Integral, Costa de Bahía de Samborombon (9311 ha), la Reserva Natural Integral Rincón de Ajó (2312 ha), el Refugio de Vida Silvestre Campos del Tuyú (3500 ha) y la Reserva Municipal de Punta Rasa (520 ha).

Los humedales, tienen gran influencia en determinadas características del ambiente como: mitigar inundaciones y sequías, retener sedimentos y nutrientes, mantener una altísima biodiversidad, incluyendo especies raras y en peligro de extinción, controlar la erosión y proveer recursos alimenticios como la pesca. A pesar de los múltiples bienes y servicios que brinda el humedal, debido a la enorme cantidad de habitantes que pueblan

sus costas y al tráfico marítimo que presenta, el sistema está siendo impactado por acciones antropogénicas, cuyas consecuencias no han sido aun completamente evaluadas.



Figura 1.2: Áreas costeras Argentinas del Río de la Plata a) Río de la Plata Superior b) Río de la Plata Inferior

1.2. Batimetría

La geometría y batimetría que presenta el estuario del Río de la Plata son complejas. En cuanto a la morfología se lo ha dividido tradicionalmente en dos regiones: la parte superior y la inferior (Fig 1.2). Ambas están separadas por una zona somera con profundidades de alrededor de 7 metros, llamada Barra del Indio que atraviesa el estuario en la línea imaginaria Punta Piedras – Montevideo (Comisión Administradora

del Río de la Plata C.A.R.P., 1989). La región superior está caracterizada por áreas someras de 1 a 4 metros (Playa Honda y Banco Ortiz) separadas de la costa por canales más profundos de 5 a 8 metros (Canal Norte, Canal Oriental y Canal Intermedio). Hacia el este de la Barra del Indio se encuentra el Canal Marítimo, una zona ancha de depresión que separa la barra y la Bahía Samborombón del Alto Marítimo (Cavalloto, 1988; C.A.R.P., 1989). El Canal Marítimo, la Bahía Samborombón, el Alto Marítimo y la parte este del Canal Oriental son las principales características de la región inferior del estuario. El Canal Marítimo tiene una profundidad de entre 12 y 14 metros que crece hacia el sur alcanzando los 20 metros. El Canal Oriental se extiende a lo largo de la costa uruguaya, con una profundidad de hasta 25 metros en frente de Punta del Este, es el canal más profundo del estuario (Figura 1.3). El Alto Marítimo es una zona llana formada por los bancos Arquímedes, Inglés y Rouen (Cavalloto, 1989; C.A.R.P., 1989). El Banco Arquímedes y el Banco Inglés, son áreas someras de entre 6 y 8 metros de profundidad que dividen al flujo entre el Canal Oriental y el Canal Marítimo (Urien, 1967; C.A.R.P., 1989). La Bahía Samborombón, es un área somera con profundidad de entre 2 y 10 metros que se extiende desde Punta Piedras al norte hasta Punta Rasa al sur (Framiñan y Brown, 1996).

Resulta evidente que este ambiente mixohalino de alta biodiversidad y baja pendiente es vulnerable a la inundación. En los escenarios proyectados para el cambio climático global, la Bahía de Samborombon es un área muy comprometida de la costa bonaerense, debido a que el ascenso del nivel del mar provocarían, por un lado el avance del mar sobre un área plana, y el incremento del nivel de base para la descarga de los ríos Salado y Samborombon, así como de arroyos menores y canales artificiales construidos en la zona (Barros, 2004).

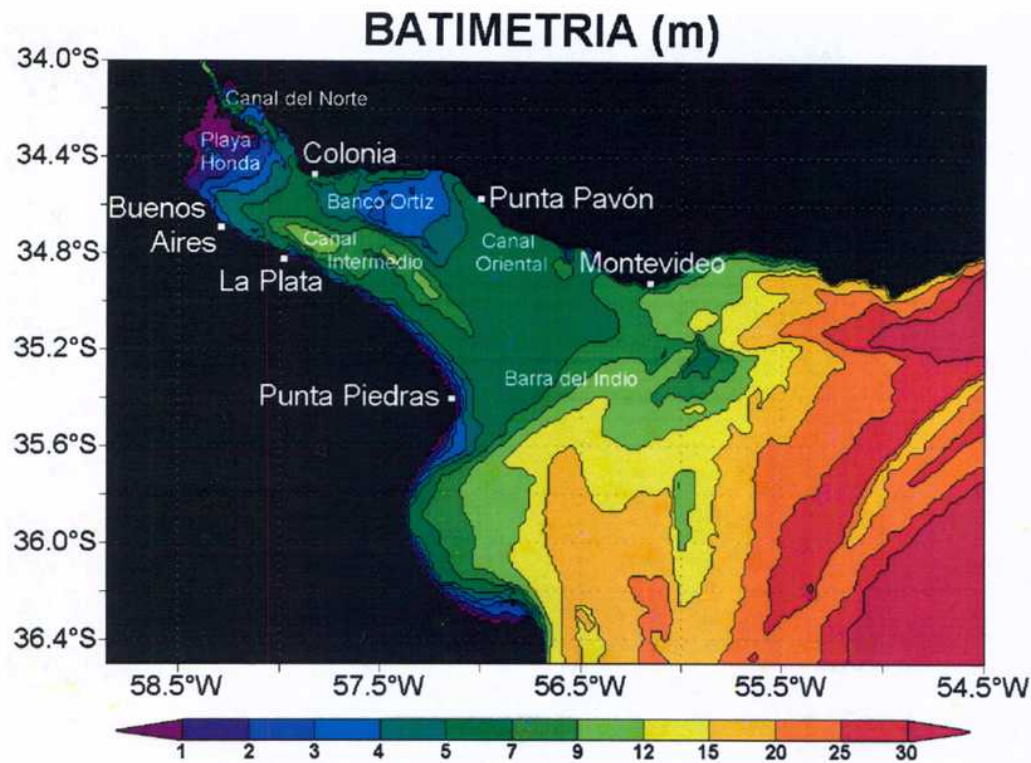


Figura 1.3: Batimetría del estuario del Río de la Plata con las principales características morfológicas (Simionato *et al.*, 2004b).

1.3 Circulación estuarina

El estuario es un sistema micromareal (amplitud de unas pocas decenas de centímetros). Las características geográficas modifican la propagación de la marea, de manera que la onda de marea alcanza el estuario principalmente por el sudeste (Simionato *et al.*, 2004a) y, a medida que disminuye la profundidad, la longitud de onda también disminuye. Esto, junto con la gran longitud del estuario hace que las componentes semidiurnas de marea tengan la inusual característica de completar una longitud de onda dentro del estuario en todo momento (C.A.R.P., 1989; Simionato *et al.*, 2004a). La amplitud de marea en general no se amplifica hacia el estuario superior; el estuario converge solo en la parte más interior, donde es extremadamente somero y la fricción de fondo juega un rol fundamental en controlar la amplitud (Framiñan *et al.*, 1999; Simionato *et al.*, 2004a).

La diferencia de altura de marea respecto de la marea astronómica, se llama “Onda de tormenta” y representa el efecto de las acciones meteorológicas. La ocurrencia simultánea de altura de marea moderada o alta con importantes ondas de tormenta, causaron históricamente inundaciones en muchas áreas costeras del estuario

produciendo daños materiales de gran envergadura (D'onofrio *et al.*, 1999). Algunos territorios bajos de la costa Argentina son especialmente vulnerables a este fenómeno. Éste es el caso de la ciudad de Buenos Aires y sus alrededores ubicada en la costa sur de la parte superior del Río de la Plata. La máxima altura de elevación de la superficie libre registrada en Buenos Aires desde 1905, ocurrió en el año 1940. Fortalecida por fuertes vientos del sector sudeste, se alcanzó una altura de 4,44 metros sobre el Datum, siendo la altura de marea superada por 3,18 metros (D'onofrio *et al.*, 1999). Más recientemente, en 1989 y 1993, la ciudad también experimentó inundaciones extremas. El nivel del mar alcanzó alturas de 4,06 y 3,95 metros sobre el Datum, siendo la marea predicha superada por 3,25 y 2,49 metros, respectivamente. Aunque estos eventos no son siempre tan extremos, son frecuentes, ocurriendo varias veces al año (D'onofrio *et al.*, 1999).

Pese a su gran importancia, hasta hace poco tiempo, no se conocía mucho sobre la circulación en el estuario del Río de la Plata y su variabilidad. Sin embargo, se realizaron varios intentos de simular numéricamente la circulación en el estuario del Río de la Plata. Molirari (1986), Albarracín (1987) y Olalde (1988) fueron los primeros que modelaron la marea en la región utilizando un modelo integrado en la vertical con un forzante de marea muy simple en la boca del estuario (Menéndez, 1985). Guarga *et al.* (1991) implementaron un modelo también integrado en la vertical pero forzado con 4 componentes de marea y un forzante atmosférico muy simple para estudiar las tormentas. La C.A.R.P. (1989) presentó el primer modelo hidrodinámico aplicado al Río de la Plata que incluyó el transporte de sedimentos. Etala (1995) fue la primera en implementar un modelo integrado en la vertical para pronosticar las ondas de tormenta en el Río de la Plata superior. Glorioso y Simpson (1994), Glorioso y Flather (1995, 1997), y Glorioso (2000) estudiaron la propagación de la marea en la plataforma patagónica mediante modelos barotrópicos bidimensionales y tridimensionales. O'Connor (1991), Vieira y Lanfredi (1996) y Simionato *et al.* (2004a) estudiaron en base a modelos numéricos la propagación de marea y ondas de tormenta. Tanto los datos como las simulaciones numéricas, sugieren al viento como el principal forzante de la dinámica estuarina (Framiñan y Brown, 1996; Simionato *et al.*, 2001, 2004a, 2005b, 2006a, 2006b).

1.4. Circulación atmosférica

La circulación general atmosférica en la región está controlada por el sistema de alta presión del Atlántico Sur. La circulación hacia el sudoeste asociada a esta alta, advecta aire cálido y húmedo de regiones subtropicales hacia el estuario (Minetti y Vargas, 1990). El viento a 10 metros de altura en la región presenta una marcada señal estacional; sin embargo gran parte de la varianza del viento se encuentra vinculada con variabilidad en la escala intra-anual y la variabilidad en escala interanual también es significativa (Simionato *et al.*, 2005a). El ciclo estacional del viento está dominado por la componente zonal (Simionato *et al.*, 2005a). Durante el verano, la dirección media del viento es del este-noreste siendo la responsable de la retracción hacia el sudoeste que se observa en el frente de salinidad superficial (Guerrero *et al.*, 1997). Durante el invierno, los vientos medios rotan hacia el oeste-noroeste, contribuyendo a la extensión hacia el norte del frente de salinidad superficial observada (Guerrero *et al.*, 1997; Framiñan *et al.*, 1999; Simionato *et al.*, 2001). Durante la primavera, el viento presenta un patrón similar al del verano aunque menos intenso, mientras que el otoño tiene una estructura de transición entre el verano e invierno con bajos valores medios de intensidad (Simionato *et al.*, 2005a). En la escala interanual se han reportado ciclos de variabilidad así como tendencias importantes en el viento de superficie tanto en invierno como en verano a lo largo de los últimos 40 años (Simionato *et al.*, 2005a). Estos cambios se vinculan con un desplazamiento de las condiciones de verano - invierno hacia meses más tempranos y un aumento en la intensidad del viento.

Se han detectado además, grandes picos de variabilidad intra-estacional en muchas variables atmosféricas, especialmente en verano. En particular, Nogues-Paegle y Mo (1997), Barros *et al.*, 2002, describen un patrón alternante de variabilidad intra-estacional que vincula anomalías de precipitación sobre el noreste argentino con las que ocurren en el sudeste brasileño y que se asocia con fuertes cambios en los vientos de superficie en ambas regiones. Finalmente, en la escala sinóptica, sistemas frontales fríos provenientes del sur traen masas de aire frío sobre la región con una periodicidad dominante de alrededor de cuatro días (Vera *et al.*, 2002). Como resultado, la característica dominante de los vientos en la región es una alternancia del noreste al sudoeste en una escala de pocos días. Por otro lado, el Río de la Plata está localizado en una de las regiones más ciclogénicas del mundo (Neco, 1982; Sinclair, 1994; Gan y Rao, 1991), asociado con ondas que se mueven a lo largo de latitudes subtropicales del Pacífico Sur y Sudamérica - con máxima variabilidad en períodos de 10 a 12 días - y

que interactúan con las masas de aire subtropical del noreste argentino, el Uruguay y el sudeste de Brasil (Gan y Rao, 1991, Vera *et al.*, 2002). Este fenómeno es conocido como Ciclogénesis del Litoral Fluvial Argentino y ocurre mayormente durante la primavera y el invierno (Seluchi, 1993). Cuando los ciclones se desarrollan sobre el Uruguay, pueden originar fuertes vientos del sudeste con velocidades que fácilmente exceden los 15 m s^{-1} (Seluchi, 1995; Seluchi y Saulo, 1996). Estas tormentas, conocidas como “Sudestadas” producen inundaciones en la parte superior del estuario (D’Onofrio *et al.*, 1999). Celemin (1984) compiló y describió las sudestadas que ocurrieron desde 1940 hasta 1982 y clasificó su intensidad de acuerdo a la intensidad del viento, cantidad de cielo cubierto y ocurrencia de precipitaciones. Ciappesoni y Salio (1997) realizaron el primer estudio sistemático de sudestadas y describieron campos de circulación asociados a la troposfera media para un periodo de cinco años (1990-1994). Escobar *et al.*, (2004) encontraron que crecidas en el Río de la Plata ocurren a lo largo de todo el año, siendo menos frecuentes en invierno, aunque este fenómeno no necesariamente está asociado con circulación ciclónica.

En resumen, podemos decir que el nivel del Río de la Plata es afectado por la intensidad y la persistencia del viento que determinan la onda de tormenta. Cuando el viento proviene del cuadrante este-sur en el Río de la Plata se define la sudestada meteorológica. Esta se calcula por la diferencia entre el nivel observado del Río de la Plata y la altura provocada por la marea astronómica. Durante el desarrollo de las sudestadas se produce un aumento y una disminución en los valores que definen la onda de tormenta y por consiguiente, un aumento seguido de una disminución del Nivel del Río de la Plata. De manera que, el viento ha demostrado ser la principal fuente de variabilidad estacional en el Río de la Plata (Guerrero *et al.* 1997; Framiñan *et al.*, 1999; Simionato *et al.*, 2001), superando por mucho el papel de la descarga de agua dulce en esta escala de tiempo (Simionato *et al.*, 2001).

1.5. Motivación

Aunque Argentina y Uruguay disponen de una red relativamente antigua y extensa de mediciones en zonas continentales, con excepción de la estación Pontón Recalada prácticamente no existen observaciones de vientos y presión atmosférica en el interior del Río de la Plata.

Los reanálisis NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996) constituyen un conjunto de información meteorológica que permite una adecuada representación del movimiento en la escala sinóptica. El uso de los reanálisis como forzante a un modelo hidrodinámico tiene algunas limitaciones. Su resolución espacial es de solo $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ (del orden de 200km) y se trata de una mezcla de observaciones directas y una predicción de un modelo de circulación general atmosférico. Mientras que en el Hemisferio Norte esta base resulta confiable, este hecho es poco claro para nuestro área de estudio. En primer lugar, pocos datos de radiosondeos entran en la base de reanálisis para el Hemisferio Sur, con grandes espacios sobre el océano. Solo la estación Ezeiza, es considerada en un radio de más de 700 km del Río de la Plata, generalmente con una frecuencia diaria. Por otro lado, como resultado de su baja resolución (250 km, casi la totalidad del estuario), el Río de la Plata es considerado como un punto seco (continente), en lugar de húmedo (océano). Las discusiones acerca de su calidad para el hemisferio sur se pueden encontrar en Simmonds y Keay (2000), Viale y Fernández (2006), entre otros. Sin embargo esta base también tiene ventajas, su resolución temporal es de 6 horas, tiene gran homogeneidad y duración temporal (del año 1948 al presente). No obstante, es evidente que aquellas regiones donde el forzante atmosférico es dominante, la baja resolución espacial de los reanálisis no permite capturar adecuadamente procesos que pueden tener gran efecto en variables oceánicas o estuarinas.

Como mencionamos anteriormente, el estuario del Río de la Plata es un sistema complejo que responde a un número de forzantes. Los más importantes, si bien no son los únicos, son la descarga continental, las mareas y la atmósfera. Por lo tanto estos forzantes deben incluirse en forma realista, de manera que la calidad de las simulaciones está fuertemente ligada al grado de conocimiento y la capacidad de determinación de los forzantes. En este sentido, estudiar la respuesta del modelo oceánico cuando es forzado por un modelo atmosférico de alta resolución y evaluar la sensibilidad del modelo oceánico a las distintas resoluciones de los forzantes atmosféricos, son algunas de las motivaciones del presente trabajo.

por un modelo atmosférico de alta resolución y evaluar la sensibilidad del modelo oceánico a las distintas resoluciones de los forzantes atmosféricos, son algunas de las motivaciones del presente trabajo.

En este trabajo se propone la utilización de un modelo atmosférico de área limitada no hidrostático para el estuario del Río de la Plata que brinde los forzantes atmosféricos (presión y campos de viento a 10 metros) en alta resolución, al modelo hidrodinámico. Esto permitirá desarrollar un sistema de modelado integral para el estudio de la dinámica del estuario y en particular una herramienta adecuada para pronóstico de la altura de la columna de agua en el estuario. El conocimiento previo de la elevación de la columna de agua permitirá realizar informes costeros para anticipar y minimizar los impactos que emergen, como inundaciones de áreas costeras, pérdidas en sectores de turismo, recreación, transporte, etc. De esta forma es posible realizar planes de evacuación, informes para la navegación, planes de gestión para minimizar los riesgos y mitigar las consecuencias sobre áreas potencialmente vulnerables como son la Ciudad de Buenos Aires y su área metropolitana. En este sentido, la motivación principal de este trabajo esta fuertemente vinculada con implementar y brindar una posible herramienta de gestión para el estuario del Río de la Plata.

2. MODELOS Y METODOLOGÍA:

2.1 Descripción general del Modelo Regional MM5:

Las simulaciones atmosféricas fueron realizadas utilizando el Modelo regional MM5 (Fifth Generation Penn State University/NCAR, Mesoscale Model version 3.6), desarrollado por U.S National Center for Atmospheric Research (Grell et al., 1993). Es un modelo de área limitada, incluye dinámica no-hidrostática, lo que permite utilizarlo con pocos kilómetros de resolución, y tiene capacidad de anidados múltiples.

Para determinar la configuración del modelo nos basamos en trabajos anteriores en los que se utilizó el modelo atmosférico MM5 en la región. Podemos citar algunos trabajos como, Menéndez et al. (2003, 2004) quienes realizaron una serie de experimentos destinados a probar la capacidad de MM5 en la representación de las condiciones climáticas el sur de Sudamérica. Solman et al. (2007) realizaron estudios para simular el clima actual en Sudamérica. Basados en la experiencia a través de estos trabajos se determinó la configuración del modelo para realizar las simulaciones.

En el presente trabajo la configuración del Modelo regional MM5 incluye, en los dominios de menor resolución (dominios 1 y 2), el esquema convectivo **Kain-Fritsch** (Kain and Fritsch, 1993). Esta configuración es similar al esquema Fritsch Chappell (Fritsch and Chappell 1980) y fue originalmente desarrollado para sistemas convectivos de mesoescala de latitudes medias. En el caso del dominio de mayor resolución (dominio 3) se utilizó el esquema convectivo **Grell** (Grell et al. 1993), este esquema está basado en un “cuasi-equilibrio” entre un esquema simple de nubes con flujos ascendentes y descendentes y movimientos compensatorios, determinando los perfiles de temperatura/humedad, es una simplificación del esquema de Arakawa Schubert (1974). La inestabilidad convectiva en este esquema es producida por la gran escala (escala resuelta por el modelo) y es disipada por la sub-escala (la escala del cúmulus) en una escala temporal τ , hasta alcanzar un cuasi-equilibrio entre la generación y la disipación de la inestabilidad.

Con el fin de analizar la sensibilidad del modelo a distintos esquemas de capa límite planetaria (CLP), realizamos una serie de simulaciones con el **Esquema de CLP Eta** (Janjic 1990, Janjic 1994) y el esquema **MRF o Hong-Pan** (Hong and Pan 1996) y evaluamos el comportamiento del modelo para representar el viento en 10 metros y la presión en superficie. Finalmente las parametrizaciones para la Capa Límite Planetaria se realizaron siguiendo el esquema **MRF o Hong-Pan**. Este es un esquema no-lineal de

primer orden, adecuado para altas resoluciones en la CLP (5 capas en los primeros kilómetros y capa de superficie menor a un espesor de 100m). Para la difusión vertical usa un esquema implícito que permite pasos más largos de tiempo. En el MM5, este esquema es usado para pronosticar el transporte vertical de cantidad de movimiento, la temperatura potencial, el agua de nube, la relación de mezcla, hielo y graupel.

Los procesos de superficie son representados por un modelo de suelo OSU/Eta Land Surface Model (LSM) (Chen y Dudhia 2001) de distintas categorías de suelos (tipo de vegetación, desierto, urbano, agua, hielo, etc). A cada celda en la retícula del modelo se le asigna una categoría, y ésta determina propiedades de la superficie tales como albedo, rugosidad, emisividad de onda larga, capacidad calorífica y disponibilidad de humedad. Este modelo de suelo es capaz de predecir la humedad del suelo y la temperatura en cuatro capas (10, 30, 60 y 100cm de espesor), como también la humedad en la canopia. Tiene en cuenta el escurrimiento y drenaje de agua, la evapotranspiración y los flujos de humedad en función del tipo de suelo y vegetación. Además utiliza una ecuación que permite determinar la temperatura de superficie.

Las tendencias de humedad se calculan con el esquema explícito de humedad, *Simple Ice* (Hsie et al. 1984). Este esquema agrega los procesos de la fase hielo al esquema *Warm Rain* (agua de nubes y precipitación predicha explícitamente a partir de procesos microfísicos), no se considera agua sobre enfriada, hay una fusión inmediata de la nieve debajo del nivel de congelamiento.

Para representar la radiación se considera el esquema *Cloud-radiation* (basado en Stephens (1978 y 1984) y Garand (1983)). Este es un esquema suficientemente sofisticado de manera de contar con las interacciones entre longitudes de onda larga y onda corta con nubes explícitas y aire claro. Determina las tendencias de temperatura atmosféricas y provee flujos radiativos de superficie.

El modelo interpola los niveles verticales de presión a 23 niveles sigma. Las superficies sigma en las cercanías del suelo “siguen” al terreno hasta 865 hPa (interpola en siete niveles), y en niveles altos tienden a aproximarse a superficies isobáricas.

2.1.1. Elección del Dominio y resolución

El modelo necesita ser alimentado con datos de un modelo global, que serán utilizados para inicializar y como condiciones de contorno. Para que la transferencia de información entre la escala mayor (sinóptica) y la regional (local) resulte eficaz, el modelo MM5 permite la utilización de mallas anidadas, lo que se conoce como técnica de “nesting”. De esta manera, se asegura que los campos de viento de alta resolución obtenidos para una región relativamente pequeña incluyan los efectos introducidos por estructuras orográficas no contenidas en el dominio de mayor resolución, pero que modifican de manera importante el régimen circulatorio. En la fig. 2.1 se presenta el esquema utilizado en este trabajo para realizar el anidado unidireccional en tres dominios.

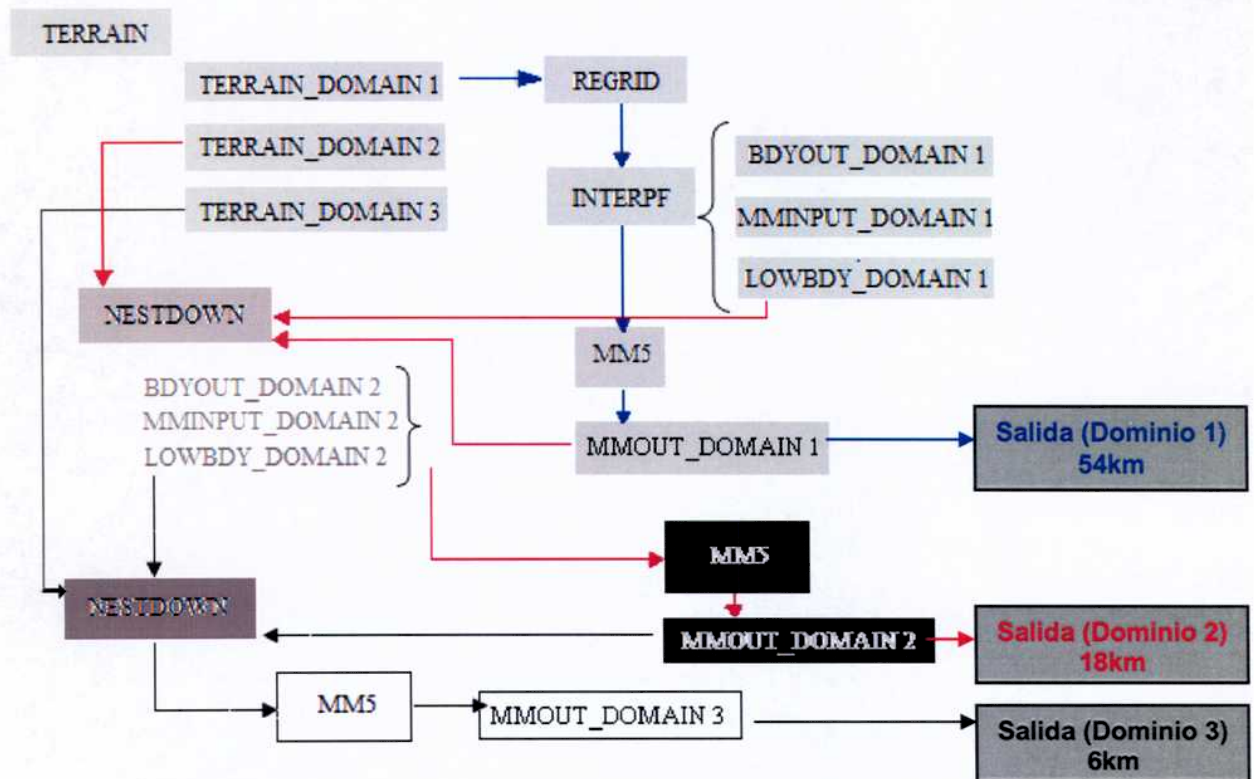


Fig. 2.1 -Esquema de anidado unidireccional MM5 utilizado: TERRAIN (define el dominio del modelo y la proyección; genera datos de categoría de terreno y uso del suelo en la retícula del modelo (LSM)). REGRID (genera una primera aproximación de los campos en niveles de presión de la retícula del modelo a partir de datos provenientes de otro modelo). INTERPF (Interpola los datos en niveles de presión a la coordenada sigma del modelo). NESTDOWN se utiliza para realizar anidados múltiples (genera una malla de entrada al modelo “de alta resolución” a partir de una malla de salida del modelo “de menor resolución”). En este caso trabajamos con tres dominios anidados: Dominio 1 (54km), Dominio 2(18km) y Dominio (6km) de resolución.

En condiciones ideales, el dominio debería ser suficientemente grande para permitir el desarrollo la circulación de mesoescala y para poder incluir los forzantes regionales. En este sentido enfrentamos algunos problemas, por un lado el costo computacional dado que un incremento de tamaño del dominio representa un incremento en tiempo de procesamiento (número de puntos de la retícula). Por otro lado, en aquellas regiones donde el forzante atmosférico es dominante sobre la dinámica oceánica, la baja resolución de reanálisis (250 km) no permite capturar adecuadamente los procesos de mesoescala que pueden tener importantes efectos en las variables oceánicas. Lo que indica junto con la necesidad de una buena definición de la línea de costa, la importancia del aumento en la resolución de los forzantes atmosféricos.

Podemos lograr el aumento en la resolución del modelo a través de anidados múltiples. Para esto, utilizamos un módulo del MM5 que genera una malla de entrada al modelo “de alta resolución” a partir de una malla de salida del modelo “de menor resolución”.

En la aplicación concreta que se presenta en este trabajo, se realizó un anidado de tres dominios mediante la técnica de anidado unidireccional, donde no hay retroalimentación hacia las escalas mayores a través de los bordes.

El dominio de mayor tamaño cubre el cono sur de Sudamérica y se extiende sobre los océanos adyacentes, con el fin de evitar que los bordes laterales estén ubicados sobre la región de interés. La resolución horizontal del dominio 1 es de 54 km y tiene un total de 112 puntos de retícula (este-oeste) x 112 (norte-sur) (fig.2.2). El dominio 2 tiene una resolución de 18 Km. y al igual que el domino anterior posee 112 puntos de retícula en ambas direcciones. Finalmente un tercer domino con 6 km de resolución y 112 puntos de retícula (este-oeste) x 100 (norte-sur). En la fig. 2.3 se pueden observar los dominios de mayor resolución para el modelo atmosférico MM5 con retículas de 18 y 6 km, centrados aproximadamente en la zona del estuario del Río de la Plata, donde resulta de particular interés la definición de línea de costa.

En cada dominio se seleccionaron paquetes de datos de terreno y vegetación para las distintas resoluciones, estas fueron: 19 km para el dominio 1, 9km para el dominio 2 y 4km para el dominio 3, de mayor resolución. Las propiedades del suelo y vegetación se obtuvieron a partir de la base de datos USGS (vegetación y uso de la tierra).

La elección de los dominios, se definió teniendo en cuenta el sistema integrado de modelado utilizado en este trabajo, que involucra el modelo atmosférico MM5 y el modelo hidrodinámico HamSOM. Las dimensiones de los dominios del modelo atmosférico, en este caso deben ser de mayor tamaño que los dominios utilizados en el modelo oceánico, dado que el MM5 aportó los forzantes atmosféricos de viento en 10 m y presión en superficie al modelo hidrodinámico.

Analizamos la sensibilidad al dominio de modelado, en este sentido realizamos una serie de experimentos para definir los dominios. En primer lugar corrimos el borde oeste del dominio 1 con el fin de evitar que este se ubique sobre topografía compleja y extendimos el borde sur, de forma que permita la circulación de gran escala (resultados no presentados). Por otro lado extendimos los Dominios, para dar espacio al modelo hidrodinámico que será forzado con los datos obtenidos por el modelo atmosférico. Finalmente se logro la configuración presentada para realizar el anidado y aportar los forzantes al modelo HamSOM.

El MM5 requiere condiciones iniciales y condiciones de borde lateral, para la componente zonal y meridional del viento, temperatura, humedad relativa, altura geopotencial y presión de superficie. En este estudio las condiciones iniciales y de borde para el modelo atmosférico, fueron interpoladas a partir de los datos de los reanálisis NCEP/NCAR, los que cuentan con una resolución espacial de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ (del orden de 250 Km.). Estos campos fueron incorporados al modelo regional MM5 con un intervalo de 6 horas, a lo largo de una zona de transición lateral en la cual se interpolan las condiciones de borde laterales. La temperatura de la superficie del mar (SST) fue provista de la base de datos OISST dataset (Reynolds et. Al. 2002).

El anidado unidireccional permite así resolver procesos de escala menor como resultado de la interrelación entre el flujo de gran escala (provisto por las condiciones de borde laterales) y las características de escala pequeña asociadas a las inohomegeidades de la superficie (topografía, distribución de continente-oceano, uso de suelo).

Las diferencias entre el MM5 y el modelo que provee las condiciones de borde laterales se debe principalmente a las diferencias en la representación de las características de la superficie y a diferencias en la representación de sub-escala.

Si la diferencia en el flujo de gran escala en el dominio del modelo regional y el modelo que provee las condiciones de borde lateral es grande, la solución de la simulación regional será inconsistente con el forzante.

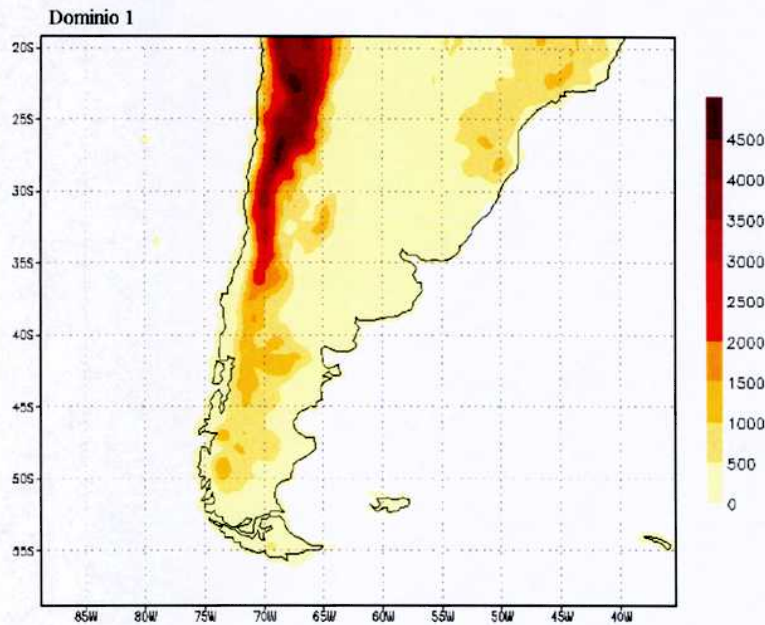


Figura 2.2: Dominio 1 del modelo atmosférico MM5, el dominio tiene una resolución de 54 km. En colores se observa la topografía.

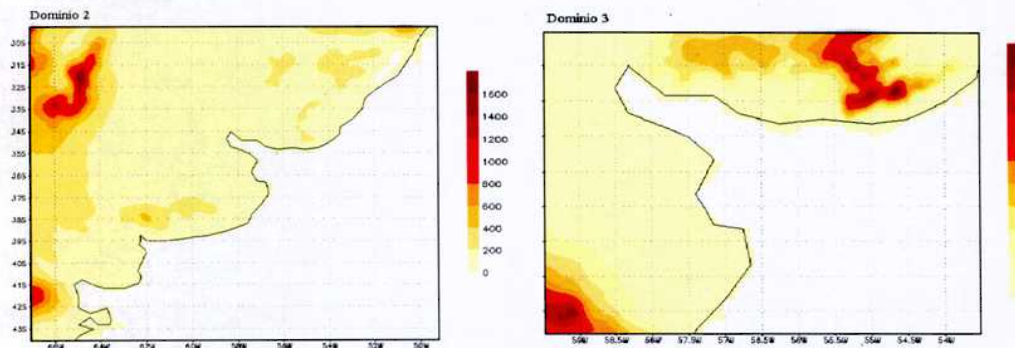


Figura 2.3: Dominios 2 y 3 del modelo atmosférico MM5, los dominios tienen una resolución de 18 Km. y 6 Km. respectivamente, en colores se observa la topografía de cada dominio y la definición de línea de costa según el modelo.

2.2. Descripción general del Modelo hidrodinámico HamSOM:

El modelo HamSOM (Hamburg Shelf Ocean Model) fue desarrollado por Backhaus (1983; 1985) en el Institut für Meereskunde (IfM) de Hamburgo, Alemania. Ha sido aplicado a diversas cuencas del planeta, demostrando ser muy robusto para describir la dinámica asociada a las plataformas continentales (Backhaus y Hainbucher, 1987; Rodríguez *et al.*, 1991; Stronach *et al.*, 1993; Rodríguez, 1998; Simionato *et al.*, 2001, 2004a, 2004b, 2006a). Este modelo fue descripto en muchas publicaciones (Backhaus, 1983, 1985; Backhaus y Hainbucher, 1987; Rodríguez y Alvarez, 1991; Rodríguez *et al.*, 1991; Stronach *et al.*, 1993; Alvarez *et al.*, 1997).

La circulación barotrópica en el estuario del Río de la Plata está forzada por la marea, la descarga continental y el forzante atmosférico (viento y presión atmosférica). En cuanto a la descarga continental, en este trabajo, el modelo fue forzado con datos medios mensuales de descarga provistos por el Instituto Nacional del Agua (INA). Cada valor de estas series ha sido calculado promediando a lo largo de un dado mes los valores diarios de caudal. A su vez, cada valor diario surge de transformar a caudal una única lectura de escala, mediante una curva de descarga propia de la sección. Este cálculo se actualiza periódicamente (Borús *et al.*, 2007).

El modelo HamSOM funciona como un conjunto de dominios anidados unidireccionalmente, en el cual el estuario se alcanza a través de tres dominios de diferentes escalas. El Dominio A, de mayor escala, cubre el área que se extiende entre 56,5° S y 23,5° S y 69,5° W y 45,5° W. La resolución horizontal es constante y de 20' en la dirección zonal y 15' en la meridional, respectivamente, lo que representa aproximadamente 27 Km. En la vertical se emplean diez capas en coordenada z, cuyos fondos se encuentran en 10, 20, 40, 60, 100, 200, 500, 1000, 3000 y 6000 metros. La profundidad mínima permitida, a fin de evitar el vaciado de capas es de 5 metros. El Dominio A proporciona condiciones de contorno de elevación de la superficie libre (incluyendo tanto la marea como el efecto del viento) cada media hora a un dominio de mayor resolución del Río de la Plata y la Plataforma Continental Argentina, el Dominio B. Este dominio cubre la región entre 42,0° S y 31,4° S, y 61,5° W y 51,5° W, con resoluciones constantes en las direcciones zonal y meridional de 6,66' y 5', respectivamente lo que representa aproximadamente 9 Km. En este caso se utilizan 13 niveles verticales, con fondos en 7, 10, 15, 20, 40, 60, 100, 150, 250, 500, 1000, 3000 y 5500 metros. La profundidad mínima permitida en este caso es de 4 metros.

Aunque la profundidad de la primera capa es demasiado alta para resolver apropiadamente las regiones someras del Río de la Plata, se seleccionó suficientemente profunda para resolverla en la parte sudoccidental del dominio del modelo, donde las amplitudes de marea son grandes. Finalmente, el Dominio B proporciona condiciones de contorno cada media hora al Dominio C de mayor resolución del Río de la Plata (Fig. 2.4). Este dominio cubre la región entre $36,5^{\circ}$ S y $34,0^{\circ}$ S y $59,0^{\circ}$ W y $54,5^{\circ}$ W, con resoluciones horizontales zonal y meridional de $1,8'$ y $1,5'$, respectivamente representando 3 Km aproximadamente. Este dominio tiene 13 capas verticales con fondos en 3, 4, 6, 8, 10, 14, 18, 22, 26, 30, 35, 45 y 55 metros. La elección de estos niveles permite una buena resolución vertical aún en las zonas muy someras del Río de la Plata superior. La profundidad mínima permitida en este dominio es de 3 metros. Una ventaja de utilizar un modelo multicapas aun cuando la densidad se mantiene constante es permitir una mejor representación de la fricción de fondo.

Los análisis de sensibilidad al dominio de modelado realizados por Simionato *et al.* (2006a) indicaron que una mejora en las simulaciones se logra cuando el dominio se extiende hasta el sur de la Patagonia, indicando que el Río de la Plata es sensible a la gran escala atmosférica. Esto es consistente con el sentido de propagación de las ondas de Kelvin atrapadas en la costa, forzadas por el viento, que viajan hacia el norte a lo largo de la costa argentina, entrando al estuario por el sur. Este último resultado implica un costo computacional mayor para lograr una mejora en las simulaciones que será asumido en este caso.

Por otro lado, aunque los modelos globales de marea tienen suficiente grado de desarrollo como para proveer aproximaciones muy adecuadas (Le Provost *et al.*, 1995, 1998), tienen muy baja resolución espacial lo que no permite una buena representación en la Plataforma Continental Argentina, conocida como una de las áreas de mayor disipación y resonancia de esta onda en el mundo (Andersen *et al.*, 1995; Glorioso y Flather, 1997; Simionato *et al.*, 2004a). Por lo tanto, el forzante de marea debe ser introducido lo más lejos posible de la plataforma procurando no atravesarla. Esto se hace en el modelo de mayor escala (Dominio A).

Se utilizaron con este fin las amplitudes y fases de las componentes armónicas derivadas del modelo global de mareas de Zahel (1997) que asimila observaciones de altura de la superficie libre del mar provenientes del altímetro de la misión Topex/Poseidón. Se utilizó una rutina de interpolación bilineal para convertir las soluciones del modelo de Zahel (1997) a amplitudes y fases en los bordes abiertos del Modelo A. Se incluyeron en las simulaciones las ocho componentes de marea más importantes a fin de asegurar la calidad de las condiciones de borde que se aplican a los dominios B y C de mayor resolución.

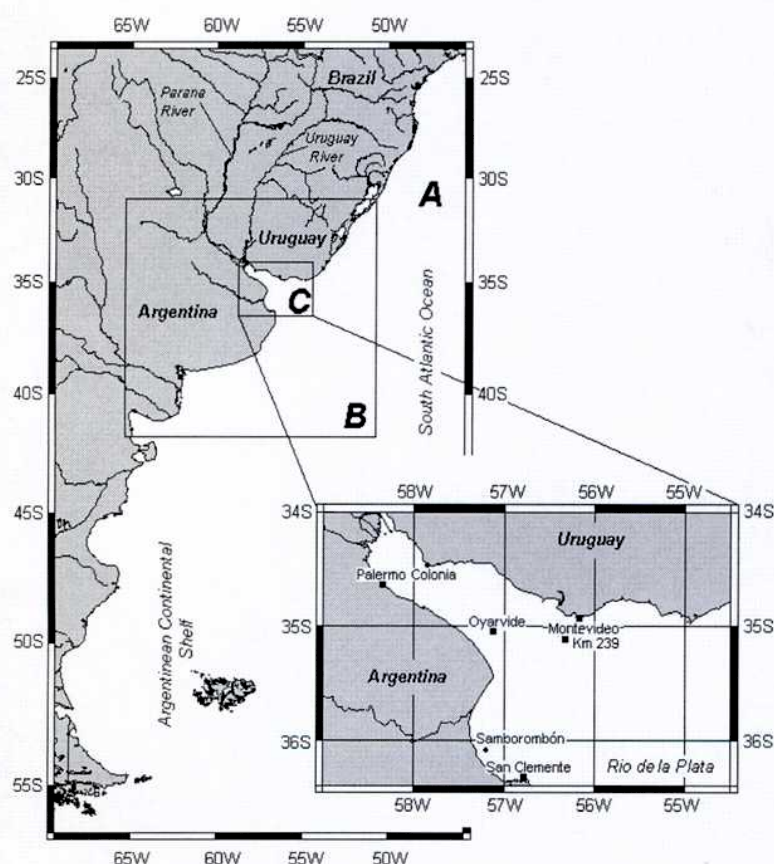


Figura 2.4: Dominios anidados utilizados en el modelo hidrodinámico HamSOM/CIMA. El Dominio A, de menor resolución (aproximadamente 27Km), proporciona condiciones de contorno a un dominio de mayor resolución, Dominio B (9km aprox.). El dominio B, proporciona las condiciones de borde a un tercer dominio de mayor resolución del Río de la Plata, Dominio C (3km aprox.)

El ajuste de los parámetros del modelo, fricción de fondo y difusión lateral y vertical, así como detalles en la batimetría tales como la definición de la línea de costa, la realizaron Simionato *et al.* (2004a), utilizando los tres dominios anidados.

2.3. Periodos simulados

Los periodos seleccionados para realizar las simulaciones numéricas fueron Junio y Julio de 1996; Agosto, Septiembre y Octubre del 2007. En el caso del periodo 1996, este fue seleccionado debido a que fue analizado previamente por Simionato et. al. (2006). El segundo periodo simulado, correspondiente al año 2007, fue seleccionado en base a los datos obtenidos en la estación meteorológica del CIMA, ubicada en el muelle del Club de Pescadores de la Costanera Norte de Buenos Aires, donde se consideraron los casos donde la dirección del viento se encontraba en el cuadrante (E-S) y se tomo en cuenta tanto la persistencia como la intensidad del viento en dicho cuadrante.

2.4 Diseño de simulaciones

2.4.1 Modelo Atmosférico MM5

Las simulaciones fueron realizadas reiniciando el modelo cada 6 días y descartando los primeros tiempos de cada corrida. Esto es debido a que el modelo necesita un tiempo para estabilizarse, periodo conocido como spin-up. Luego concatenamos todas las corridas y de esta forma completamos el periodo en estudio. En el caso de junio y julio de 1996 los dos meses fueron simulados con un total de 11 corridas concatenadas, para cada Dominio (1, 2 y 3). Para el periodo 2007, se realizaron un total de 16 corridas para cada dominio, de esta manera se completo el periodo correspondiente a los meses de agosto, septiembre y octubre.

Generamos los bordes para forzar el modelo hidrodinámico, las variables atmosféricas necesarias para forzar al modelo HamSOM son la componente zonal y meridional (u , v) del viento a 10 m y presión en superficie. En la sección siguiente detallaremos la metodología utilizada en el modelo hidrodinámico HamSOM, donde las distintas resoluciones del MM5 funcionaron como forzantes atmosféricos.

Para realizar un análisis cuantitativo del funcionamiento del modelo MM5 y evaluar la capacidad de este en representar las variables analizadas, utilizamos datos provenientes de estaciones meteorológicas de Argentina (Servicio Meteorológico Nacional, SMN) y datos provenientes de una Estación Davis Weather Monitor II (propiedad del CIMA) ubicada en el muelle del Club de Pescadores de la Costanera Norte de Buenos Aires (Fig.2.5). Trabajamos con 4 datos diarios (datos cada 6 horas), estos fueron 0hs, 6hs, 12hs y 18hs hora UTC. Extrajimos las series temporales correspondientes a los puntos

más cercanos de la retícula del modelo al punto de estación, de esta forma realizamos la comparación entre los datos observados y los modelados con MM5 para ese punto.

Calculamos el error medio absoluto, el sesgo (BIAS) y la correlación definidos por Pielke (1984). Estos estadísticos permiten medir la precisión de la simulación, es decir el grado de correspondencia entre los pares de valores modelados y valores observados. El BIAS proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable, cuantifica el error sistemático del modelo. De esta forma realizamos los cálculos entre los valores modelados y observados para cada hora, teniendo en cuenta la evolución temporal y analizamos el comportamiento del modelo durante toda la simulación, a continuación se presenta la formula correspondiente al cálculo del BIAS (ϕ_i es el valor modelado para el punto de retícula i , ϕ_{iobs} es el valor observado y N es el número de valores analizados).

$$BIAS = \sum_{n=1}^N \frac{(\phi_i - \phi_{iobs})}{N}$$

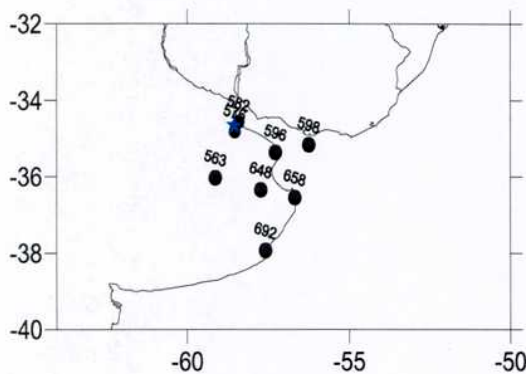


Figura 2.5: Estaciones Meteorológicas utilizadas para la validación del modelo atmosférico MM5.

Nº de Estación Meteorológica	Nombre Estación Meteorológica	Latitud (S)	Longitud(W)
87598	Ponton Practicos Recalada	-35.17	-56.25
87658	Santa Teresita Aero	-36.55	-56.68
87596	Punta Indio	-35.37	-57.28
87692	Mar del Plata Aero	-37.93	-57.58
87648	Dolores Aero	-36.35	-57.73
87563	Las Flores Aero	-36.03	-59.13
87582	Aeroparque Buenos Aires	-34.57	-58.42
87576	Ezeiza Aero	-34.82	-58.53
★	Estación Palermo (CIMA)	-34.66	-58.55

Tabla 2.1: Estaciones Meteorológicas utilizadas para la validación del modelo atmosférico MM5.

Realizamos un control de calidad de los datos para detectar posibles datos erróneos o datos faltantes, de esta forma ordenamos las series temporales provenientes del Servicio Meteorológico Nacional, seleccionamos 4 datos diarios correspondientes a las 00, 06, 12 y 18 hora UTC. Los cálculos fueron realizados para la salida del modelo y estaciones, así como también para datos de reanálisis NCEP/NCAR y estaciones.

2.4.2 Modelo Hidrodinámico HamSOM

Para evaluar la sensibilidad del modelo oceánico al aumento en la resolución de los forzantes atmosféricos, realizamos las simulaciones del modelo HamSOM utilizando como forzantes atmosféricos la componente zonal (u) y meridional (v) del viento en 10 m y presión en superficie, provenientes de las salidas del modelo atmosférico MM5 en tres resoluciones (54, 18 y 6 km). Con el fin de comparar la mejora en la respuesta de modelo HamSOM a las distintas resoluciones de los forzantes atmosféricos modelados, también realizamos simulaciones utilizando como forzantes atmosféricos los reanálisis NCEP/NCAR y NCEP/NCAR con un factor de corrección para los vientos.

Una minuciosa validación del modelo HamSOM forzado con los vientos a 10 m y presión atmosférica de los reanálisis de NCEP/NCAR fue realizada por Simionato *et al.* (2006a). Estos autores analizaron la capacidad del modelo de reproducir las corrientes y alturas observadas bajo situaciones normales y condiciones atmosféricas extremas. Ellos encontraron que el reanálisis NCEP/NCAR, representa adecuadamente la dirección del viento, pero subestima la intensidad del mismo. De manera que para obtener valores representativos de las observaciones en las simulaciones, los autores utilizan un factor de corrección para los vientos de NCEP/NCAR con un valor que varía de 2 a 1 para vientos débiles a fuertes, respectivamente (fig .2.6)

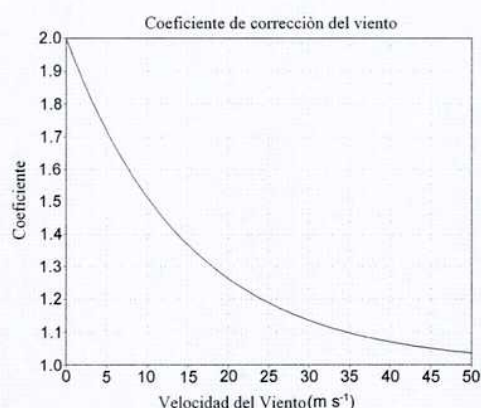


Figura 2.6: Coeficiente de corrección aplicado a la intensidad del viento de reanálisis NCEP/NCAR (Simionato, *et. al.*, 2006)

Las simulaciones del modelo HamSOM fueron diseñadas teniendo en cuenta la resolución del forzante atmosférico que utilizamos en cada corrida. La tabla 2.2, muestra una simplificación del diseño de las corridas para el modelo HamSOM, cuando utilizamos como forzantes atmosféricos datos modelados por el MM5 en distintas resoluciones. Llamamos corrida AAA cuando el modelo HamSOM es forzado con la salida del Dominio 1 del MM5, en este caso datos modelados por el MM5 con una resolución de 54 km proveen los forzantes atmosféricos a los tres dominios anidados del modelo hidrodinámico. Corrida ABB cuando el dominio 1 del MM5, provee los forzantes atmosféricos al dominio A del modelo HamSOM, mientras que los dominios B y C del HamSOM son forzados con la salida del Dominio 2 del MM5. En este caso utilizamos distintas resoluciones para forzar el modelo hidrodinámico, para el dominio de mayor tamaño utilizamos el forzante atmosférico modelado por el MM5 con una resolución de 54 km, mientras que los dominios restantes del HamSOM fueron forzados con datos atmosféricos modelados con una resolución de 18 km.

Por último, llamamos ABC cuando el dominio 1 del MM5 da los forzantes al dominio A del modelo HamSOM, el dominio 2 del MM5 proporciona los forzantes atmosféricos al dominio B del modelo hidrodinámico, mientras que el dominio 3 del MM5 provee los forzantes atmosféricos al dominio C del modelo Hidrodinámico. En este caso utilizamos el viento en 10 m y presión en superficie modelados por el MM5 en sus tres resoluciones para proveer los forzantes atmosféricos al modelo hidrodinámico. En la Tabla 2.2 se sintetizan los experimentos que fueron realizados para el modelo HamSOM al ser forzado con distintas resoluciones del forzante atmosférico modelados con MM5.

HamSOM (Dominios)	FORZANTES ATMOSFERICOS (proporcionados por el modelo atmosférico MM5)		
DOMINIO A (27km)	DOMINIO 1 (54km)	DOMINIO 1 (54km)	DOMINIO 1 (54km)
DOMINIO B (9km)	DOMINIO 1 (54km)	DOMINIO 2 (18km)	DOMINIO 2 (18km)
DOMINIO C (3km)	DOMINIO 1 (54km)	DOMINIO 2 (18km)	DOMINIO 3 (6km)
CORRIDAS	↓ AAA	↓ ABB	↓ ABC

Tabla 2.2: Experimentos realizados para estudiar la sensibilidad del modelo hidrodinámico HamSOM a las distintas resoluciones del forzante atmosférico proporcionados por el MM5.

En todos los casos, los resultados que se muestran y analizan son los del dominio de mayor resolución (Dominio C) del modelo HamSOM. La fig 2.7 se observa un esquema con la metodología utilizada para cada una de las simulaciones.

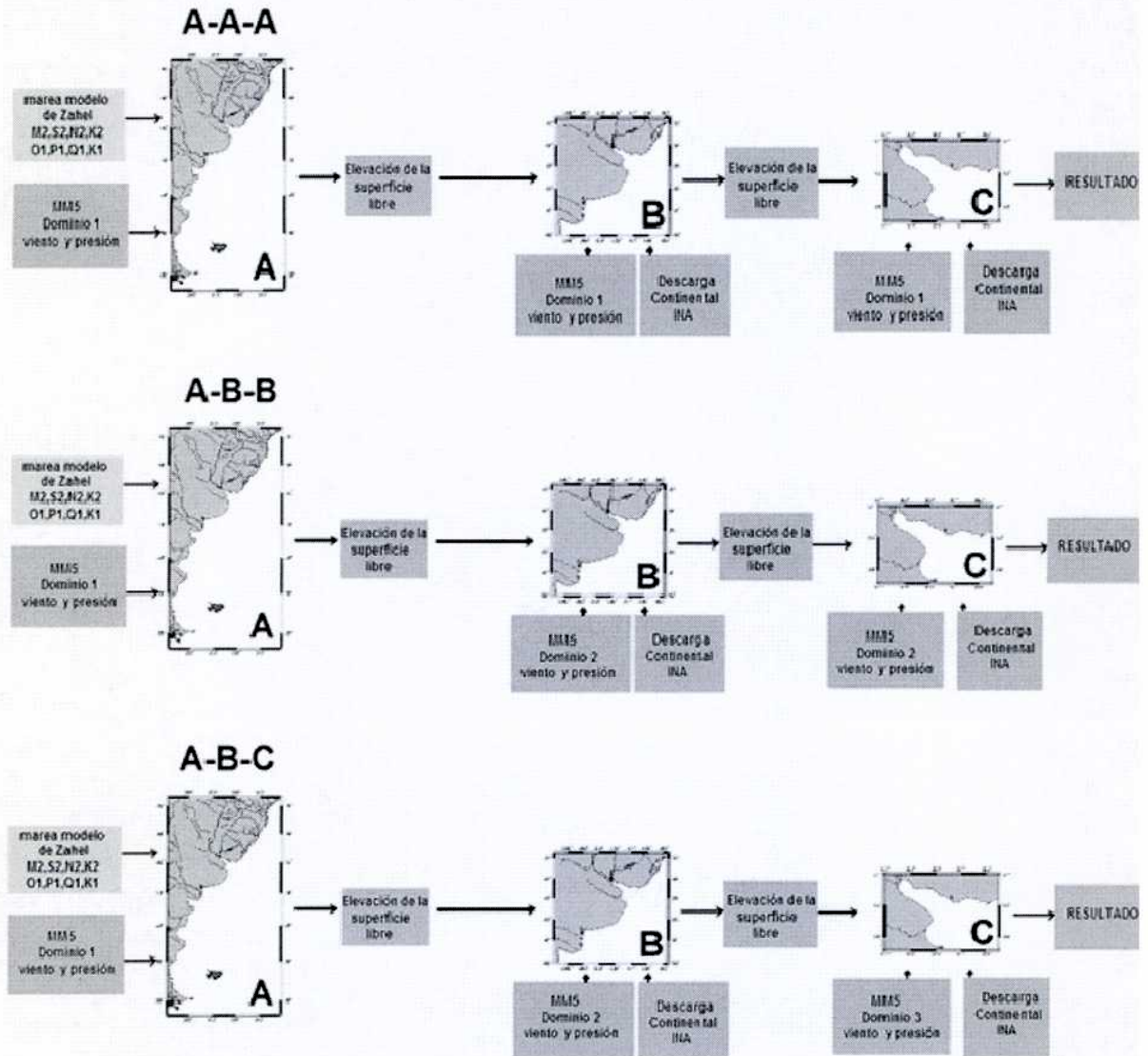


Fig. 2.7. Diseño de simulaciones realizadas en el modelo HamSOM, corrida AAA dominio 1 del MM5 provee forzantes atmosféricos a los tres dominios del modelos HamSOM (panel superior), corrida ABB el dominio 1 del MM5 da los forzantes atmosféricos al dominio A del HamSOM, mientras que el dominio 2 del MM5 provee los forzantes al los dominios B y C del modelo HamSOM (panel medio), corrida ABC el dominio 1 da los forzantes atmosféricos al dominio A del modelo HamSOM, el dominio 2 da los forzantes al dominio B del modelo hidrodinámico y finalmente el dominio 3 del MM5 da los forzantes atmosféricos al dominio C del HamSOM (panel inferior).

Para realizar una evaluación que los datos atmosféricos de mayor resolución tendrían sobre las soluciones proporcionadas por el HAMSOM, evaluamos la capacidad del modelo en representar la elevación de la superficie libre. Para ello utilizamos datos de altura del Río de la Plata en forma horaria, facilitados por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) para las estaciones Palermo y Oyarvide (tabla 2.3). Descartamos los primeros tiempos de cada corrida como periodo de spin-up. En este trabajo, utilizamos la hora oficial Argentina (HOA), siendo es uso horario -3 hs el utilizado durante los periodos estudiados.

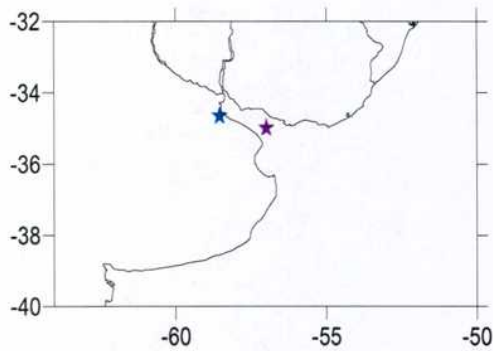


Figura 2.8: Estaciones de mareógrafo utilizadas para a validación del modelo HamSOM.

Referencia	Estación	Ubicación	Latitud	Longitud
★	Palermo	Extremo muelle Club de Pescadores, ciudad de Buenos Aires.	34° 33' 41" S	58° 23' 59" W
★	Torre Oyarvide	Río de la Plata, canal Punta Indio, provincia de Buenos Aires.	35° 07' 30" S	57° 07' 45" W

Tabla 2.3: Estaciones de mareógrafo utilizadas para a validación del modelo HamSOM.

Adicionalmente, se igualó la media de la serie simulada, esta técnica es para eliminar las desviaciones del nivel medio debidas a fenómenos no contemplados en la simulación dado que el modelo parte del reposo y no conoce la altura media de la columna. De esta forma, restamos el nivel medio de la columna a las series de estación a fin que los datos observados y simulados sean comparables. Para ello, utilizamos la información de la tabla de marea 2008 (Servicio de Hidrografía Naval), siendo el nivel medio para la estación Oyarvide de 0,85m y 0,79m en la estación Palermo.

3.1. Resultados MM5

3.1.1 Series Temporales

A fin de analizar los resultados obtenidos con el modelo atmosférico MM5, se presentan algunas series temporales correspondientes a las simulaciones realizadas para junio y julio de 1996 y agosto, septiembre y octubre del 2007.

Se estudió la evolución temporal de la intensidad y dirección del viento en 10 metros, para las salidas del modelo MM5, para NCEP y para las estaciones meteorológicas (fig. 3.1.1- 3.1.8). Se utilizaron datos de viento a 10 metros de las estaciones meteorológicas provenientes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), con 4 datos diarios es decir datos cada 6 horas (00, 06, 12 y 18 hora local). Tomamos las series temporales correspondientes a los puntos más cercanos de la retícula del modelo y de NCEP para cada punto de estación y de esta forma comparamos las series observadas con las modeladas y las de reanálisis NCEP.

En la fig. 3.1.1 podemos observar la serie temporal del viento a 10 metros en la estación Aeroparque para junio y julio de 1996, la serie simulada por el MM5 (Dominio 1) y la correspondiente al reanálisis NCEP para ese punto de estación. En rasgos generales el modelo logra representar la dirección del viento, acompaña satisfactoriamente la serie de vientos de NCEP para el periodo analizado. Al comparar las observaciones con los datos modelados y NCEP, en este punto se observa que NCEP presenta mayores intensidades durante todo el periodo, es decir una sobreestimación de la intensidad del viento por parte del reanálisis. Respecto a la salida del modelo, si bien tenemos mayores intensidades comparativamente de los valores observados, la sobrestimación sería menor que la obtenida con NCEP para este punto.

En las figuras 3.1.2, 3.1.3 y 3.1.4, se presentan las series temporales para las estaciones Mar del Plata, Ponton Recalada y Santa Teresita. Podemos ver que el modelo MM5 logra representar la dirección del viento y acompañar satisfactoriamente la evolución de los vientos de NCEP para esos puntos de estación. De la comparación con las estaciones no podemos decir sistemáticamente si las series modeladas son más o menos intensas que las observadas, dado que al analizar los resultados obtenidos para los distintos puntos de estación encontramos respuestas diferentes. Un ejemplo es la intensidad de los vientos en la estación Ponton Recalada (fig. 3.1.3), los vientos observados parecen ser más intensos que los vientos modelados con MM5 y los de NCEP. Por el contrario en la estación Mar del Plata (fig. 3.1.2), los vientos provenientes de NCEP y los modelados con MM5 para ese punto parecen ser más intensos que los observados en la

estación. En términos generales podemos decir que para junio y julio de 1996, el modelo acompaña satisfactoriamente las rotaciones del viento a 10 metros y esto se evidencia al comparar las series observadas con las modeladas y el reanálisis NCEP para cada punto de estación.

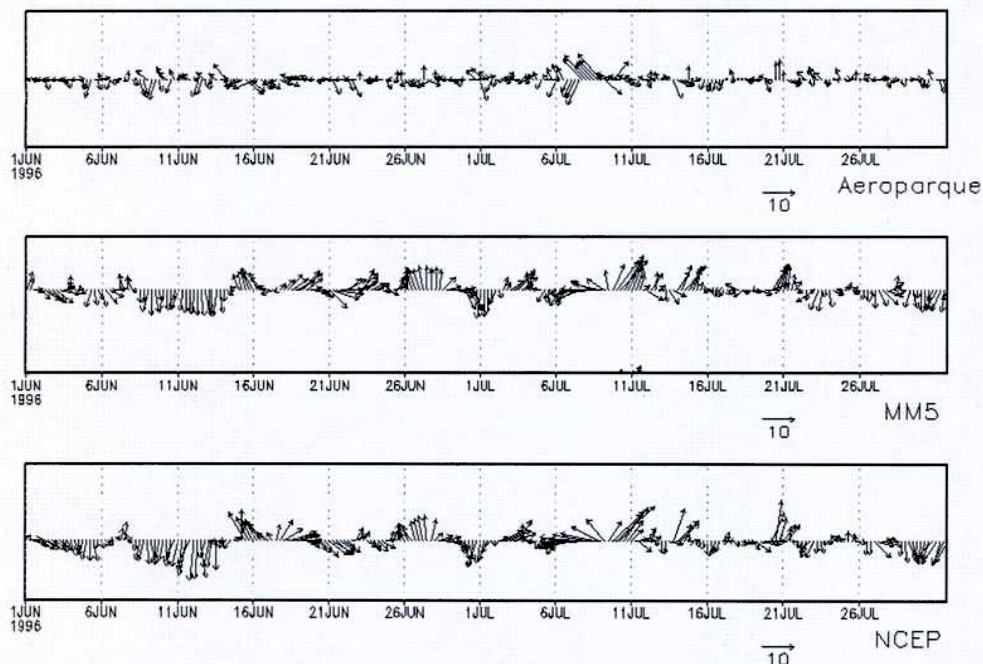


Fig.3.1.1. Series temporales del viento a 10m para junio y julio 1996. Panel superior: estación Aeroparque, panel medio: modelado con MM5 y panel inferior: NCEP/NCAR.

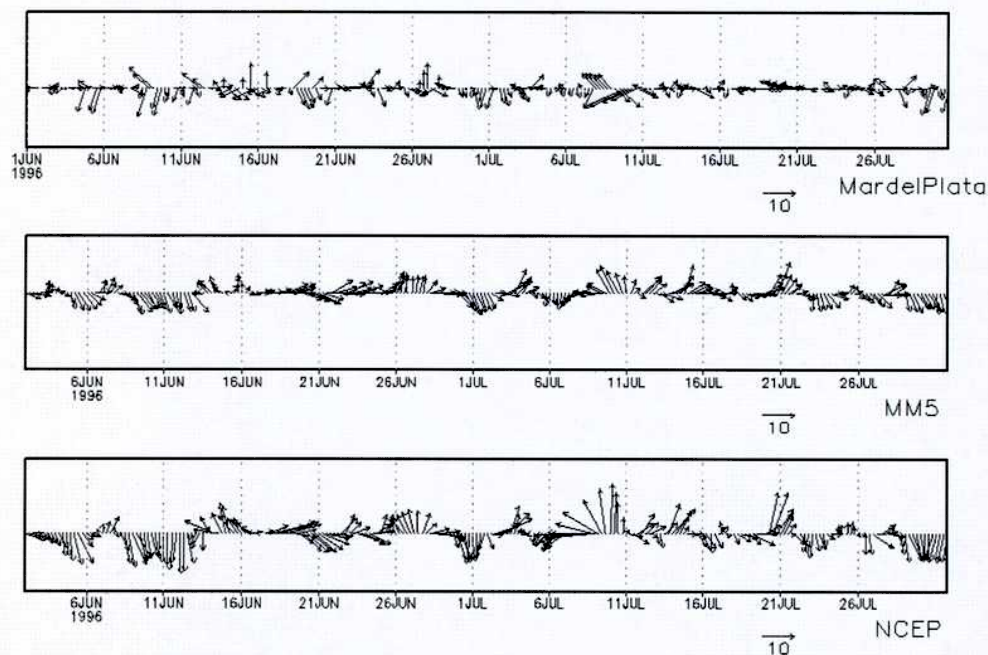


Fig.3.1.2. Viento a 10m para junio y julio 1996. Panel superior: estación Mar del Plata, panel medio: modelado con MM5 y panel inferior: NCEP/NCAR.

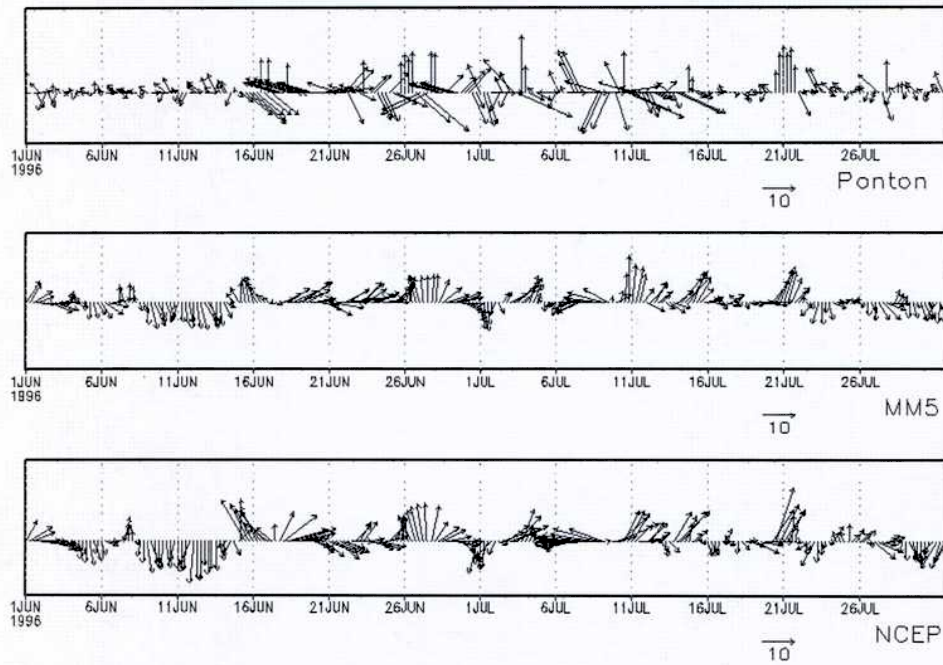


Fig.3.1.3. Series temporales del viento a 10m para junio y julio 1996. Panel superior: estación Ponton, panel medio: modelado con MM5 y panel inferior: NCEP/NCAR.

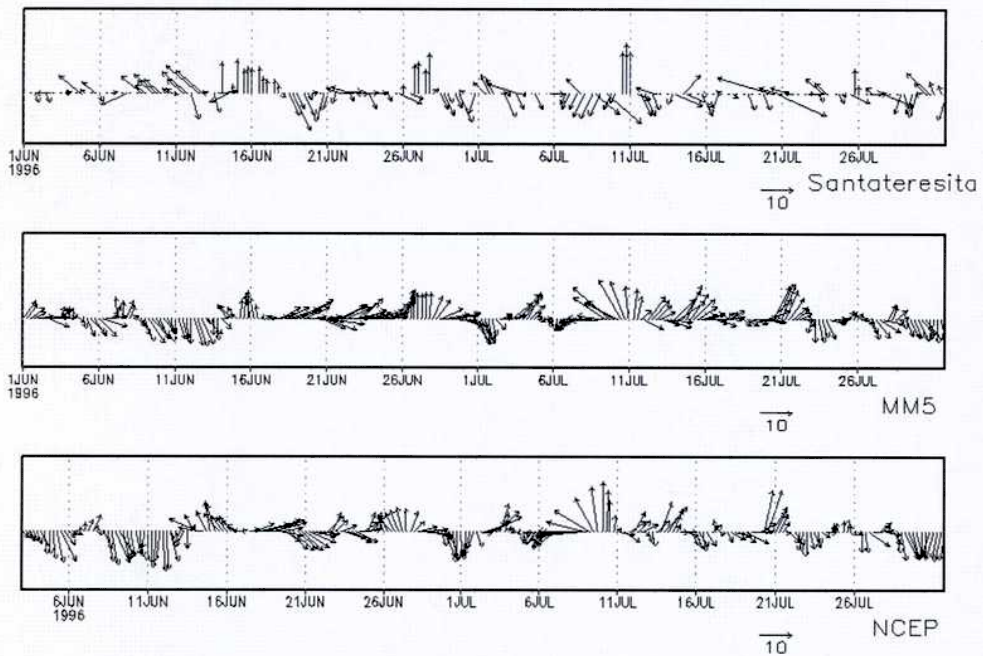


Fig.3.1.4. Series temporales del viento a 10m para junio y julio 1996. Panel superior: estación Santa Teresita, panel medio: modelado con MM5 y panel inferior: NCEP/NCAR.

Tomamos el mes de agosto a modo de ejemplo para mostrar las marchas temporales correspondientes al 2007, el resto de los gráficos no presentados en este trabajo han mostrado un comportamiento similar a los que se analizan.

En la fig. 3.1.5 podemos observar las series temporales correspondientes a la estación Aeroparque, la simulada por el MM5 (Dominio 1) y la correspondiente a NCEP para este punto. En rasgos generales el modelo logra representar la dirección del viento, acompaña satisfactoriamente la serie de vientos de NCEP y en algunos casos las direcciones coinciden con observadas en la estación. De la comparación con los vientos observados respecto de los modelados vemos que la estación tiene un comportamiento heterogéneo, la dirección del viento varía constantemente sin mostrar un patrón determinado, mientras que los vientos modelados con MM5 estarían suavizados. Esto posiblemente pueda deberse a fenómenos de menor escala, no estudiados en este trabajo y que el modelo no estaría representando.

La fig. 3.1.6 corresponde a la estación Mar del Plata, las observaciones muestran intensidades muy pequeñas lo que resulta complicado de comparar con el resto de las series. Al comparar la serie modelada con la de NCEP, vemos que si bien el modelo logra representar la dirección del viento, los vientos modelados muestran valores menos intensos. Por el contrario en la fig. 3.1.7 observamos las marchas correspondientes a la estación Punta Indio y en este punto las intensidades del viento modeladas estarían en el orden de magnitud de las observadas en la estación y las de NCEP.

En la fig. 3.1.8 se presenta la serie observada en la Estación Palermo, ubicada en el muelle club de pescadores (propiedad del CIMA). Los datos en este punto muestran un comportamiento de direcciones menos aleatorio, por momentos el modelo logra representar las direcciones observadas en la estación. Las series de NCEP y las modeladas muestran un comportamiento similar respecto de la dirección de viento durante todo el periodo, siendo los vientos modelados con MM5 algo más intensos respecto de NCEP.

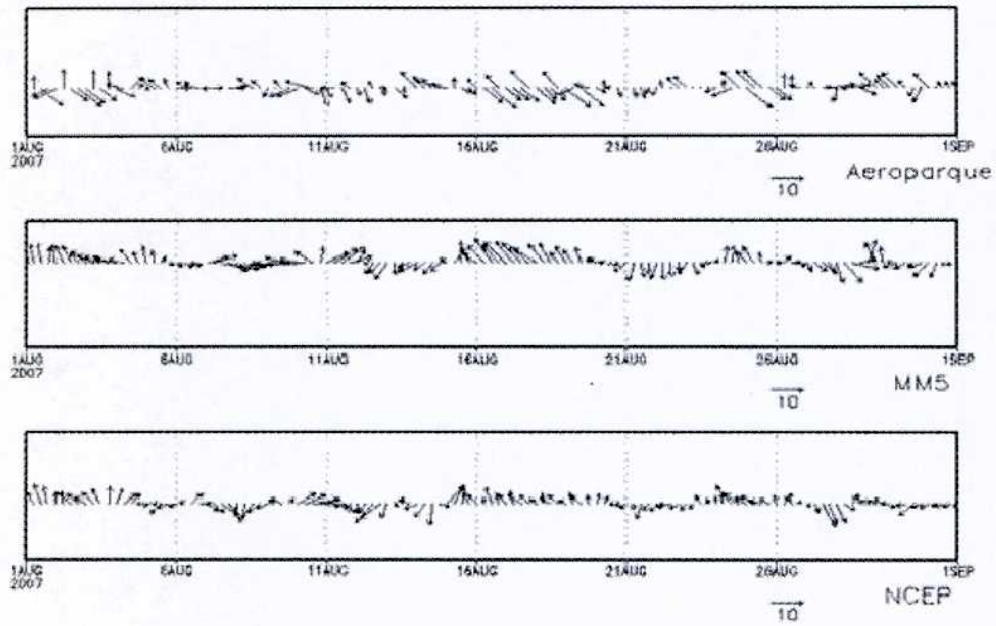


Fig.3.1.5. Series temporales del viento a 10m para Agosto del 2007. Panel superior: estación Aeroparque, panel medio: modelado con MM5 y panel inferior: NCEP/NCAR.

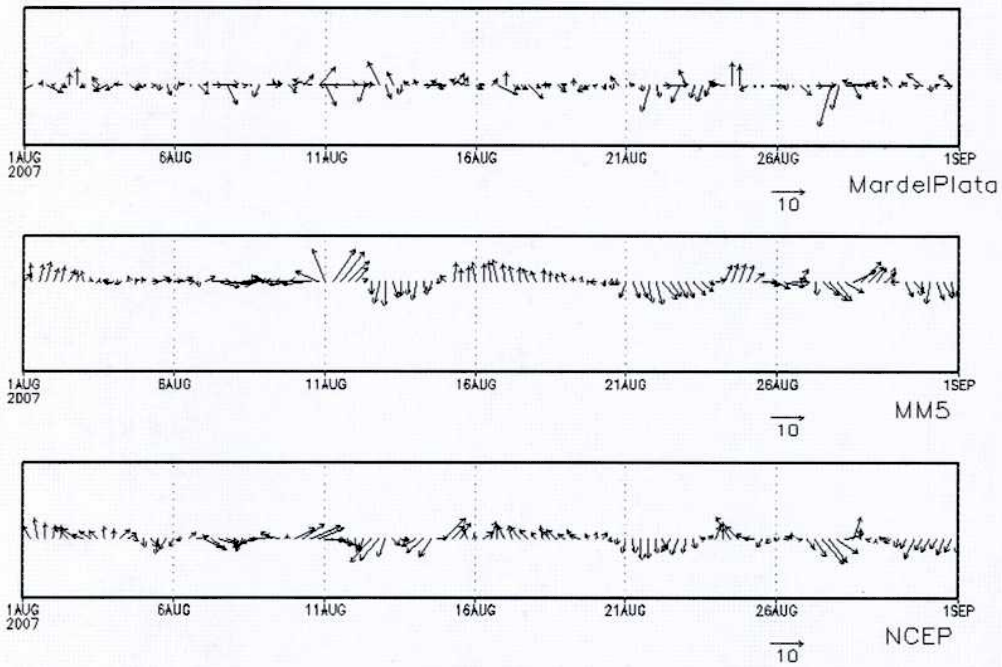


Fig.3.1.6. Series temporales del viento a 10m para Agosto del 2007. Panel superior: estación Mar del Plata, panel medio: modelado con MM5 y panel inferior: NCEP/NCAR.

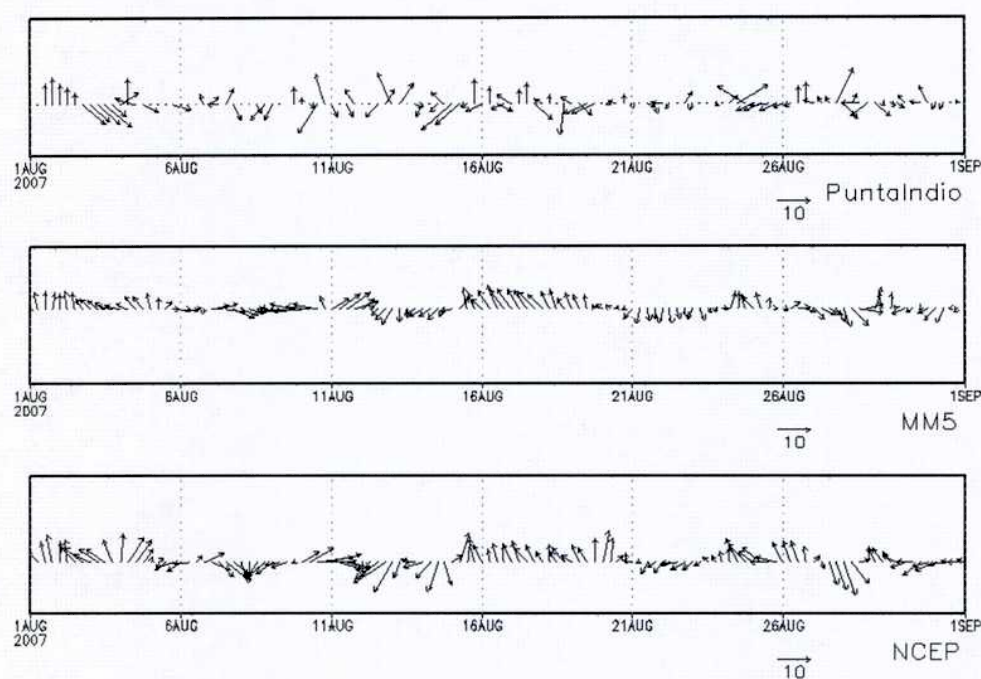


Fig.3.1.7. Series temporales del viento a 10m para Agosto del 2007. Panel superior: estación Punta Indio, panel medio: modelado con MM5 y panel inferior: NCEP/NCAR.

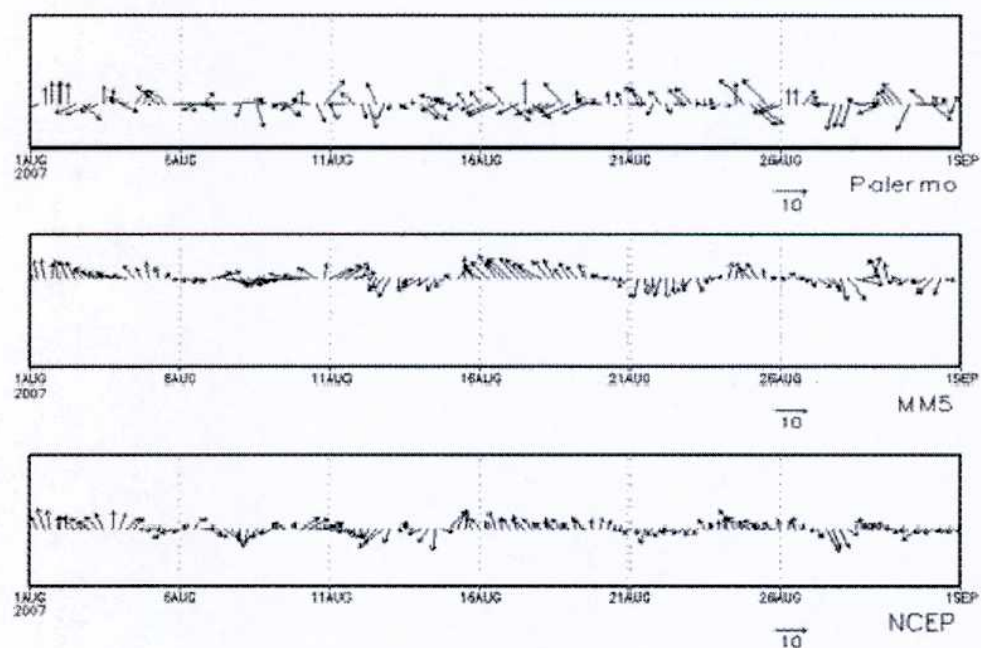


Fig.3.1.8. Series temporales del viento a 10m para Agosto del 2007. Panel superior: estación Palermo, panel medio: modelado con MM5 y panel inferior: NCEP/NCAR.

La estación Palermo resulta de particular interés, con una ubicación estratégica, se encuentra en el mismo punto que el mareógrafo “Palermo”. Por otro lado, al ser esta estación propiedad del CIMA contamos con total disponibilidad de los datos a fin de capturar la evolución de las variables que representan los forzantes atmosféricos más importantes para este estudio. En base a los datos obtenidos en esta estación, seleccionamos algunos periodos para realizar las simulaciones correspondientes al 2007. En la fig. 3.1.9 se presentan las series observadas en las estaciones Palermo (CIMA) y la estación Aeroparque para Agosto, Septiembre y Octubre del 2007.

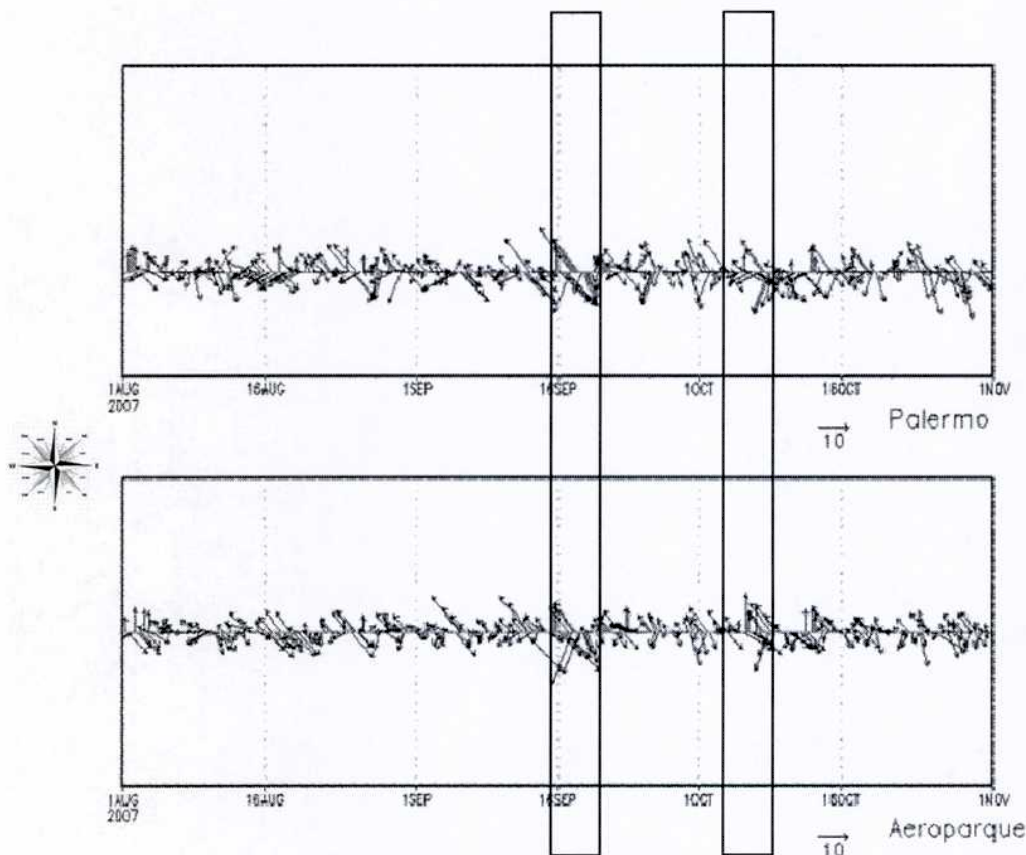


Fig.3.1.9 Series temporales del viento a 10m observadas en las estaciones Palermo (CIMA) y la estación Aeroparque para Agosto, Septiembre y Octubre del 2007

El gráfico compara los datos obtenidos en estaciones próximas (Aeroparque (SMN), Palermo (CIMA)), esto permite evaluar indirectamente la calidad de las series observadas para cada estación. Los rectángulos indican las fechas identificadas en la estación Palermo para analizar posteriormente los campos de presión en superficie, intensidad y dirección del viento a 10m en los dominios del modelo. La particularidad de estos días es de poseer vientos que con su acción determinen la elevación de la columna de agua, es decir vientos predominantes del SE, SSE, S o del NNO, N y NNE.

Las fig. 3.1.10 y 3.1.11 corresponden a las series de Septiembre y Octubre respectivamente, para la estación Palermo, las modeladas por el MM5 y las de NCEP para el punto de retícula más cercano a la estación.

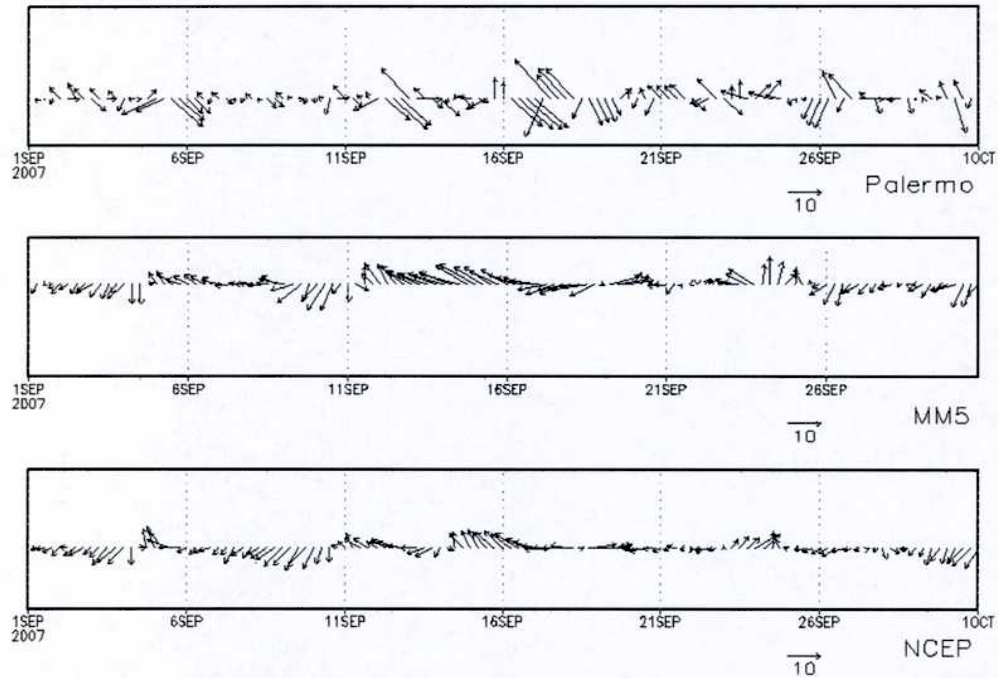


Fig.3.1.10. Series temporales del viento a 10m para Septiembre del 2007. Panel superior: estación Palermo, panel medio: modelado con MM5 y panel inferior: NCEP/NCAR.

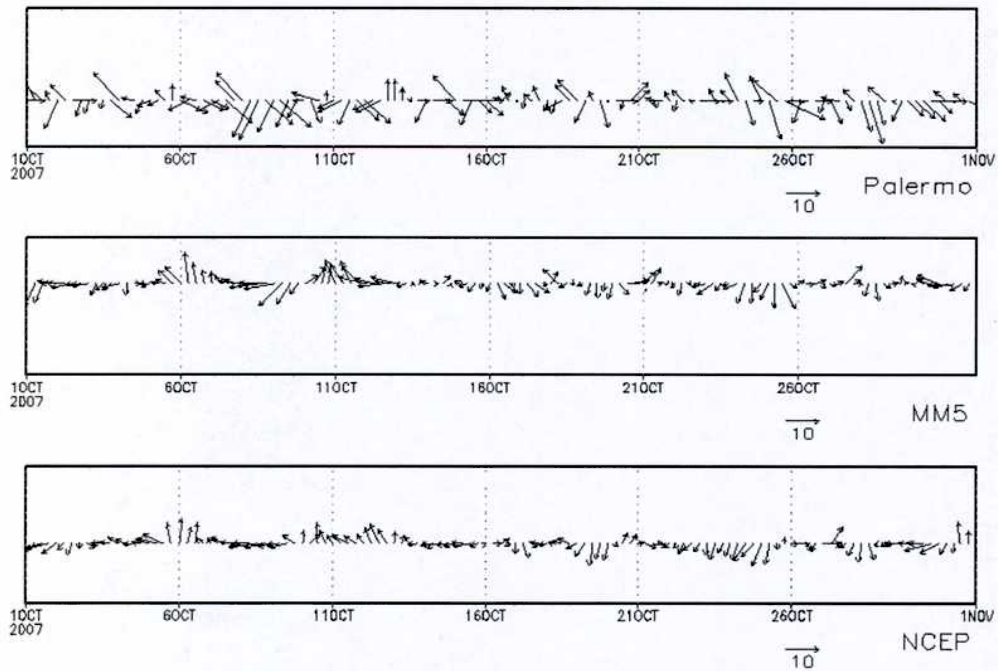


Fig.3.1.11. Series temporales del viento a 10m para Octubre del 2007. Panel superior: estación Palermo, panel medio: modelado con MM5 y panel inferior: NCEP/NCAR.

En la fig. 3.1.10 observamos que el modelo logra representar en líneas generales las direcciones de vientos. Para el 16 de Septiembre la estación Palermo muestran vientos del noroeste y luego del sector sudeste, mientras que el modelo logra representar los vientos del sector sudeste desfasados respecto de las observaciones, no estaría representando los vientos del sector Noroeste. Respecto de la comparación con NCEP, las series modeladas acompañan la dirección del viento, siendo las intensidades del reanálisis algo menores que las modeladas con MM5, para este punto.

La fig. 3.1.11 muestra la serie correspondiente a Octubre, observamos una gran coincidencia en cuanto a la dirección del viento modelado y observado en la estación. Claramente los vientos modelados son menos intensos que los observados, de manera el modelo para este mes estaría subestimando la intensidad del viento a 10 metros.

Una mejor aproximación de los resultados veremos mas adelante cuando analicemos los cálculos estadísticos entre las series observadas y las simuladas. Hasta el momento realizamos una comparación cualitativa de la calidad de las simulaciones para determinados puntos de estación, y la simulación con menor resolución de modelo atmosférico MM5 (Dominio 1- 54km). Las series temporales correspondientes a las simulaciones realizadas con los dominios 2 y 3 (gráficos no presentados), muestran un comportamiento similar a los presentados para el Dominio 1.

3.1.2 Campos de circulación

Para evaluar la calidad de las simulaciones en reproducir los patrones de circulación de la escala sinóptica, comparamos los campos de viento en 10m y presión en superficie calculados por el modelo MM5 con los proporcionados por el reanálisis NCEP/NCAR para algunos eventos seleccionados. Analizamos la calidad de las simulaciones atmosféricas en sus tres resoluciones, realizamos la comparación entre los campos modelados por el MM5 en sus distintas resoluciones (18 y 3km) y los de NCEP.

A modo de ejemplo seleccionamos algunas fechas para representar, la particularidad de estos días es la de poseer vientos del sector sudeste o noroeste, es decir los vientos que con su acción determinan el nivel del Río. Los vientos del **NNO**, **N** y **NNE** están relacionados con provocar bajantes del nivel del Río de la Plata. Esto significa, que persistentes vientos de esa dirección harán descender la altura del estuario. Por el contrario, las máximas crecientes del río, están relacionadas con vientos predominantes del sector **SE**, **SSE** y **S**.

En la rosa de los vientos que se presenta a continuación (con 16 rumbos indicados) se hace una síntesis de las direcciones que causan bajantes, y las que determinan crecientes.

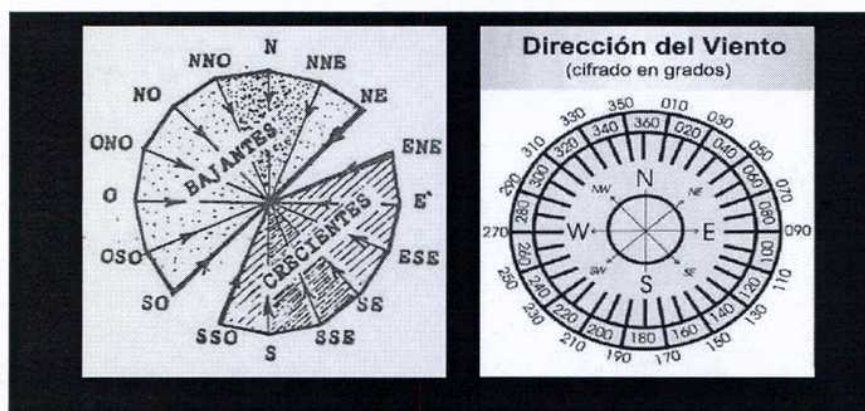


Fig.3.1.12. Representa la dirección del viento, relacionado con variaciones en el nivel del Río de la Plata, publicados por el Lic. Alberto H. Celemín en su libro Meteorología Práctica (Anexo 1 de diciembre de 1988).

Es importante destacar que, para una misma velocidad del viento, los distintos efectos de cada dirección se deben a la especial configuración del estuario. Este no ofrece, por ejemplo, la misma extensión de agua para un viento Norte que para un viento del SE.

Las fechas seleccionadas para 1996 fueron, el día 16 de junio a las 00, 06 y 12 UTC, donde se observan vientos del sudeste y el día 21 de junio a las 00, 06 y 12 UTC donde se registran vientos del noroeste. En el caso del 2007, seleccionamos el 16 de septiembre, 11 de octubre con vientos del sudeste y el 28 de agosto con vientos del noreste.

Las variables comparadas fueron presión a nivel del mar, velocidad y dirección del viento en 10 metros para los días seleccionados a las 00, 06 y 12 UTC. Procedimos a hacer una comparación cualitativa de estas variables, en la tabla 3.1 se observan los días seleccionados y la dirección del viento para cada día.

Fechas Seleccionadas	Dirección del Viento
16/06/1996	SE-SSE-S
21/06/1996	NNO-N
28/08/2007	NNO-N
16/09/2007	SE-SSE-S
11/10/2007	SE-SSE-S

Tabla 3.1. Fechas seleccionadas para representar mapas de presión, velocidad y dirección del viento a 10m.

La figura 3.1.13, muestra la evolución del campo de presión a nivel del mar, superpuesto a la intensidad y dirección del viento en 10 metros, para el 16 junio de 1996 a las 00 UTC (medianoche en el meridiano de Greenweech), es decir 21 Hora Oficial Argentina, las 06 y las 12 UTC, modelados por el MM5 (Dominio 1) y los mapas correspondientes a NCEP/NCAR. En este caso, la circulación atmosférica en superficie sobre el estuario del Río de la Plata y su océano adyacente es afectada por vientos en la dirección Sur y Sureste. A las 00 el modelo muestra el ingreso de un anticiclón posfrontal sobre el continente produciendo viento del sector S-SW sobre la costa patagónica y dirección SSE (160 grados) a la altura de las estaciones Ponton y Aeroparque, sobre el estuario. Esto lo podemos observar en las figuras 3.1.1 y 3.1.3 correspondientes a las marchas temporales modeladas para cada punto de estación. A las 06 UTC, el anticiclón posfrontal se desplazo en dirección NE, ubicándose aproximadamente en 35° S y 56° W lo que modifica la incidencia de los vientos a la altura de la Bahía de Samborombon pero continúan siendo del sector Sudeste sobre el estuario. Para las 12 UTC el anticiclón posfrontal esta centrado sobre el estuario del Río de la Plata, aunque persisten vientos poco intensos del SE sobre el río.

Respecto a los campos de reanálisis NCEP/NCAR para la misma fecha, a las 00 UTC se observa el anticiclón posfrontal situado aproximadamente 38° S y 55° W, el viento incide del sector SE en el estuario. Podemos ver la formación de una baja al Noreste del estuario, esto provoca que el viento del sector SE se intensifique cerca de la boca del estuario del Río de la Plata (definiendo esta como el segmento que une Punta del Este-Uruguay con Punta Rasa- Argentina) y la costa Bonaerense.

A las 06 UTC el anticiclón no ha modificado su ubicación, observamos el cierre del centro de baja presión lo que intensifica los vientos aún mas para este tiempo.

Para las 12 UTC el anticiclón permaneció estacionario, los vientos continúan siendo del SE para todo el área del estuario del Río de la Plata. El centro de baja presión se desplazo hacia el Este, por lo se observan vientos menos intensos sobre la costa de Uruguay para este tiempo. Los mapas correspondientes a NCEP, muestran que el sistema de alta presión prácticamente no ha cambiado su posición, esto provoca que los vientos se mantengan en dirección SE para los tiempos analizados. Por otro lado, la formación de un centro de baja presión sobre el Noreste del estuario estaría intensificando los vientos para las 06 UTC.

En forma opuesta a NCEP, el MM5 muestra una rápida evolución del anticiclón hacia el Noreste del Dominio lo que modifica la intensidad y dirección del viento que ingresa al estuario del Río de la Plata durante los tiempos analizados.

La fig. 3.1.14 ofrece mayor detalle de la situación antes descripta para el Dominio de resolución intermedia (18km). A las 00 UTC se observa la posición del anticiclón posfrontal sobre el continente produciendo viento del sector SSE (160 grados) a la altura de las estaciones Ponton, Punta Indio y Aeroparque. Para el mismo tiempo NCEP muestra un centro de baja presión al noreste del dominio, que no es capturado por el modelo. Esta zona de baja presión produce que el viento del sector SE se intensifique aguas afuera del estuario. En los tiempos siguientes las condiciones se mantienen, el viento persiste del sector SE para todo el área del estuario y la costa Bonaerense. Tanto NCEP como el modelo muestran un patrón similar, siendo las intensidades del viento mayores para NCEP en los tres tiempos analizados, producto de la formación de un centro de baja presión al noreste del estuario lo que estaría intensificando el viento.

Varios autores (Rivero y Bischoff 1971, Necco 1982, Celmin 1984, Ciappesoni y Salio 1997), sugieren que algunos eventos de sudestada tienen su origen en la ciclogénesis que se desarrolla en el extremo noreste de la Argentina y Uruguay. Si bien la ciclogénesis sobre el litoral Argentino puede favorecer el desborde del Río de la Plata, la ubicación del centro de la Baja debe ser en la zona de 30 a 35° S y de 52 a 58° W (Salio, et. Al. 1996). En el caso que la ubicación de la Baja sea otra, el viento sobre la desembocadura no será del sector sudeste (135°) o sudsudeste (160°).

A pesar de la formación de la Baja presión sobre el NE de Uruguay, se observa una gran influencia del anticiclón posfrontal que determina la dirección del viento SE sobre el estuario. La ubicación de este sistema de baja presión estaría afectando la intensidad del viento cercano al estuario y la costa Bonaerense.

En la fig. 3.1.15 se observan los campos modelados con MM5 Dominio 2 y Dominio 3, al analizar la salida de mayor resolución observamos que el viento predicho por el modelo, se homogeniza en todo el dominio siguiendo el forzamiento de la situación de gran escala que esta dominada por un régimen del SSE-SE con intensidades iguales para todo el área de estuario. Esta dirección del viento se mantiene, a las 12 UTC observamos menores intensidades del viento sobre todo el estuario y la costa Bonaerense.

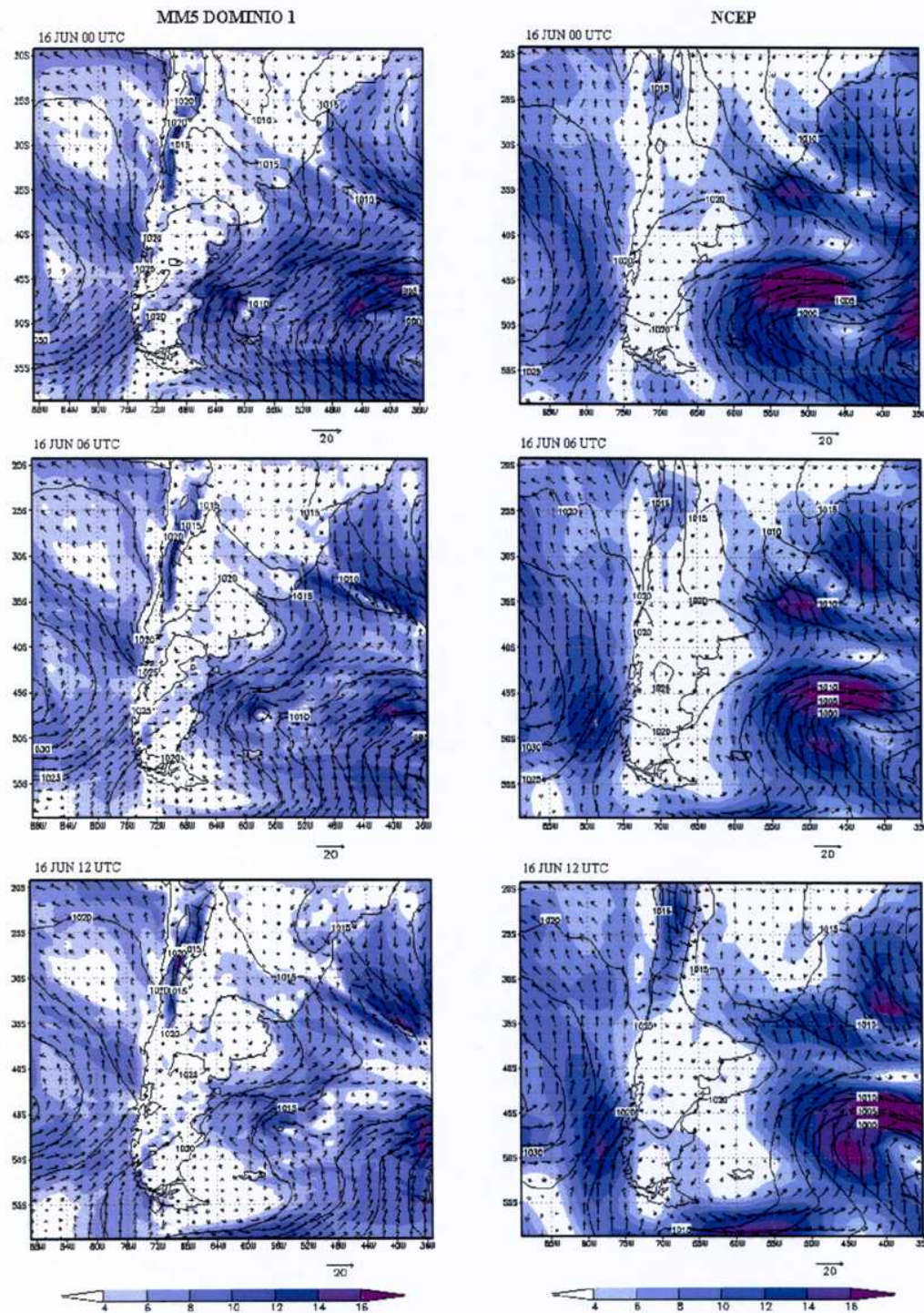


Fig.3.1.13 Presión a nivel del mar (hPa) (líneas), intensidad (sombreado) y dirección del viento a 10m (m s^{-1}) (vectores), modeladas con MM5-Dominio 1 (paneles izquierdos) y reanálisis NCEP/NCAR (paneles derechos), para el 16 de junio 00, 06 y 12 UTC.

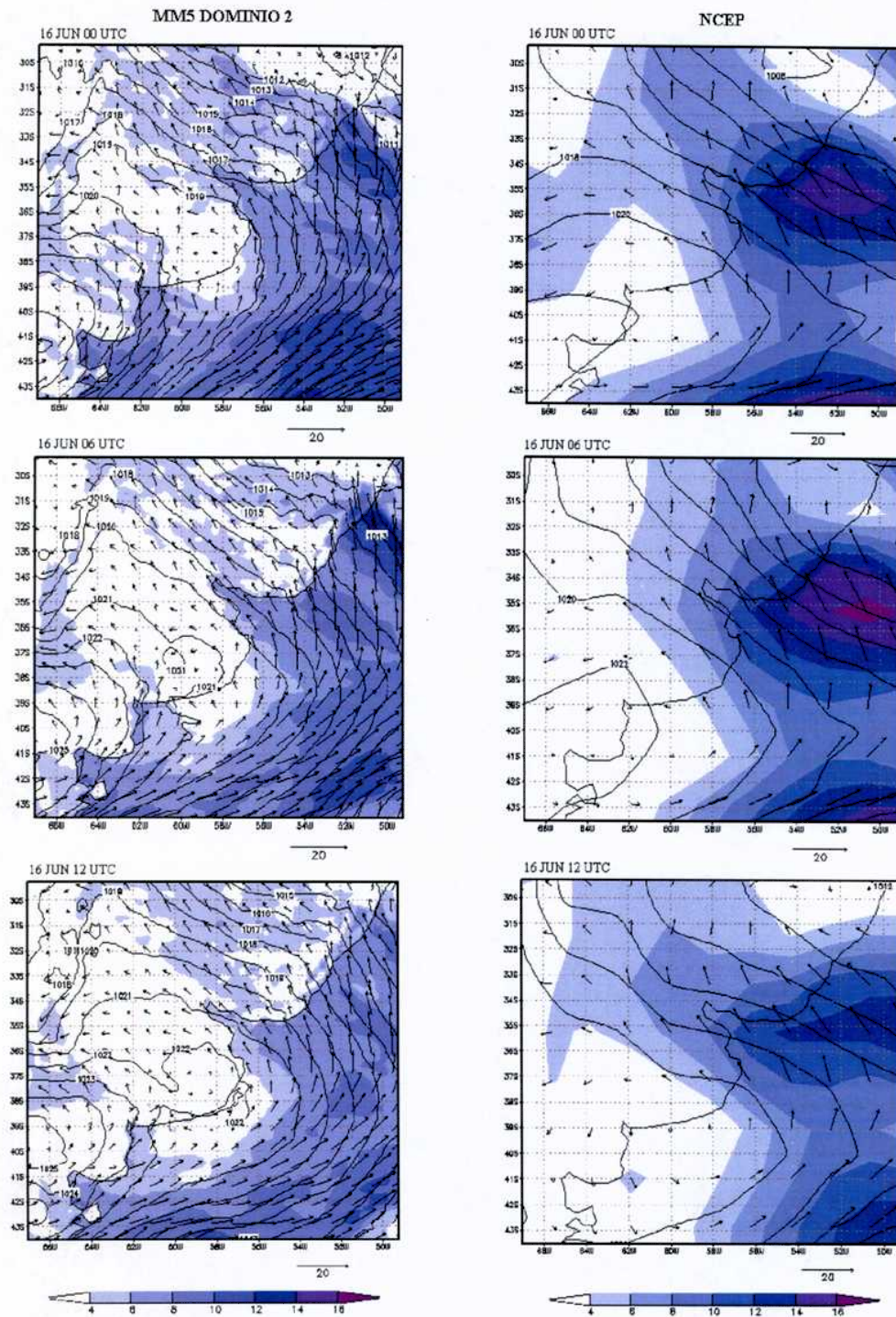


Fig.3.1.14 Presión a nivel del mar (hPa) (líneas), intensidad (sombreado) y dirección del viento a 10m (m s^{-1}) (vectores), modeladas con MM5-Dominio 2 (paneles izquierdos) y reanálisis NCEP/NCAR (paneles derechos), para el 16 de junio 00, 06 y 12 UTC.

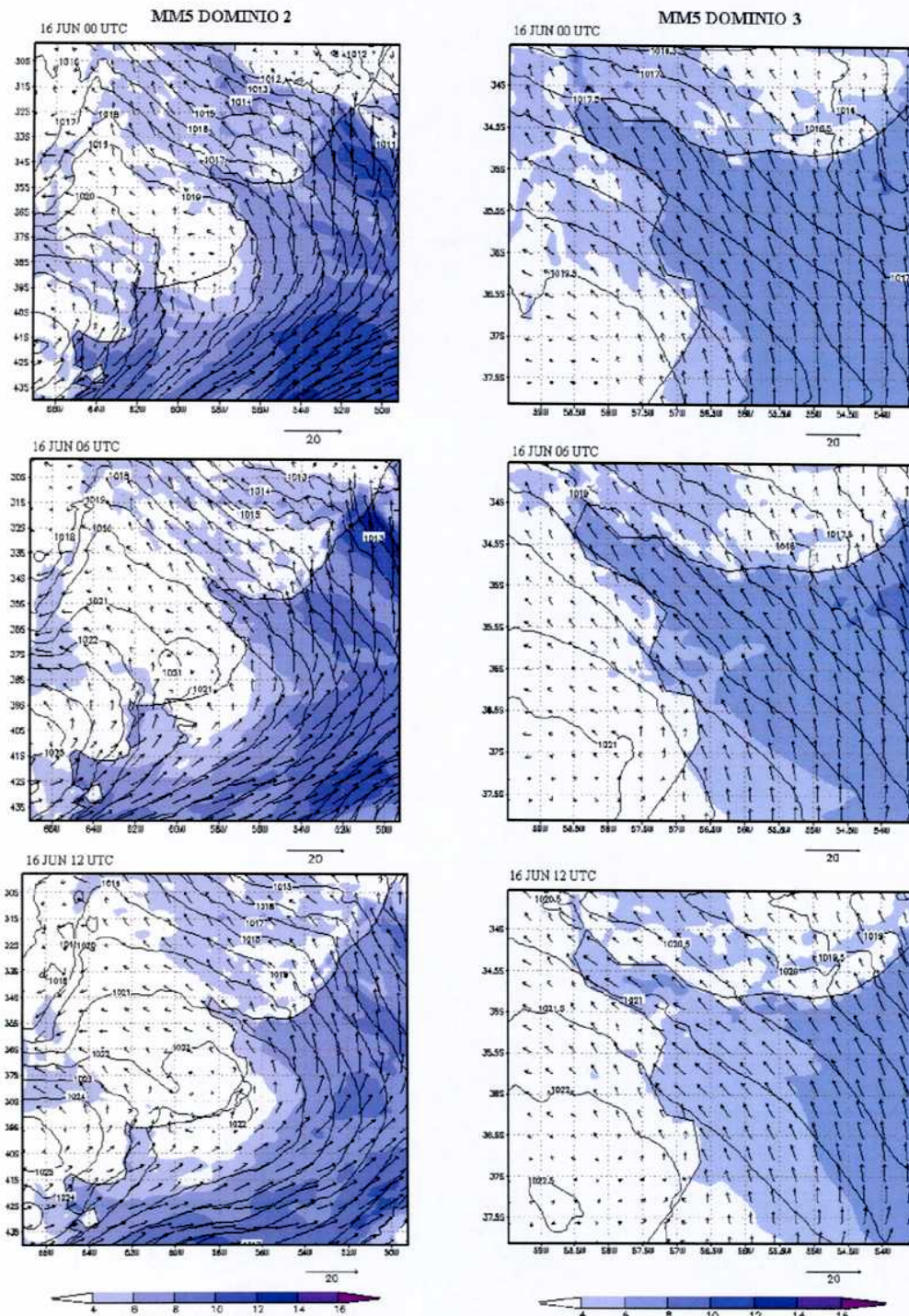


Fig.3.1.15 Presión a nivel del mar (hPa) (líneas), intensidad (sombreado) y dirección del viento a 10m (m s^{-1}) (vectores), modeladas con MM5-Dominio 1 (paneles izquierdos) y MM5-Dominio 3 (paneles derechos), para el 16 de junio 00, 06 y 12 UTC.

En la fig 3.1.16 se presentan los mapas del modelo y los de NCEP correspondientes al 21 de junio para las 00, 06 y 12 UTC. En este caso el área de estudio se ve afectada por vientos del NW. Para las 00 el modelo muestra un sistema de alta presión con su centro ubicado aproximadamente 32° S y 54° W, los vientos ingresan sobre la cabecera del estuario con dirección NW, en la estación aeroparque se registran vientos del noreste para ese tiempo, esto lo podemos observar en las series temporales anteriormente mostradas correspondientes a la estación Aeroparque (fig.3.1.1). En el caso de NCEP vemos este sistema ubicado sobre el continente con su centro en 30° S y 62° W, desplazado hacia el oeste respecto del modelado con MM5. Esta diferencia en la ubicación afecta la incidencia del viento que ingresa del noroeste sobre el estuario con mayores intensidades y recorriendo una distancia mayor antes de alcanzarla cabecera del estuario, respecto del modelo.

A las 06 UTC continúan los vientos del noroeste sobre el estuario, tanto para NCEP como para el modelo no se observa el centro de alta presión en ningún caso. Los vientos de NCEP llegan al estuario del Noroeste con mayores intensidades sobre el continente respecto del modelo. A las 12 UTC los vientos modelados inciden al estuario del sector oeste, mientras que para NCEP continúan siendo del NW. Nuevamente NCEP presenta un sistema de alta presión, ahora ubicado al noreste del dominio, lo que provoca la marcada incidencia de los vientos en dirección NW recorriendo parte del continente antes de alcanzar el Río de la Plata, con intensidades mayores para esta zona respecto de las modeladas. Por otro lado, NCEP muestra mayores intensidades al sur del dominio integrado para todos los tiempos, es decir que el modelo estaría subestimando el viento en esa zona.

En la fig. 3.1.17 se presentan los mapas correspondientes al Dominio 2 (16km) y NCEP para los mismos tiempos. En rasgos generales observamos lo mencionado anteriormente, con una mayor resolución y detalle. Podemos observar claramente como en todos los tiempos, NCEP muestra mayores intensidades del viento, antes de alcanzar la cabecera del estuario sobre el continente. Lo que podría ser de gran importancia a la hora de evaluar la respuesta de la columna de agua al forzante atmosférico.

La fig. 3.1.18 corresponde a los dominios 2 y 3 de modelo, 18 y 6km de resolución respectivamente. En este caso podemos observar en detalle el área de estudio, para las 00 y las 06 UTC se registran vientos del NW con intensidades menores a 4 m/s al norte de la cabecera del estuario, sobre el continente. Al comparar ambas salidas, el comportamiento es similar con un mayor detalle en el campo del dominio de mayor

resolución lo que permite ver para cada punto de estación las variables calculadas por el modelo. A las 12 UTC observamos claramente que el modelo muestra vientos del oeste sobre el área del estuario del Río de la Plata, esto resultaba poco claro de distinguir en los dominios anteriores.

En conclusión, para esta fecha observamos vientos algo mas intensos y permanentes para los campos de NCEP respecto de los modelados, el modelo estaría subestimando la intensidad del viento al norte de la cabecera del estuario, sobre el continente antes de llegar a la costa. Por otro lado el tiempo de permanencia del viento en dirección NW es mayor en el caso de NCEP donde a las 12 UTC continúa el viento en esta dirección, mientras que para los tres dominios del modelo a las 12 UTC, se observan vientos del oeste. Con lo cual a la hora de hacer inferencias sobre el efecto del forzante atmosférico sobre la columna de agua, esperaríamos un mayor efecto al utilizar NCEP como forzante, donde observamos vientos más intensos y permanentes del sector NW.

En el caso del periodo simulado 2007, seleccionamos los días 16 de septiembre, 11 de octubre con vientos del sudeste y el 28 de agosto con vientos del noreste.

En la fig. 3.1.19 se presentan los mapas correspondientes al 16 de septiembre, a las 00 UTC se observa un anticiclón ubicado sobre la costa Patagónica con su centro aproximadamente en 45° S y 64° W. Al comparar la salida del modelo respecto NCEP vemos que si bien ambos logran representar el centro de alta presión, la forma que este toma afecta la dirección con la que inciden los vientos provenientes del SE al estuario del Río de la Plata. Durante los siguientes tiempos (06 y 12 UTC) observamos que el sistema se mantiene estacionario, no ha variado prácticamente su posición, los vientos continúan del SE sobre el área del estuario para la salida del modelo y para NCEP.

A diferencia del la situación analizada anteriormente correspondiente al 16 de junio donde observamos vientos de SE, para esta fecha el modelo y NCEP tienen intensidades de viento similares.

En las fig. 3.1.20 y 3.1.21 se presentan los mapas correspondientes a la salida MM5 dominio 2 y dominio 3. En estos mapas con mayor detalle, observamos que la incidencia del viento en superficie es del sector SE, sobre el estuario del Río de la Plata durante todo los tiempos analizados (00, 06 y 12 UTC). En la fig. 3.1.20 se comparan los campos del modelo dominio 2 y NCEP, vemos que la intensidad del viento modelado es similar a las intensidades presentadas por el reanálisis NCEP.

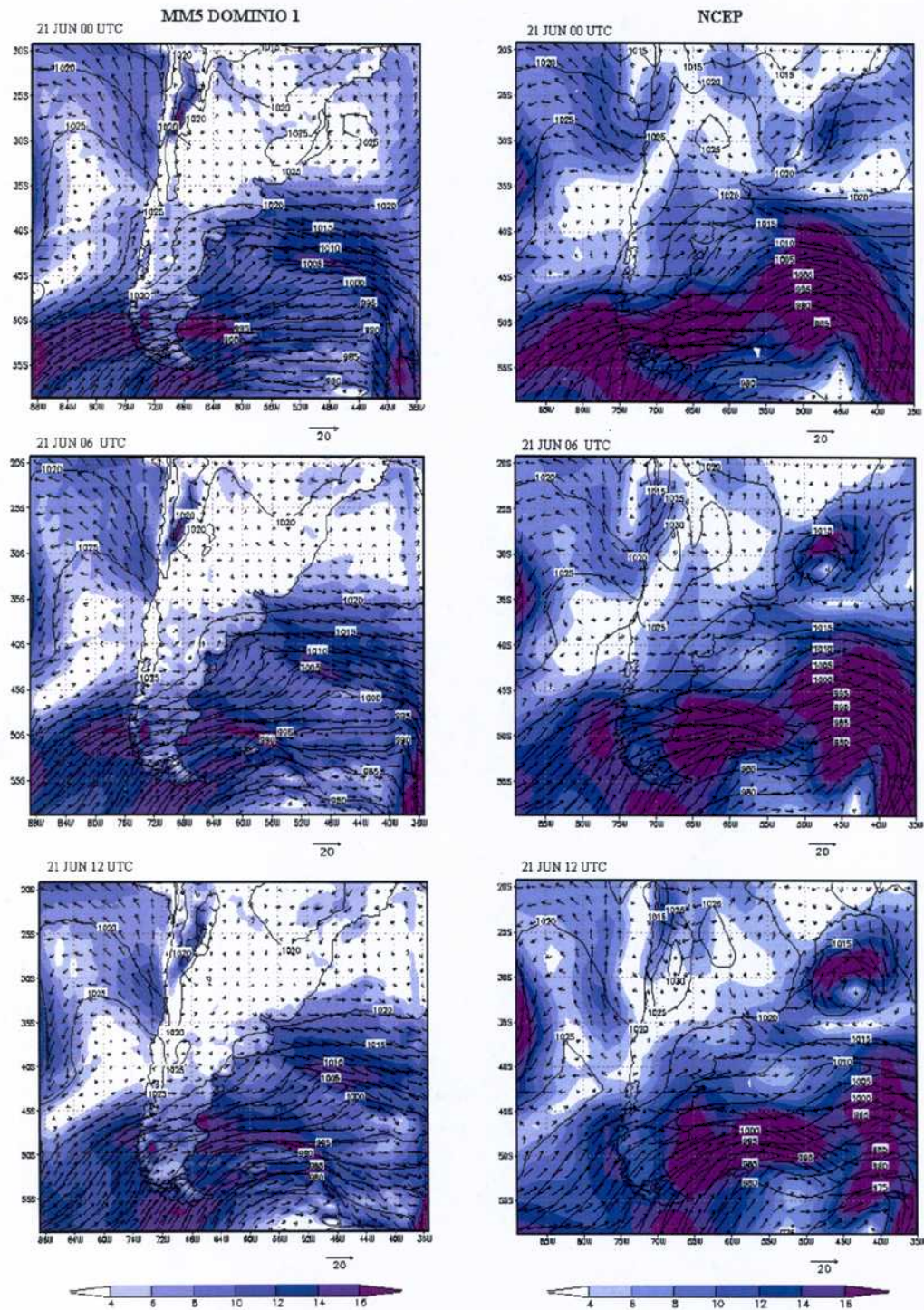


Fig.3.1.16 Presión a nivel del mar (hPa) (líneas), intensidad (sombreado) y dirección del viento a 10m (m s^{-1}) (vectores), modeladas con MM5-Dominio 1 (paneles izquierdos) y reanálisis NCEP/NCAR (paneles derechos), para el 21 de junio 00, 06 y 12 UTC.

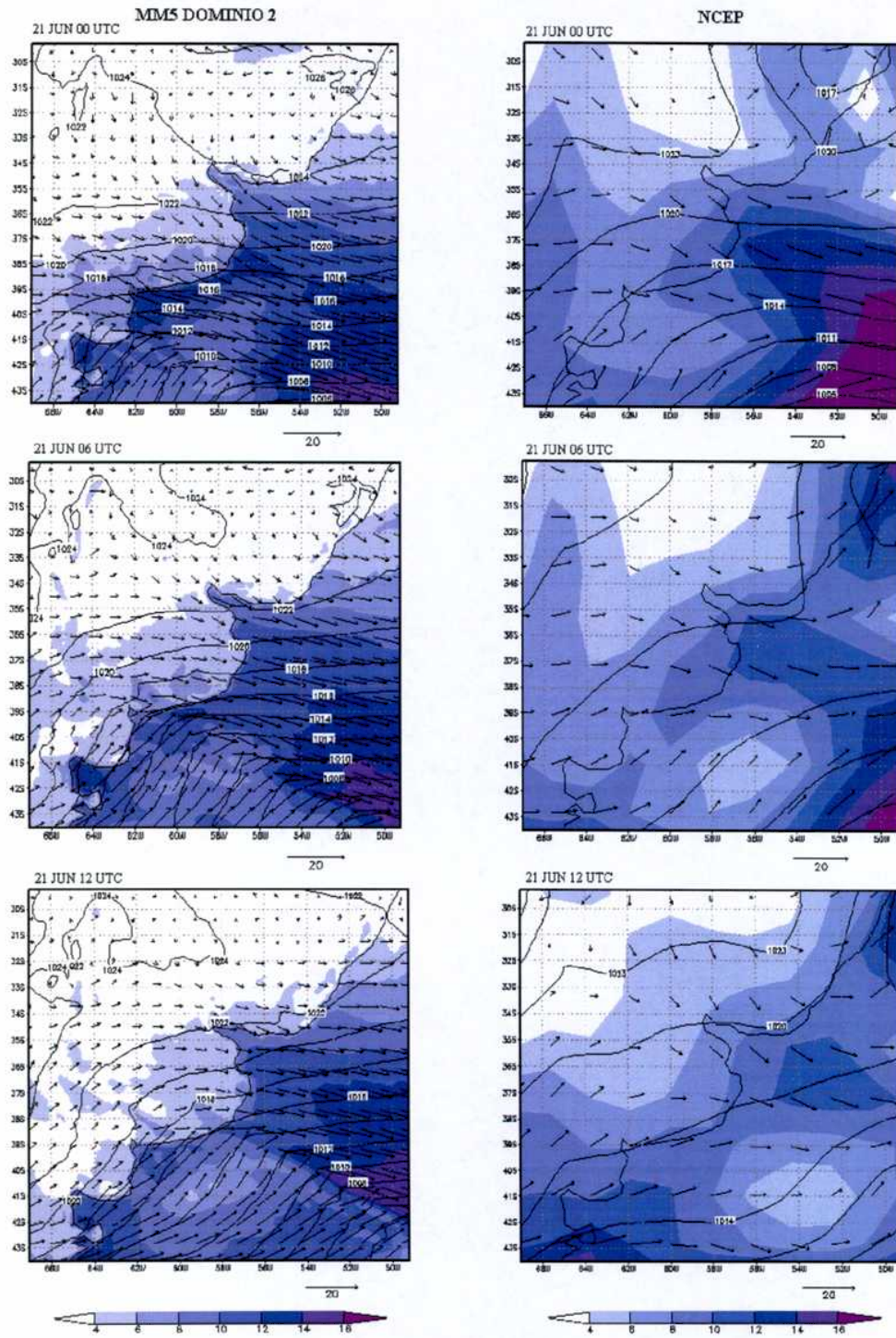


Fig.3.1.17 Presión a nivel del mar (hPa) (líneas), intensidad (sombreado) y dirección del viento a 10m (m s^{-1}) (vectores), modeladas con MM5-Dominio 2 (paneles izquierdos) y reanálisis NCEP/NCAR (paneles derechos), para el 21 de junio 00, 06 y 12 UTC.

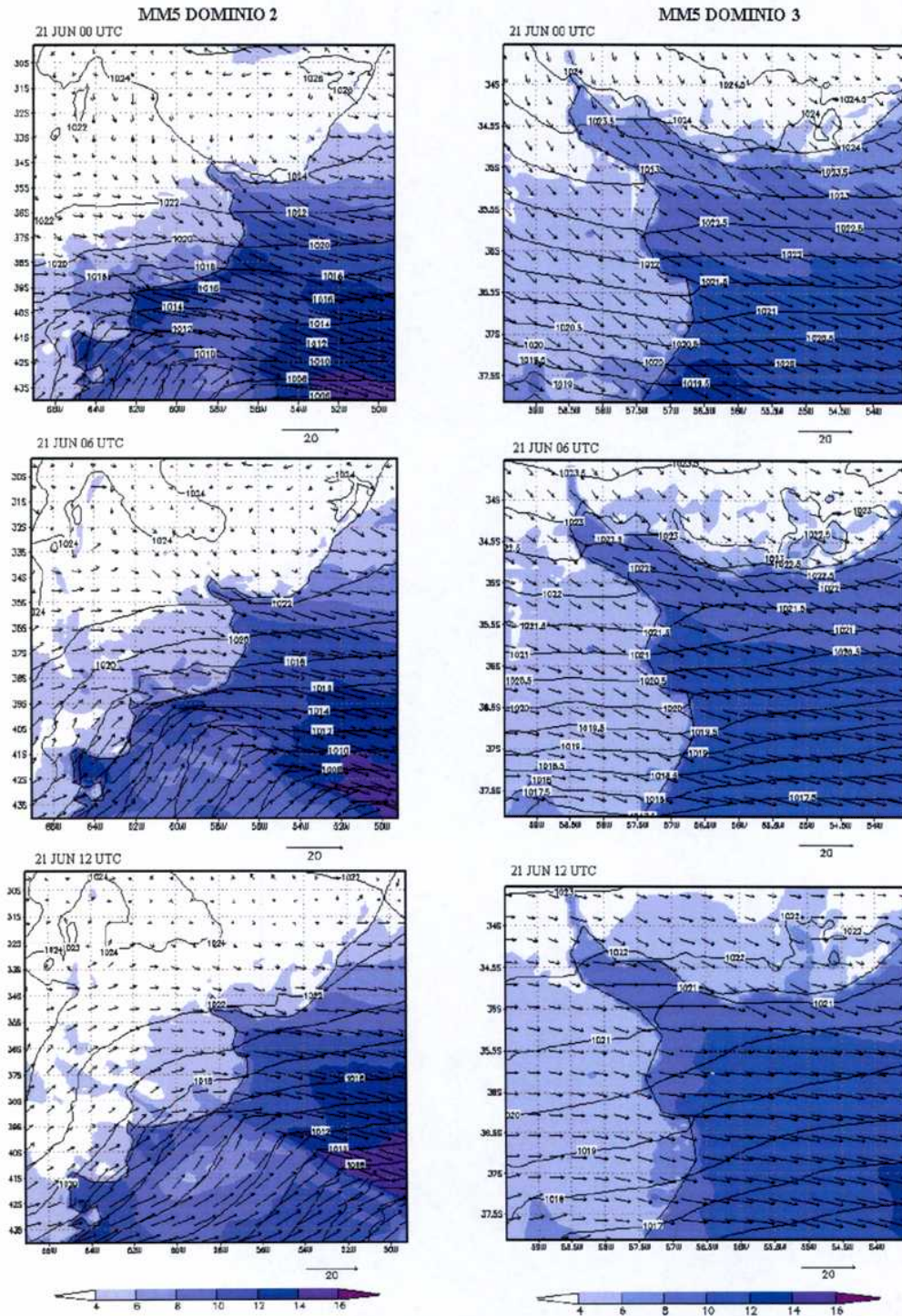


Fig.3.1.18 Presión a nivel del mar (hPa)(líneas), intensidad (sombreado) y dirección del viento a 10m (m s^{-1}) (vectores), modeladas con MM5-Dominio 2 (paneles izquierdos) y MM5-Dominio 3 (paneles derechos), para el 21 de junio 00, 06 y 12 UTC.

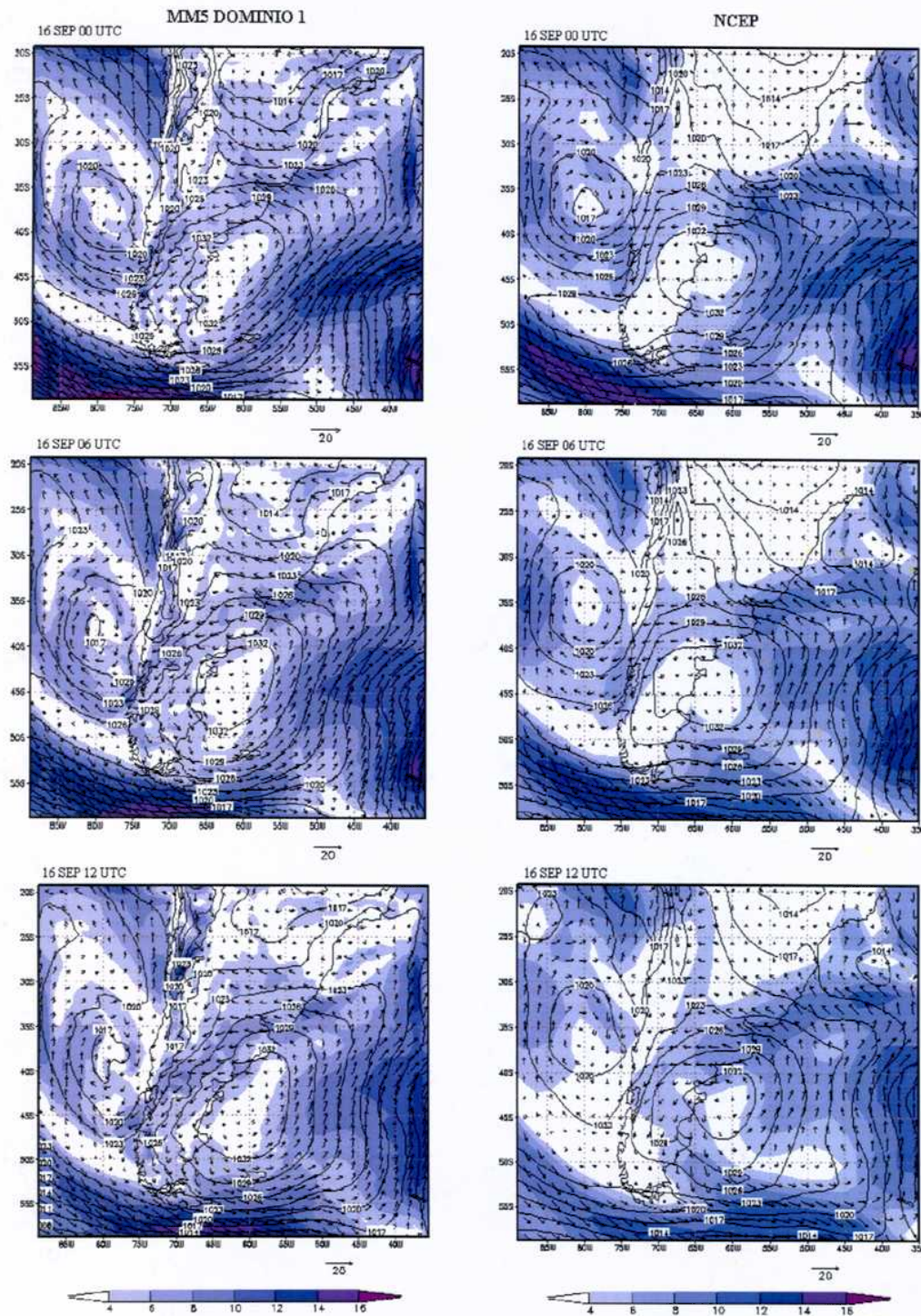


Fig.3.1.19 Presión a nivel del mar (hPa) (líneas), intensidad (sombreado) y dirección del viento a 10m (m s^{-1}) (vectores), modeladas con MM5-Dominio 1 (paneles izquierdos) y reanálisis NCEP/NCAR (paneles derechos), para el 16 de Septiembre 00, 06 y 12 UTC.

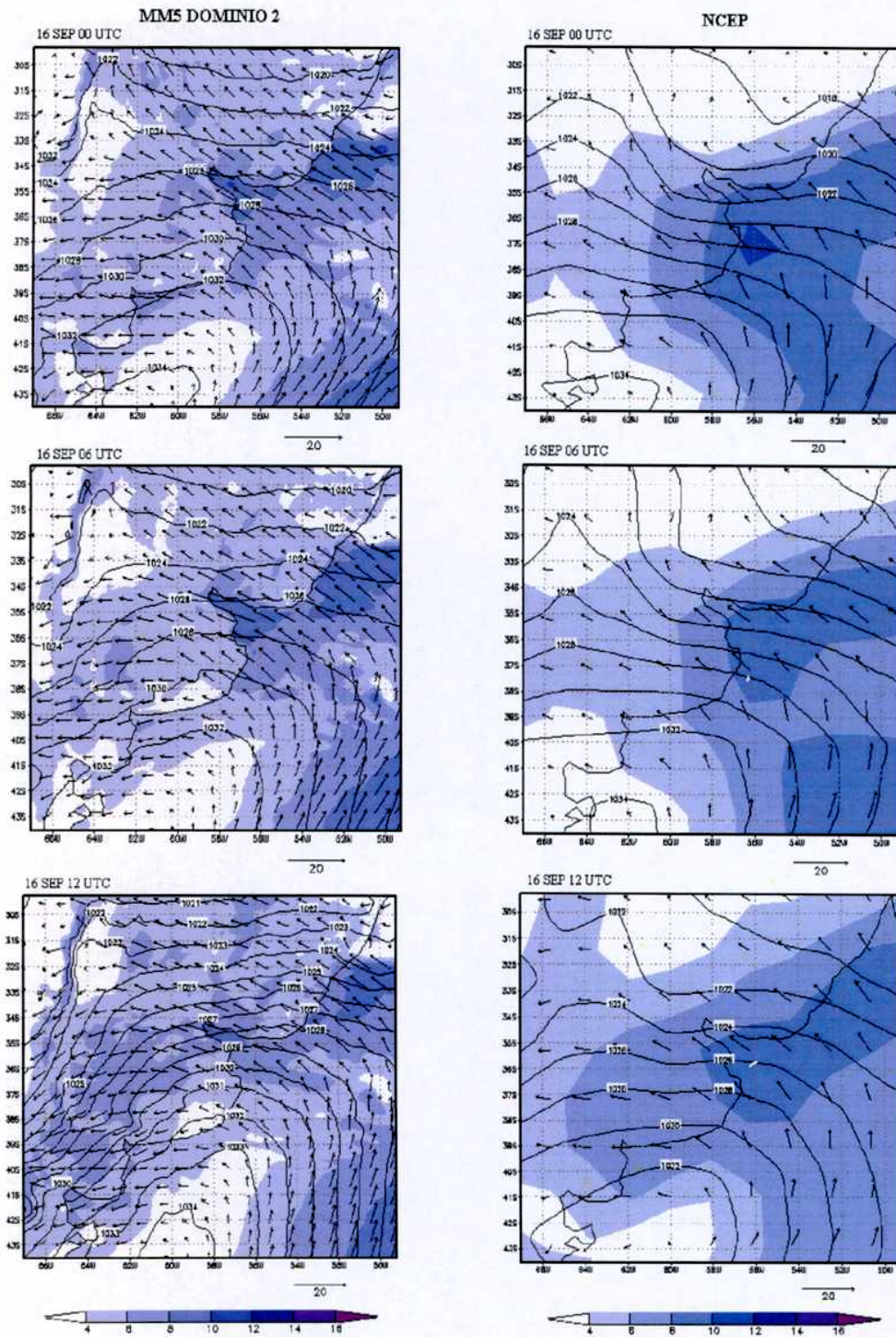


Fig.3.1.20 Presión a nivel del mar (hPa) (líneas), intensidad (sombreado) y dirección del viento a 10m (m s^{-1}) (vectores), modeladas con MM5-Dominio 2 (paneles izquierdos) y reanálisis NCEP/NCAR (paneles derechos), para el 16 de Septiembre 00, 06 y 12 UTC.

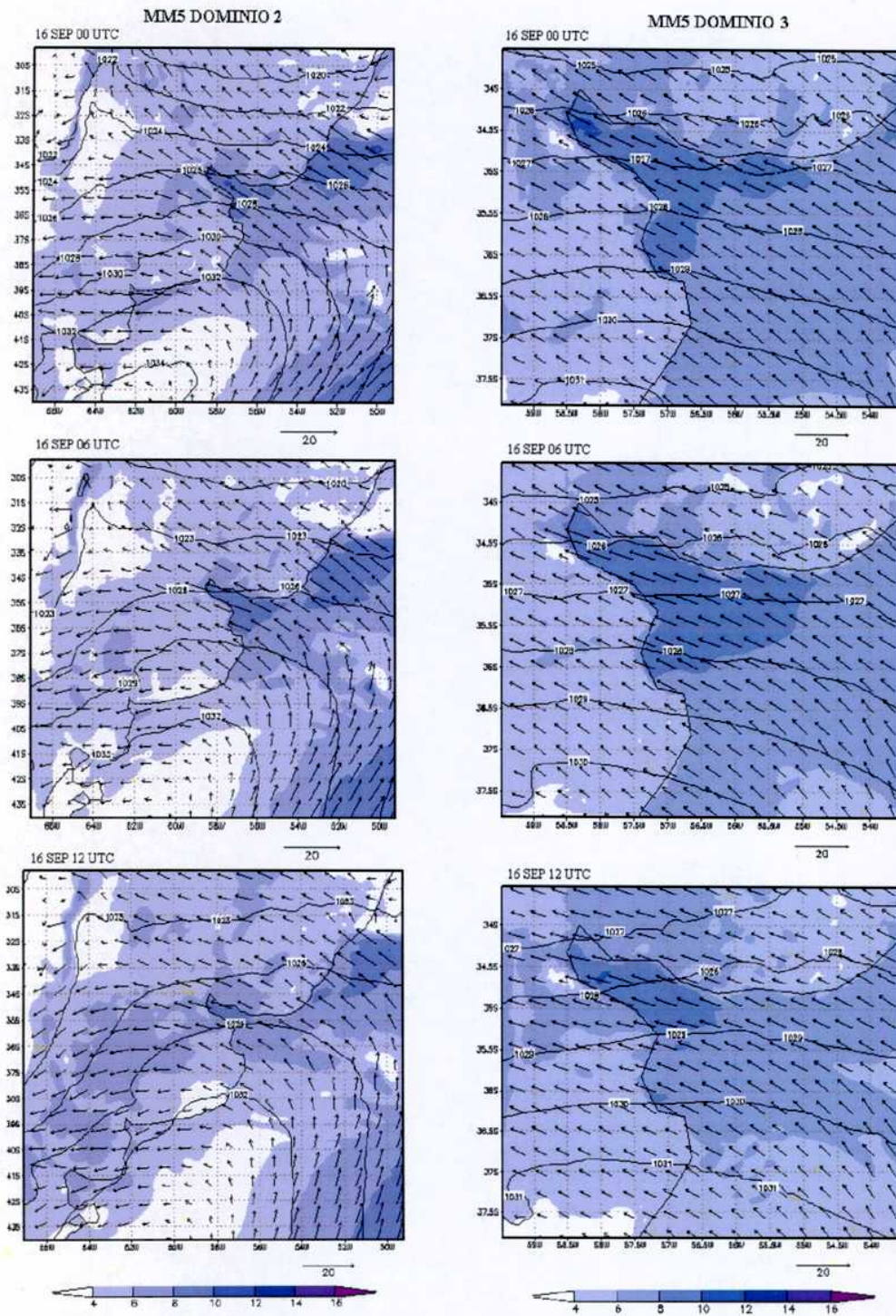


Fig.3.1.21 Presión a nivel del mar (hPa) (líneas), intensidad (sombreado) y dirección del viento a 10m (m s^{-1}) (vectores), modeladas con MM5-Dominio 2 (paneles izquierdos) y MM5-Dominio 3 (paneles derechos), para el 16 de Septiembre 00, 06 y 12 UTC.

La fig. 3.1.22 corresponde al 11 de octubre donde se observan vientos del S-SE sobre el estuario del Río de la Plata. En este caso podemos ver la formación de un sistema de alta presión sobre la Patagonia, el modelo muestra el sistema con su centro sobre el océano Atlántico y presenta una forma alargada siguiendo la dirección de la costa, de manera el viento adquiere una marcada componente Sur a lo largo de la costa. Para las 06 UTC el sistema de alta presión se cierra, con su centro en 42° S y 64° W sobre Península de Valdez. El viento continúa siendo del sector S sobre la costa Argentina a la altura de la estación Mar del Plata, hasta alcanzar la boca del estuario, en ese punto tendría una pequeña inclinación SE. Al igual que en el modelo, en los campos de NCEP se observa un centro de alta presión con una inclinación en dirección SW lo que provoca que vientos del SE sobre el estuario. Durante los tiempos siguientes este sistema se mantiene estacionario, a las 12 UTC vemos el centro de alta presión ubicado sobre el océano frente a Península de Valdez. Este pequeño desplazamiento del anticiclón hacia el este tiene un efecto en la dirección del viento que se mantiene del sector SE durante todo el día.

En líneas generales el modelo logra representar el patrón de la escala sinóptica para los tiempos analizados. Por otro lado, en los mapas de NCEP, se observa una zona de convergencia del al Noreste del Dominio y una zona donde se intensifica el viento aproximadamente 42° S 40° W, que están bien representados por el modelo en el Dominio 1, lo que indica una buena representación de los campos del viento a 10 metros por parte del modelo atmosférico.

La Fig 3.1.23 corresponde al MM5 dominio 2 y NCEP, de esta comparación podemos ver que el si bien modelo muestra vientos del S-SE sobre el estuario, estos son más intensos que los de NCEP para esa zona. Esta relación se mantiene durante todo los tiempos, aunque es más notorio para las 00 UTC donde el viento calculado por el modelo muestra mayores intensidades respecto de NCEP sobre la cabecera del estuario. Por otro lado la ubicación del centro de alta presión es determinante de la dirección del viento incidente en el Río de la Plata, siendo del sector SE para NCEP y del sector S-SW el modelado. En la Fig. 3.1.24 se presentan los campos modelados dominio 2 y dominio 3, donde se observa con mayor detalle los campos de viento sobre el área de estudio. Para las 00 UTC observamos vientos de la dirección SSO-S, a las 06 se observa una pequeña inclinación E y a las 12 UTC inciden en dirección S-SE sobre el estuario del Río de la Plata.

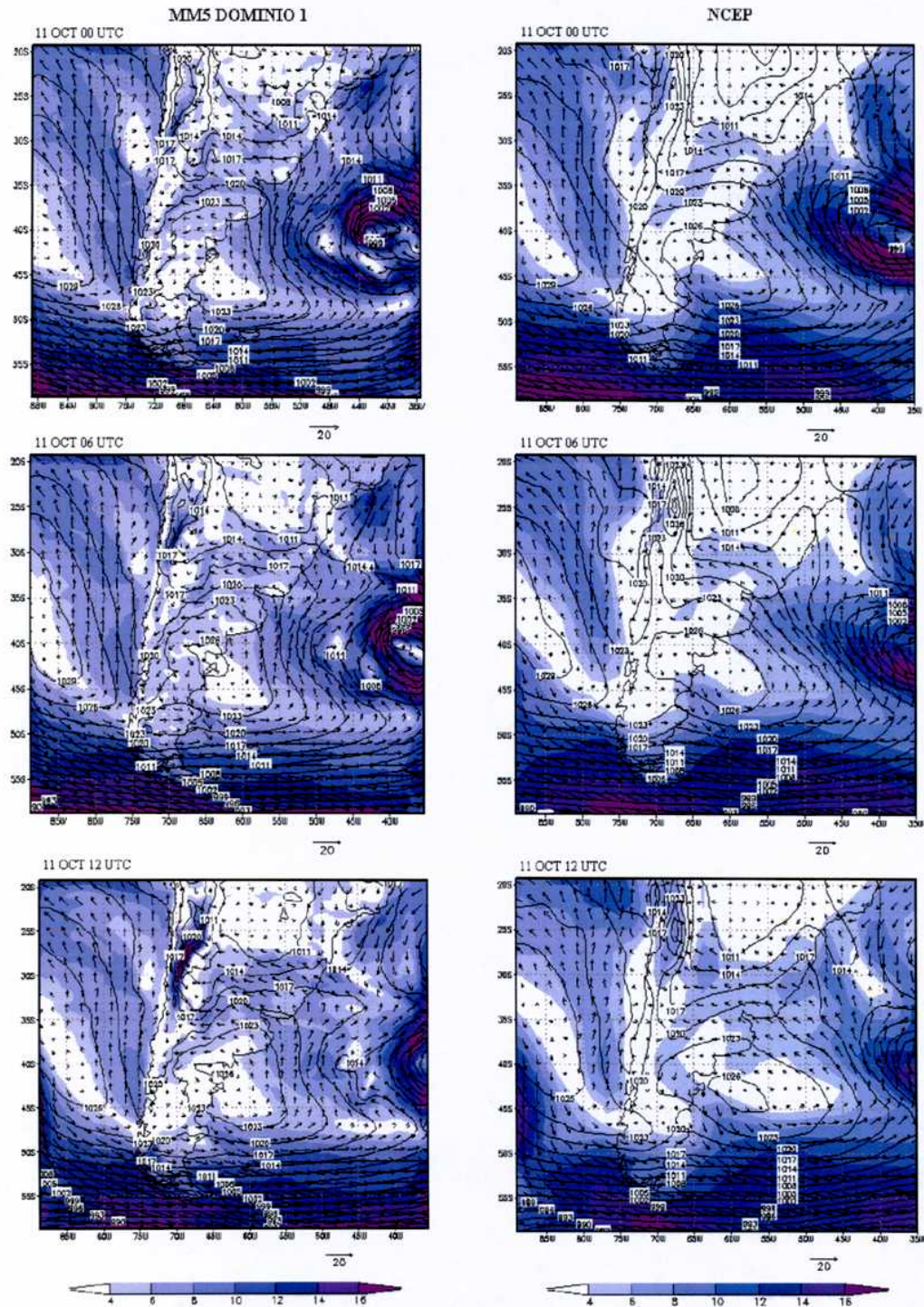


Fig.3.1.22 Presión a nivel del mar (hPa) (líneas), intensidad (sombreado) y dirección del viento a 10m (m s^{-1}) (vectores), modeladas con MM5-Dominio 1 (paneles izquierdos) y reanálisis NCEP/NCAR (paneles derechos), para el 11 de Octubre 00, 06 y 12 UTC.

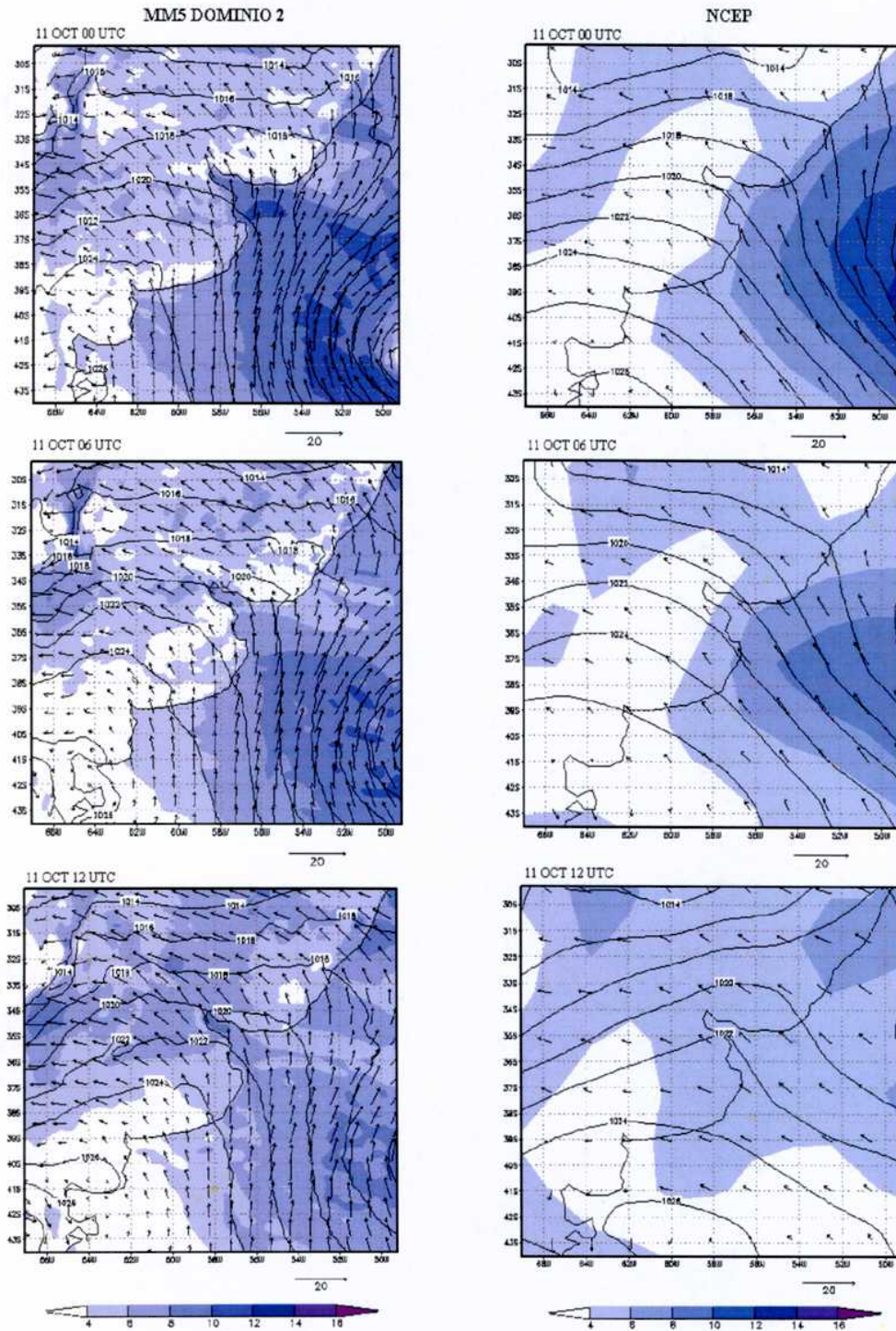


Fig.3.1.23 Presión a nivel del mar (hPa) (líneas), intensidad (sombreado) y dirección del viento a 10m (m s^{-1}) (vectores), modeladas con MM5-Dominio 2 (paneles izquierdos) y reanálisis NCEP/NCAR (paneles derechos), para el 11 de Octubre 00, 06 y 12 UTC.

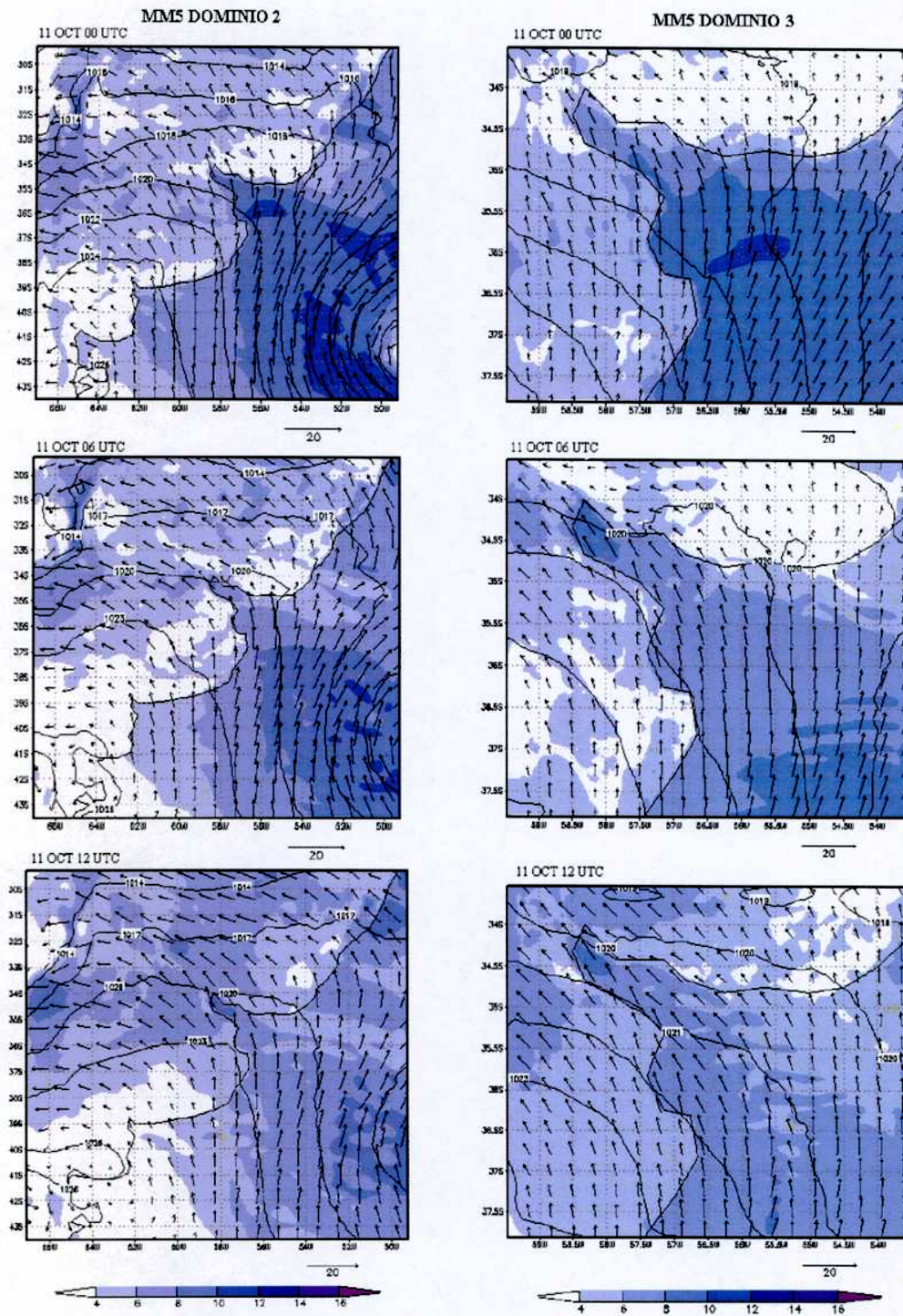


Fig.3.1.24 Presión a nivel del mar (hPa) (líneas), intensidad (sombreado) y dirección del viento a 10m (m s^{-1}) (vectores), modeladas con MM5-Dominio 2 (paneles izquierdos) y MM5-Dominio 3 (paneles derechos), para el 11 de Octubre 00, 06 y 12 UTC.

Por último analizamos el 28 de agosto del 2007 con vientos del NW, la fig. 3.1.25 muestra los mapas modelados para el dominio 1 y los de NCEP. A la 00UTC el modelo muestra un centro de alta presión ubicado al noreste del estuario lo que genera vientos en dirección NW sobre el Río de la Plata. Esta situación se mantiene para las 06 UTC, el viento continúa en dirección NW sobre el estuario, a las 12 UTC ya no se observa el sistema de alta presión, el viento cambia su dirección sobre el río.

Respecto de los campos de NCEP se observa un patrón similar, con el sistema de alta presión sobre Uruguay provocando vientos del NW sobre la cabecera del estuario. Esta situación se mantiene para las 06 UTC, a la 12 UTC no se observa el sistema de alta presión y el viento rota al SW.

En ambos casos, modelo y NCEP, se observa una zona de convergencia donde se intensifica el viento, si bien el modelo logra representar esta convergencia, la está representando algo mas al Sur respecto NCEP. A las 06 UTC vemos claramente esta convergencia prácticamente sobre el estuario en los campos de NCEP y unos grados hacia el Sur para el modelo, aunque menos distante que para las 00 UTC. Al comparar las 12 UTC el modelo muestra esta zona de convergencia sobre el estuario, con vientos del SW-NW, mientras que NCEP no se observaría la zona de convergencia y resulta poco claro identificar la dirección del viento sobre el área de estudio.

La fig. 3.1.26 corresponde a los campos para el modelo dominio 2 y NCEP, esta comparación permite mayor detalle de las variables analizadas. A las 00 UTC el modelo representa la zona de convergencia al Sur del dominio, mientras que NCEP la representa cercana a la desembocadura del estuario, mostrando intensidades mayores de viento sobre el océano. En ambos casos los vientos sobre la cabecera del estuario provienen en dirección NW. A las 06 UTC, continúan los vientos del NW para el modelo con intensidades mayores sobre el río, respecto de NCEP. No se observa claramente la zona de convergencia para este tiempo y NCEP muestra vientos poco intensos sobre el área de estudio. Para las 12 UTC el modelo muestra vientos del W sobre el estuario y NCEP vientos del NE.

La fig. 3.1.27 contiene los campos modelados dominio 2 y dominio 3 (18 y 6km), en este caso podemos observar claramente la dirección del viento que incide en dirección NW sobre la cabecera del estuario y esto se mantiene para las 06 y 12 UTC, en ambas simulaciones. Aunque para las 12 UTC, sobre el continente antes del llegar al estuario, el viento proviene del W y toma una pequeña inclinación SW sobre el Río de la Plata.

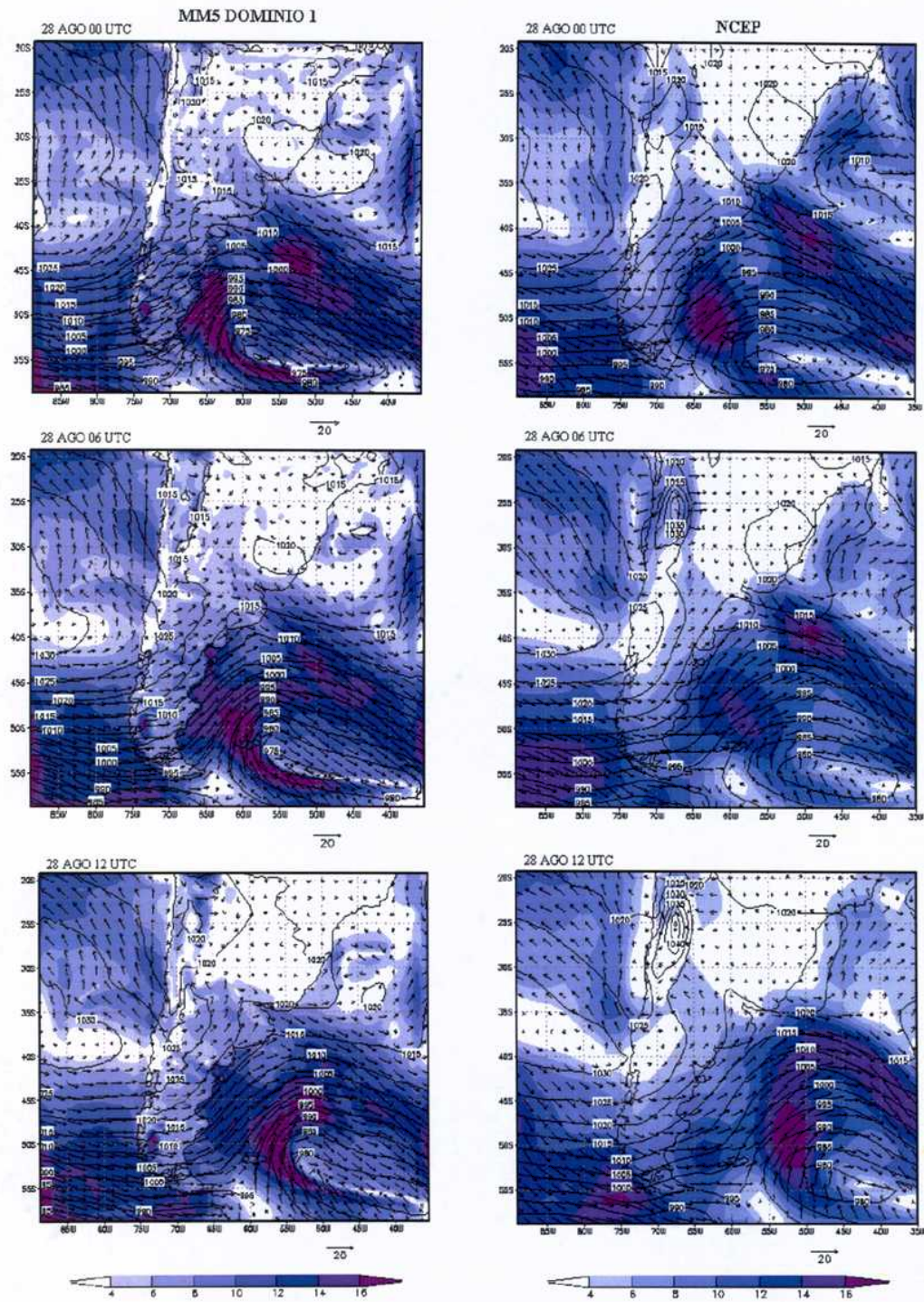


Fig.3.1.25 Presión a nivel del mar (hPa) (líneas), intensidad (sombreado) y dirección del viento a 10m (m s^{-1}) (vectores), modeladas con MM5-Dominio 1 (paneles izquierdos) y reanálisis NCEP/NCAR (paneles derechos), para el 28 de Agosto 00, 06 y 12 UTC.

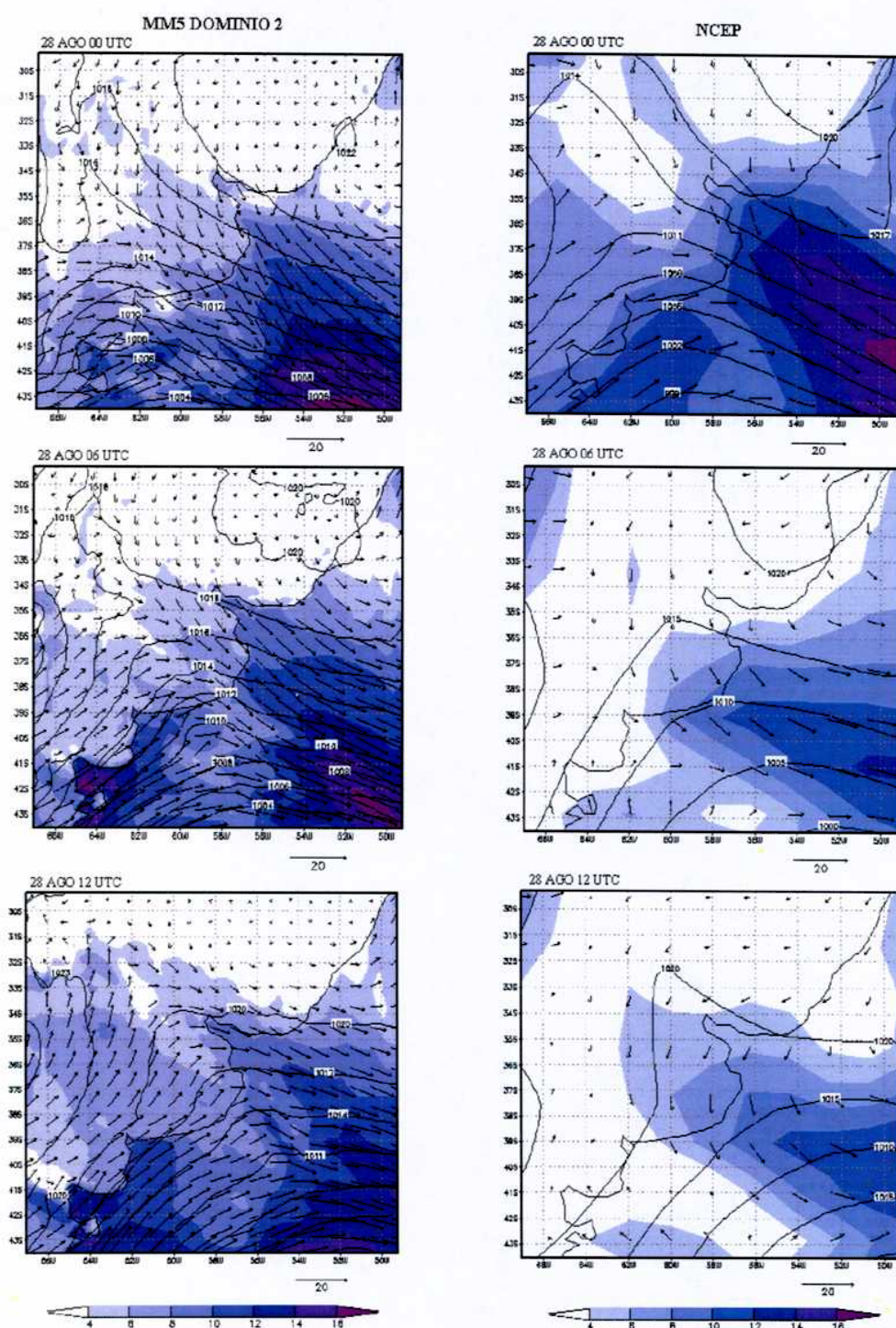


Fig.3.1.26 Presión a nivel del mar (hPa) (líneas), intensidad (sombreado) y dirección del viento a 10m (m s^{-1}) (vectores), modeladas con MM5-Dominio 2 (paneles izquierdos) y reanálisis NCEP/NCAR (paneles derechos), para el 28 de Agosto 00, 06 y 12 UTC.

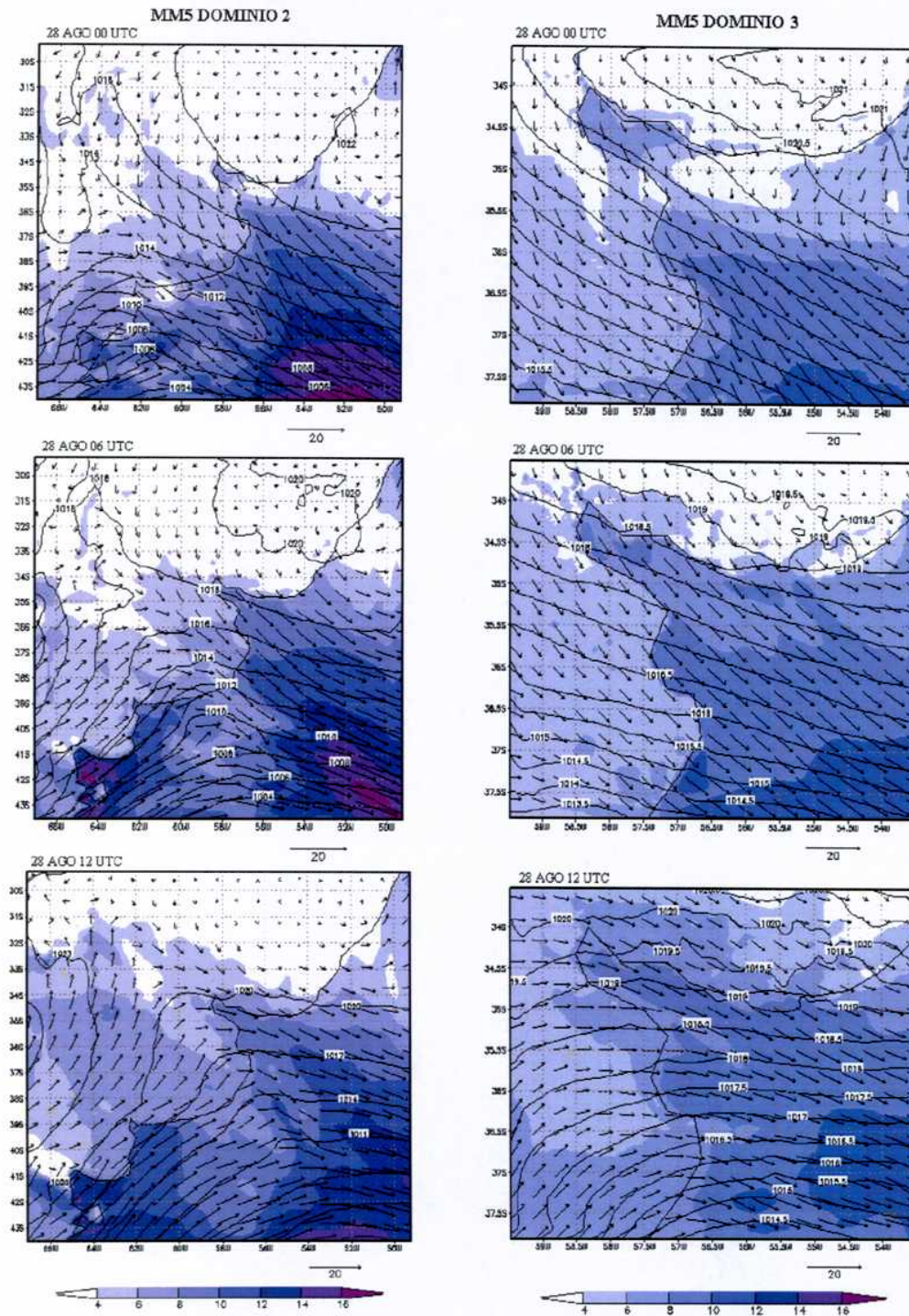


Fig.3.1.27 Presión a nivel del mar (hPa) (líneas), intensidad (sombreado) y dirección del viento a 10m (m s^{-1}) (vectores), modeladas con MM5-Dominio 1 (paneles izquierdos) y MM5-Dominio 3 (paneles derechos), para el 28 de Agosto 00, 06 y 12 UTC.

Podemos concluir que los campos de viento en 10 m y presión en superficie simulados por el modelo MM5 consiguen reproducir satisfactoriamente las características de circulación en capas bajas, siguiendo el forzamiento de la situación de gran escala. En general la dirección del viento está bien representada por el modelo en sus tres resoluciones, de esta forma se logra mejorar la resolución espacial del forzante atmosférico a través de la implementación del modelo Regional MM5. Se pretende del modelo que represente el comportamiento en general, que logre mejorar los detalles regionales con una buena resolución.

3.1.3 Cálculos Estadísticos

Un análisis mas detallado de la performance del modelo, lo obtenemos al analizar los cálculos realizados entre las observaciones y los campos modelados. Se presentan a continuación los cálculos realizados para el periodo 1996 entre los datos modelados, los datos de estación y de reanálisis NCEP/NCAR.

Realizamos los cálculos para la intensidad, las componentes u y v del viento en 10 metros y la presión en superficie para Junio-Julio de 1996. En la fig 3.28 se presenta el BIAS calculado entre las estaciones meteorológicas, los datos modelados con MM5 en sus tres resoluciones, MM5 con el esquema de capa límite ETA y el reanálisis NCEP. Para evaluar la capacidad del modelo en representar las características observadas, realizamos los cálculos de la salida del modelo vs. observaciones, y NCEP vs. observaciones (en todos los casos restamos los valores observados a los modelados y de reanálisis NCEP (Modelo-Estación/NCEP-Estación)).

En la fig. 3.1.28-a. se observa el BIAS para la intensidad del viento, en este caso observamos que para las distintas resoluciones modeladas con MM5, los valores de BIAS medio para la simulación de MM5 dominio 1, es de 1,07, mientras que el BIAS medio para los dominios 2 y 3 es de 0,64- 0,49 respectivamente. Respecto del BIAS medio para el reanálisis NCEP, es de 1,15 valor similar al obtenido con el Dominio 1 del modelo atmosférico MM5. El aumento en la resolución muestra una leve mejora sistemática para la intensidad del viento a 10 metros. En el caso de la simulación en que utilizamos el esquema de capa límite ETA obtenemos valores mayores de BIAS, es decir se obtiene un error sistemático mayor por lo que decidimos realizar el resto de las simulaciones utilizando el esquema de capa límite MRF.

Podemos observar que en la estación Ponton Recalada, todas las simulaciones muestran BIAS negativos, es decir, una subestimación en este punto para la intensidad del viento

comparado con el resto de las estaciones analizadas en este trabajo. Podríamos relacionar esto con la fricción debido a los efectos de rozamiento de la superficie, es decir al esfuerzo ejercido por el aire en la superficie de contacto. De manera que sobre el continente hay una mayor fricción que sobre el océano, resultando en una disminución en la velocidad del viento. En ese sentido al ser Ponton la única estación que se encuentra en el río puede ser el motivo de la subestimación de la intensidad del viento en este punto. En la comparación respecto a los dominios anidados, encontramos una menor subestimación de la intensidad del viento en superficie al aumentar la resolución. En este punto, los Dominios 2 y 3 tiene un valor de BIAS ligeramente menor lo que implica una menor subestimación, es decir una mejor representación de esta variable sobre el área de interés.

En la Fig. 3.1.28-b y 3.1.28-c se presenta el BIAS para la componente zonal y meridional de viento, el BIAS de la componente este-oeste modelada siempre resulta positivo respecto NCEP. La componente norte-sur muestra una subestimación aunque para los datos modelados con MM5 en todos los casos esta subestimación es menor respecto NCEP. En todas las simulaciones notamos una mayor subestimación de la componente norte-sur sobre el estuario, en la estación Ponton. Siendo el mejor ajuste para este punto, los datos modelados con MM5 en los dominios de mayor resolución Dominio 2 y Dominio 3 del de modelo atmosférico.

La fig. 3.1.28-d. corresponde al BIAS para la presión en superficie, en este caso podemos ver que para esta variable las simulaciones con MM5 en sus tres resoluciones presentan valores similares en todas las estaciones. El BIAS medio para las simulaciones con MM5 es de 1,65, 1,5 y 1,64 para los dominios 1, 2 y 3 respectivamente. Mientras que para NCEP el BIAS medio de la presión es de -0,15 y 2,25 para la simulación con MM5 utilizando el esquema de capa límite ETA. En el caso de la simulación con el esquema de capa límite ETA, obtenemos BIAS mayores para todos los puntos de estación, es decir una sobreestimación de la presión utilizando este esquema. En el caso de NCEP para todos los puntos de estación se observan BIAS negativos, es decir subestima la presión en todos los puntos respecto de los observados y de los modelados con MM5.

En todos los casos observamos nuevamente valores negativos en la estación Ponton, lo que indica una subestimación de esta variable para este punto sobre el estuario. Respecto las simulaciones en sus tres dominios de resolución, el BIAS de la presión en

la estación Ponton, es próximo a 0 para los tres dominios, la mejor representación la estaríamos logrando con las simulaciones del MM5 en sus distintas resoluciones.

En este sentido podríamos suponer un comportamiento diferencial del error sistemático según la ubicación de la estación, que condiciona la representatividad del estadístico que diagnostica la capacidad del modelo en la simulación del campo de vientos en 10 metros. El error sistemático de la componente meridional, la intensidad del viento y la presión, en todos los casos muestran una mayor subestimación para la estación Ponton.

Las resoluciones de los dominios 2 y 3 tienden a mejorar la representación de la intensidad y componente meridional del viento para la estación Ponton.

Respecto a la intensidad del viento, las simulaciones con MM5 representan mejor los valores observados en la estación, obtenemos BIAS mayores para NCEP en este punto, es decir una mayor subestimación de la intensidad del viento para este punto por parte del reanálisis NCEP y una mejor representación de esta variable con el modelo MM5 en sus tres resoluciones, mostrando BIAS ligeramente menores para el modelo respecto de NCEP.

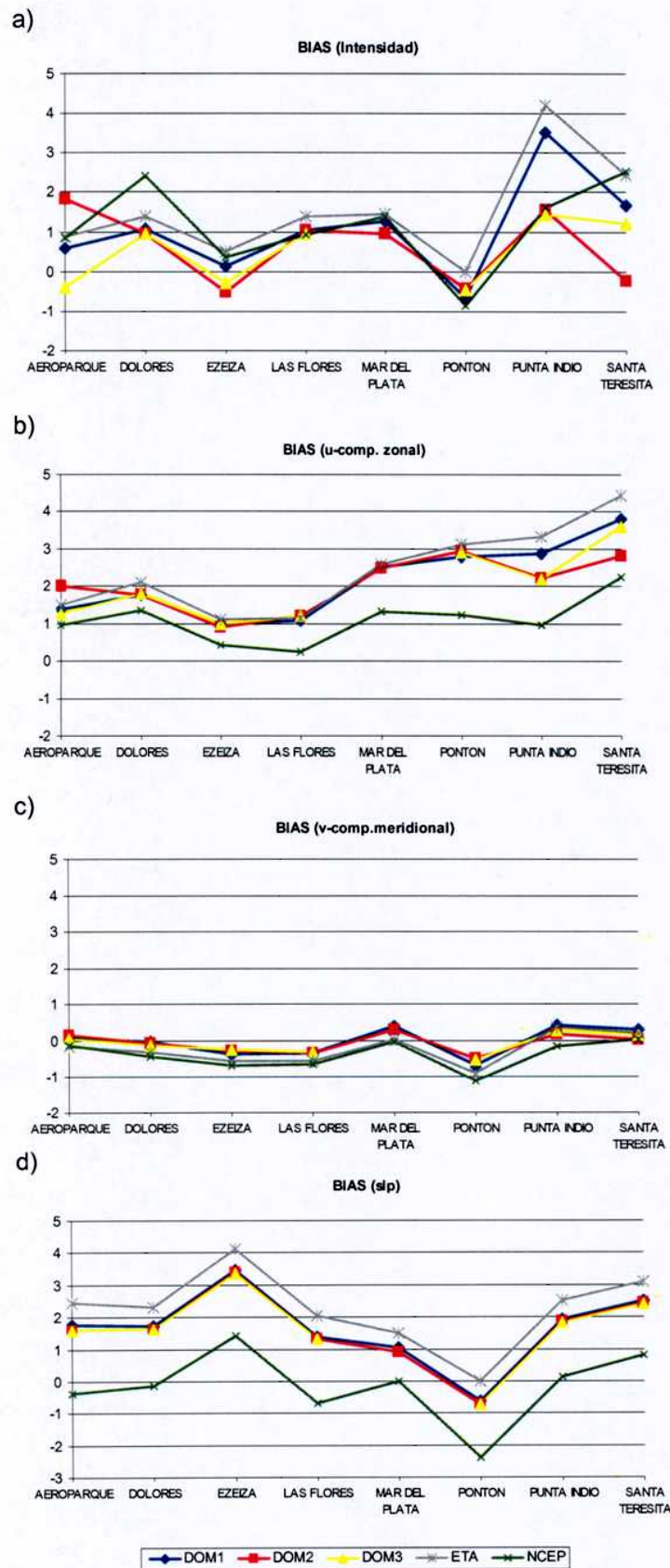


Fig.3.1.28. BIAS entre valores modelados y datos de estaciones meteorológicas y entre reanálisis NCEP y estaciones meteorológicas a) BIAS de la intensidad del viento a 10m, b) BIAS de la componente zonal, c) BIAS de la componente meridional, d) BIAS de la presión en superficie

En la fig. 3.1.29 se presentan los cálculos del error medio absoluto, es decir el error total de la simulación. El error medio absoluto promedio de la intensidad del viento para las simulaciones con MM5 en sus tres dominios es de 2,50, 2,38 y 2,36 respectivamente, mientras que el error medio absoluto promedio para NCEP es de 2,60. La fig. 3.1.29-a corresponde a los cálculos para la intensidad del viento, en este caso todas las simulaciones muestran valores similares, no hay diferencia entre las distintas resoluciones del MM5 y NCEP. Aunque en promedio se obtiene un menor error en la representación de la intensidad del viento con el modelo atmosférico MM5. La fig. 3.1.29-b corresponde a la componente zonal del viento, observamos que las simulaciones con MM5 en sus tres resoluciones y NCEP muestran valores similares para todas estaciones. Siendo en todos los casos el error mayor para la estación Ponton, es decir en este punto se obtienen los mayores errores para la componente este-oeste del viento. En la fig. 3.1.29-c. se presentan los cálculos para la componente meridional del viento, todas las simulaciones muestran valores similares. En la estación Ponton obtenemos los valores más altos de error medio absoluto para todas las simulaciones con MM5 y para NCEP. En este punto tenemos un mayor error en la representación de la componente norte-sur y obtenemos una mejora en las simulaciones con los dominios 2 y 3 del MM5. El error medio absoluto para las simulaciones de mayor resolución tiene valores ligeramente menores que NCEP. En la fig. 2.1.29-d se presenta el error medio absoluto para la presión a nivel del mar, observamos que las simulaciones de MM5 en sus tres resoluciones no muestran diferencias entre si, el caso de la simulación con el esquema de capa límite ETA obtenemos los mayores valores por lo que claramente decidimos utilizar el esquema de capa límite MRF con el que realizamos el anidado. Respecto a los valores obtenidos para el reanálisis NCEP, presenta valores menores que las simulaciones con MM5, salvo en la estación Ponton Recalada que obtenemos el mismo valor en las simulaciones con MM5 en sus tres resoluciones y con NCEP. En líneas generales, al comparar los valores de BIAS y error medio absoluto obtenidos podemos concluir que las series modeladas con MM5 en sus tres resoluciones muestran valores similares, no hay una diferencia con el aumento de la resolución para ninguna de las variables analizadas. En todos los casos el mayor error lo obtenemos en la estación Ponton Recalada, para todas las simulaciones del MM5 y para NCEP.

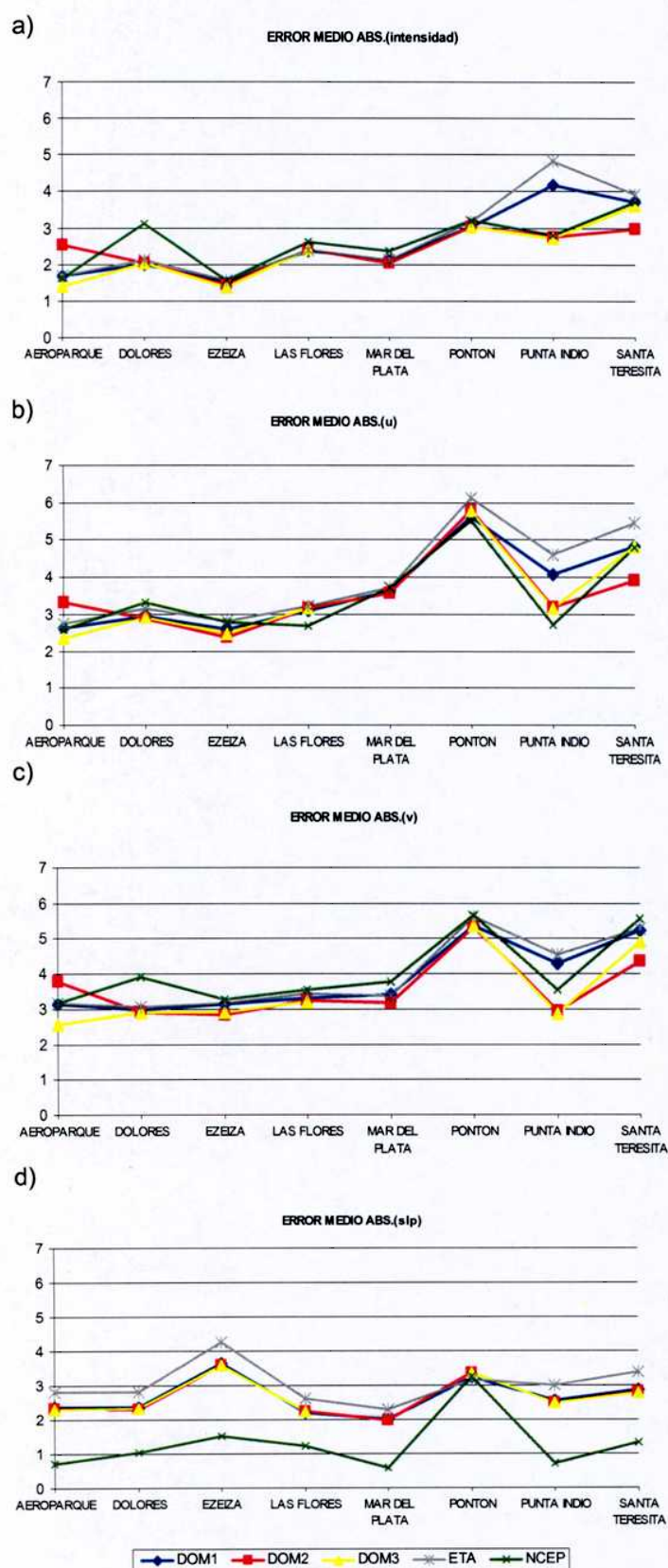


Fig.3.1.29. Error medio absoluto entre valores modelados y datos de estaciones meteorológicas y entre reanálisis NCEP y estaciones meteorológicas. a) Error de la intensidad del viento a 10m, b) Error de componente zonal, c) Error de componente meridional, d) Error de la presión en superficie.

En la tabla 3.2 se presentan los cálculos correspondientes a la correlación de la presión en superficie para el periodo simulado de Junio y Julio de 1996. En todos los casos obtenemos correlaciones significativas de 0,90, con excepción de la estación Ponton Recalada donde obtenemos valores de 0,66, tanto para las simulaciones realizadas con MM5 en sus tres resoluciones como para NCEP. En términos generales obtenemos una buena correlación en la presión observada y la simulada con MM5 en sus tres resoluciones para el resto de las estaciones analizadas.

1996	AEROPARQUE	DOLORES	EZEIZA	LAS FLORES	MAR DEL PLATA	PONTON	PUNTA INDIÓ	SANTA TERESA
Presión a nivel del Mar								
DOM1	0.93	0.9	0.92	0.91	0.91	0.67	0.9	
DOM2	0.92	0.9	0.92	0.9	0.91	0.66	0.91	
DOM3	0.92	0.9	0.92	0.9		0.66	0.91	
NCEP	0.99	0.97	0.99	0.97	0.99	0.73	0.99	

Tabla 3.2. Correlación de la presión en superficie entre datos Modelados con MM5 en sus tres resoluciones, valores observados en estaciones y entre NCEP y valores observados en estaciones

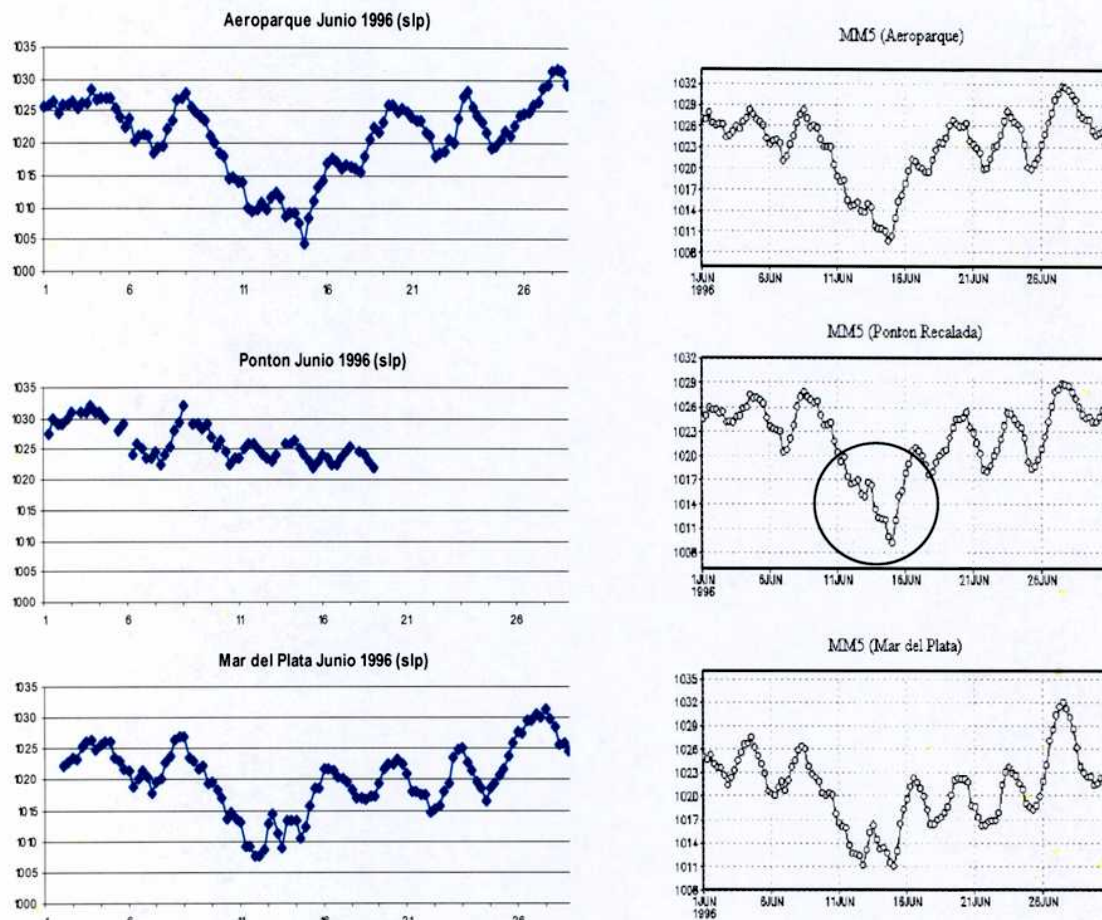


Fig.3.1.30. Evolución temporal de la presión en superficie observado (panel derecho), modeladas con MM5 dominio 1 (panel izquierdo), para las estaciones Aeroparque, Ponton Recalada y Mar del Plata.

De esta forma intentamos determinar el grado de precisión con el que las simulaciones del modelo se ajustan a las observaciones y determinar el grado de consistencia de los resultados obtenidos con el modelo atmosférico MM5. La fig.3.1.30 se presenta a fin de interpretar la baja correlación obtenida para la estación Ponton, de esta forma comparamos las series modeladas y observadas en las estaciones Aeroparque, Ponton Recalada y Mar del Plata, podemos ver claramente como para el día 16 de Junio, el modelo muestra en la estación Ponton Recalada presiones bajas mientras que en la estación no se observa, lo que es responsable de la baja correlación entre los datos observados y modelados para este punto dentro del estuario del Río de la Plata.

La validación de las simulaciones realizadas con MM5 indica un buen comportamiento del modelo, aunque no se observan grandes diferencias en términos estadísticos para las distintas resoluciones en que realizamos las simulaciones. Podemos distinguir una diferencia en los resultados para la estación Ponton Recalada, posiblemente relacionado con la ubicación de la estación sobre el río. Para este punto, se logra una mejor representación de las condiciones observadas al utilizar los dominios de mayor resolución del modelo atmosférico MM5 (dominios 2 y 3).

Este resultado indica una adecuada representación de las características del viento en 10 metros y presión en superficie por parte del modelo atmosférico MM5. Donde en algunos casos los dominios de mayor resolución logran mejorar la representación de estas variables sobre el área de estudio. Lo que indica un adecuado funcionamiento del modelo MM5 en sus dominios, a través de la técnica de anidado unidireccional.

3.2. Resultados HamSOM

Tal como se explicó anteriormente, los principales forzantes que actúan sobre la dinámica del Río del Plata son la marea astronómica, la descarga de los tributarios y el forzante atmosférico (viento en 10 metros y presión en superficie).

Habiendo utilizado el modelo MM5 para representar los forzantes atmosféricos, uno de los principales objetivos del trabajo es poder simular la generación de ondas de tormenta con una gran resolución, que obtenemos a través de los dominios anidados del modelo atmosférico MM5.

Se pretende determinar la influencia del aumento en la resolución de los forzantes atmosféricos, al forzar el modelo hidrodinámico HamSOM con las distintas resoluciones del viento a 10 metros y presión en superficie modeladas previamente. De esta forma, los campos de vientos que actúan sobre la superficie del agua fueron generados a partir de los vientos modelados por MM5 en tres resoluciones (Dominio 1 = 54 Km., Dominio 2 = 18km y Dominio 3 = 6km), a partir del reanálisis NCEP y NCEP +COEF con un coeficiente de corrección para vientos, propuesto por Simionato y otros (2006), donde los autores incrementan las intensidades con un factor de la forma $1 + \exp[-(W/X)^m]$ (W es el módulo de la intensidad del viento, X un valor de velocidad (del orden de las intensidades mayores de la base de datos) y m un exponente). La utilización de este coeficiente busca duplicar los valores de las intensidades muy bajas de vientos y mantener inalteradas las intensidades mayores.

Como parámetros estadísticos para evaluar la calidad de las simulaciones, calculamos el coeficiente de correlación y la pendiente de la recta de regresión, entre los datos observados y los modelados por HamSOM. Estos parámetros permiten evaluar las diferencias y similitudes entre series de datos modelados respecto de los observados. Por un lado la correlación da idea de la variabilidad de las series simuladas y observadas, mientras que la pendiente de la recta de regresión indica la intensidad del evento modelado respecto del observado. Una pendiente menor (mayor) a 1, indica una subestimación (sobreestimación) de los valores modelados respecto a los observados. Una pendiente de valor igual a 1, representa un ajuste perfecto de la intensidad del evento modelado respecto al observado.

Disponemos de datos de altura del Río de la Plata en forma horaria, facilitados por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) para las estaciones Palermo y Oyarvide.

Realizamos los cálculos entre los datos observados y los simulados con el modelo HamSOM al ser forzado con las tres resoluciones del modelo atmosférico MM5 (AAA, ABB y ABC), con los datos de NCEP y con NCEP+COEF, donde coef corresponde factor de corrección para vientos.

Realizamos los cálculos y comparaciones en los periodos que contábamos con datos provenientes de estaciones de mareógrafo, para ello, extrajimos las series temporales correspondientes a los puntos más cercanos de la retícula del modelo a la estación y de esta forma realizamos la comparación entre los datos observados y los simulados por el modelo HamSOM para ese punto.

Evalúamos el nivel del Río de la Plata provocado puramente por efectos meteorológicos, de manera que filtramos la marea astronómica y consideramos la “onda de tormenta” que depende básicamente de la intensidad y persistencia del viento, para ello aplicamos un filtro pasa bajos con un periodo de corte de 30 hs., lo que permite eliminar la información de procesos de alta frecuencia con una escala temporal menor a un día, incluida la marea y la variabilidad de alta frecuencia del viento, como ser la brisa.

En la fig. 3.2.1, se presentan las series temporales correspondientes a la estación Oyarvide para Junio de 1996 y las modeladas con HamSOM al ser forzadas con MM5 dominio 1 y NCEP, los paneles superiores corresponden a las series temporales con la marea astronómica y la onda de tormenta, es decir el nivel del río cuando es afectado por las dos componentes. En los paneles inferiores se presentan las series filtradas, que corresponden al nivel del río afectado por la onda de tormenta.

Para que los datos observados y simulados sean comparables, a las series de mareógrafo les restamos el nivel medio de la columna, en este caso para la Torre Oyarvide el nivel medio es de 0,85m, mientras que en la estación Palermo el nivel medio es de 0,79m., estos valores fueron obtenidos en la tabla de marea 2008 (Servicio de Hidrografía Naval).

En primer lugar analizamos la simulación correspondiente a 1996, el periodo comparado fue del 3 junio al 15 de julio en la estación Oyarvide y del 3 junio al 27 de julio para la estación Palermo. Respecto al periodo 2007, realizamos los cálculos del 2 al 26 de agosto y del 2 al 20 de octubre, para Oyarvide y Palermo. En el caso de

septiembre, solo contamos con datos de la estación Palermo, de manera que optamos por realizar la comparación de septiembre, solo para ese punto.

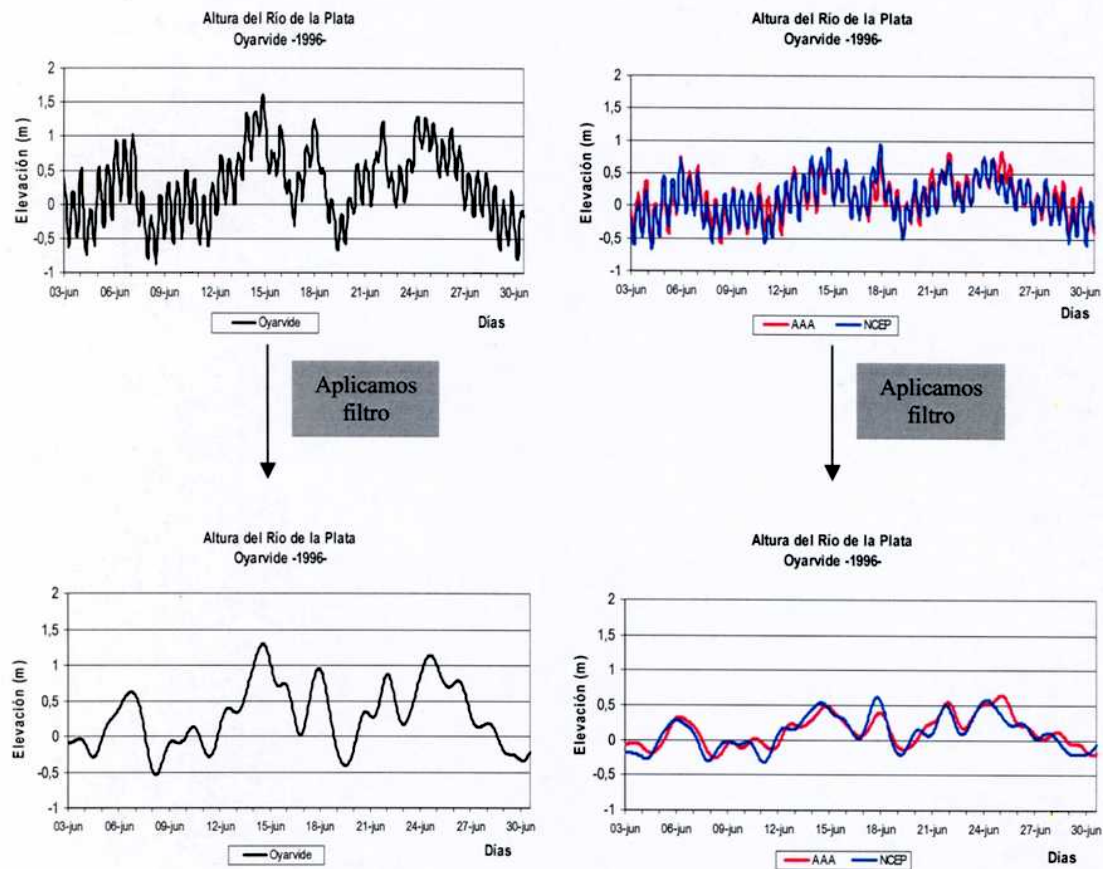


Fig.3.2.1. Altura del Río de la Plata (m), observada (panel derecho), modeladas HamSOM AAA y NCEP (panel izquierdo) en la estación Oyarvide Junio de 1996. Series filtradas (paneles inferiores).

En la fig 3.2.2 se presentan las series temporales correspondientes a las simulaciones de Junio y Julio de 1996 para la estación Oyarvide, las modeladas con HamSOM para los puntos mas cercanos a la estación cuando es forzado en su modo AAA, con NCEP y NCEP+COEF. La línea negra corresponde a los datos observados (mareógrafo), la línea roja corresponde a la simulada por el modelo HamSOM en la simulación AAA, mientras que la línea azul y la gris corresponden a las simulaciones en que utilizamos los reanálisis NCEP y NCEP+COEF con coeficiente, respectivamente.

Podemos observar una buena representación de la altura del río por parte del modelo HamSOM, en líneas generales el modelo acompaña la serie observada, logra representar en tiempo las variaciones del nivel, aunque la intensidad de los eventos modelados son menores respecto de los observados.

La simulación en que aplicamos NCEP con coeficiente (NCEP+COEF), el modelo logra una buena representación de la intensidad de los eventos, aunque en algunos casos resultaría en una sobreestimación. Podemos observar para el día 12 de junio (fig 3.2.2) el modelo, al ser forzado con NCEP más coeficiente, muestra un descenso de la altura del río de 1 metro, sobreestimando en gran medida esa bajante. Para el día 30 de junio, la simulación en que se utiliza el coeficiente muestra una sobreestimación del descenso de la columna, aunque en menor intensidad que para el 12 de Junio.

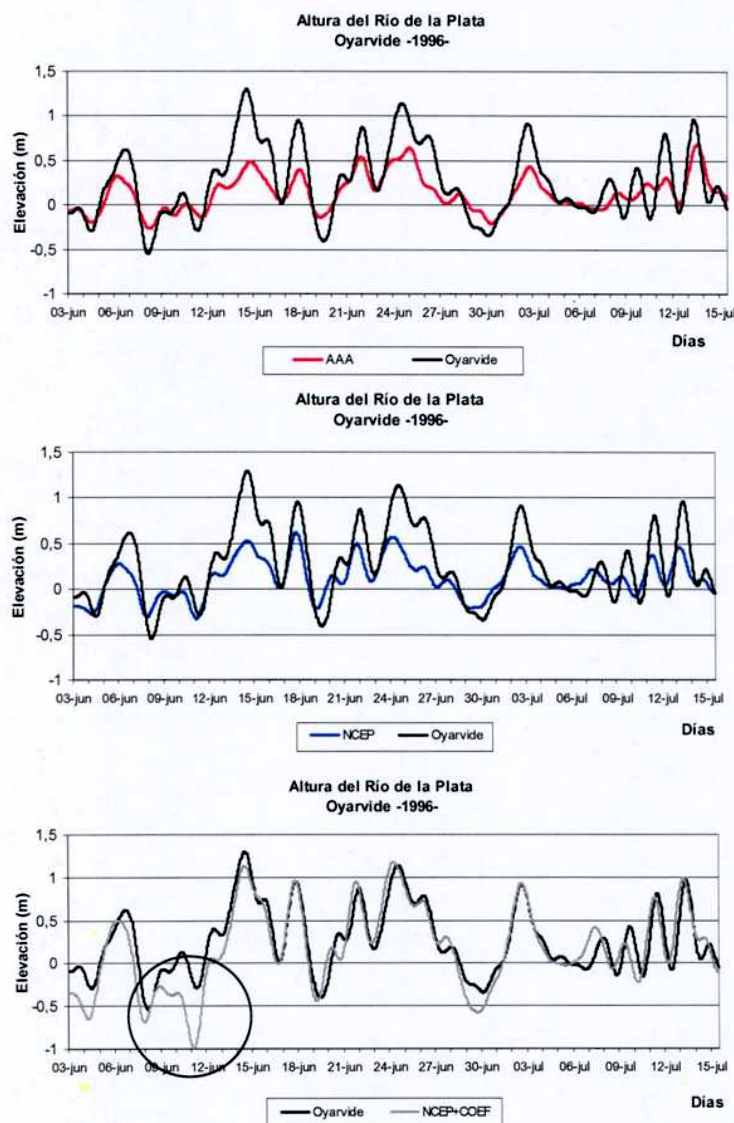


Fig.3.2.2. Alturas del Río de la Plata modeladas y observadas para junio y julio 1996, estación Oyarvide: a) Serie observada y modelada por HamSOM método AAA, b) Serie observada y modelada por HamSOM utilizando NCEP, c) Serie observada y modelada por HamSOM utilizando NCEP+COEF.

En la fig 3.2.3 se presentan los valores del modelo HamSOM en su modo AAA, ABB y ABC, es decir con las tres resoluciones del forzante atmosférico. En los tres casos no se observan diferencias, las series temporales se superponen lo que dificulta poder distinguir cada simulación en el gráfico. No observamos diferencias cuando forzamos el modelo HamSOM con las distintas resoluciones de los forzantes atmosféricos modelados previamente con MM5.

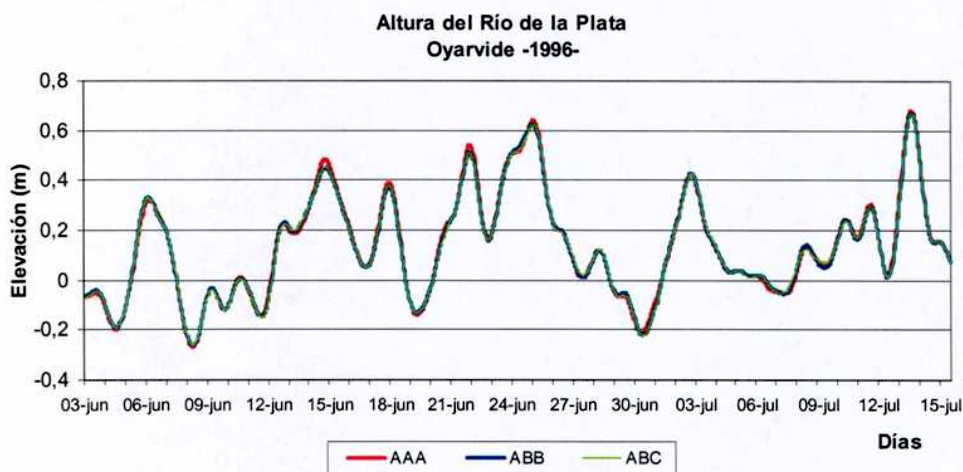


Fig.3.2.3. Alturas del Río de la Plata modeladas por HamSOM método AAA, ABB y ABC, punto de retícula correspondiente a estación Oyarvide, para Junio y Julio 1996.

La fig. 3.2.4 corresponde a las alturas registradas en la estación Palermo, para Junio y Julio de 1996, al igual que para la estación Oyarvide se presentan las series modeladas con HamSOM en su modo AAA, con NCEP y NCEP+COEF. Los gráficos correspondientes a los modos ABB y ABC muestran un comportamiento idéntico al modo AAA, por lo que no se presentan en este trabajo.

Podemos ver que el modelo logra representar en tiempo las variaciones de la altura de la columna y observamos un mejor ajuste de las intensidades de los eventos en su modo AAA respecto de la simulación en que utilizamos NCEP. Esto sugiere que estaríamos logrando una mejora en la representación de las intensidades del viento con el modelo atmosférico MM5. Respecto de la simulación de NCEP+COEF, para este punto al igual que en Oyarvide el modelo muestra una sobrestimación de 1 metro para la condición de bajante registrada el día 12 de junio, para el resto del periodo obtenemos un buen ajuste de las series modelada y la observada utilizando este coeficiente de corrección para la intensidad.

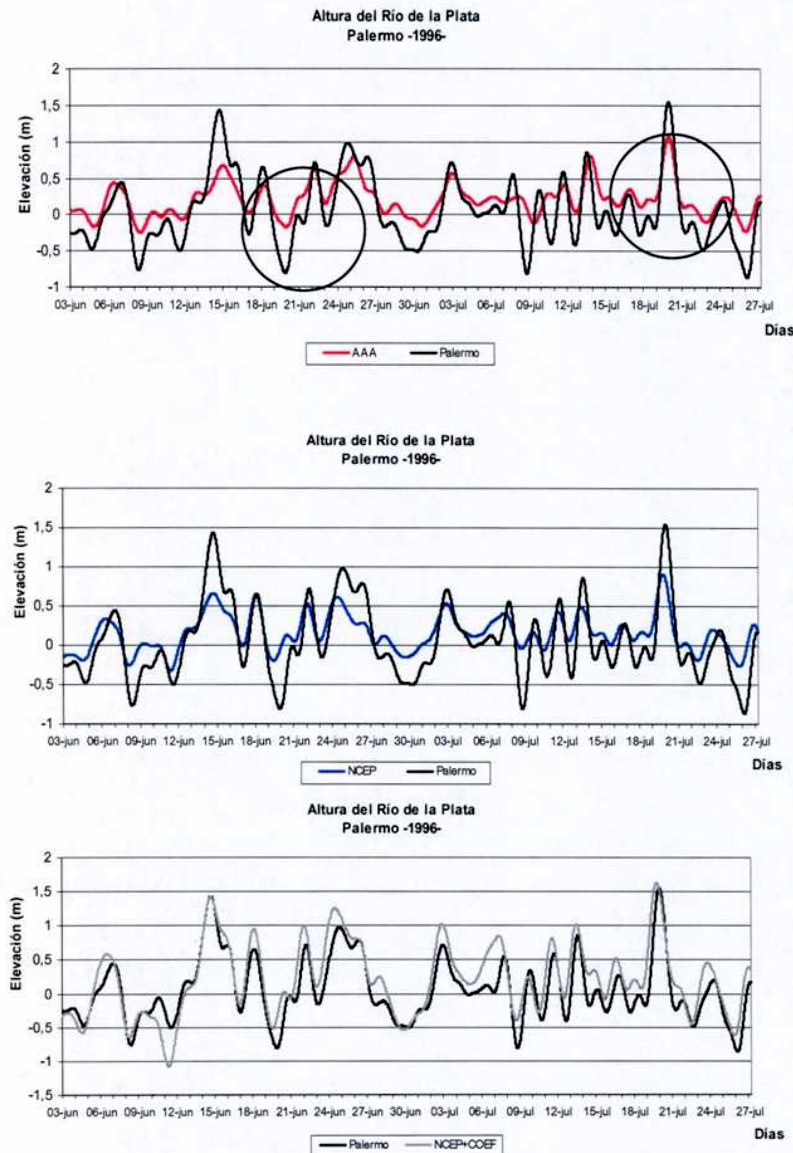


Fig.3.2.4. Alturas del Río de la Plata modeladas y observadas para junio y julio 1996, estación Palermo: a) Serie observada y modelada por HamSOM método AAA, b) Serie observada y modelada por HamSOM utilizando NCEP, c) Serie observada y modelada por HamSOM utilizando NCEP+COEF.

La tabla 3.3 corresponde a las correlaciones y la pendiente de la recta de regresión para junio y julio de 1996, en la estación Oyarvide y Palermo. Podemos observar que cuando HamSOM es forzado en su modo AAA, ABB, ABC, es decir con distintas resoluciones del forzante atmosférico modelado con MM5, la correlación no muestra diferencias significativas entre simulaciones.

Para la estación Oyarvide, el valor de la correlación es de 0.88 tanto en las simulaciones forzadas con las distintas resoluciones del modelo atmosférico MM5, como cuando es forzado con el reanálisis NCEP. En el caso de la simulación de NCEP+COEF

obtenemos un buen ajuste de la recta de regresión con una pendiente de 1.08, mientras que para el resto de las simulaciones, la pendiente presenta valores de 0.44-0.46.

En la estación Palermo obtenemos resultados similares a los obtenidos en Oyarvide. La correlación de las simulaciones AAA, ABB y ABC no muestra diferencias significativas, siendo en los tres casos y para la simulación en que utilizamos NCEP de 0.88. Respecto a la corrida de NCEP+COEF, obtenemos una correlación de 0.89 y pendiente de la recta de regresión con un valor igual a 1, mientras que en el resto de las corridas obtuvimos pendientes con valores del orden de 0.45-0.46.

Tabla 3.3. Coef de Correlación y Pendiente de la recta de regresión para junio-julio de 1996, en las estaciones Oyarvide y Palermo.

Oyarvide	AAA	ABB	ABC	NCEP	NCEP+COEF
Correlación	0,88	0,88	0,88	0,88	0,90
Pendiente	0,46	0,45	0,45	0,47	1,08
Palermo	AAA	ABB	ABC	NCEP	NCEP+COEF
Correlación	0,88	0,88	0,88	0,88	0,90
Pendiente	0,46	0,45	0,46	0,44	1,01

Si bien el análisis cuantitativo no muestra grandes diferencias entre simulaciones, haciendo una comparación cualitativa vemos que en algunos casos la simulación AAA acompaña mejor las series observadas respecto de las simulaciones en que utilizamos NCEP como forzante. Para el periodo 1996, en ambas estaciones, el modelo acompaña mejor los máximos cuando es forzado con los campos generados por el modelo atmosférico MM5, respecto de cuando es forzado con los campos de viento en 10 metros y presión en superficie del reanálisis NCEP. Por otro lado, la simulación utilizando NCEP+COEF logra mejorar el ajuste en cuanto a la intensidad de los eventos, aunque en algunos casos sobreestima la altura de la columna de agua.

En la fig. 3.2.5 se presentan las series correspondientes al mes de Agosto del 2007 para la estación Oyarvide, en líneas generales se obtiene una buena representación de los datos observados, el modelo logra acompañar las alturas observadas en el mareógrafo aunque la intensidad de los eventos modelados estarían siendo subestimados respecto de las observaciones. Estos resultados sugieren que el modelo MM5, logra representar las condiciones meteorológicas vinculadas a provocar bajantes y crecidas en el Río de la Plata, aunque con menor intensidad que las observadas, es decir captura la dirección del viento pero subestima la intensidad.

En el caso de la simulación con NCEP muestra intensidades levemente mayores en la representación de los eventos para este mes respecto de las simulaciones forzadas con

MM5. En el caso de la simulación con el coeficiente de corrección para vientos que aplicamos a NCEP, se logra un buen ajuste en cuanto a la intensidad de los eventos aunque se observa una subestimación durante todo el periodo.

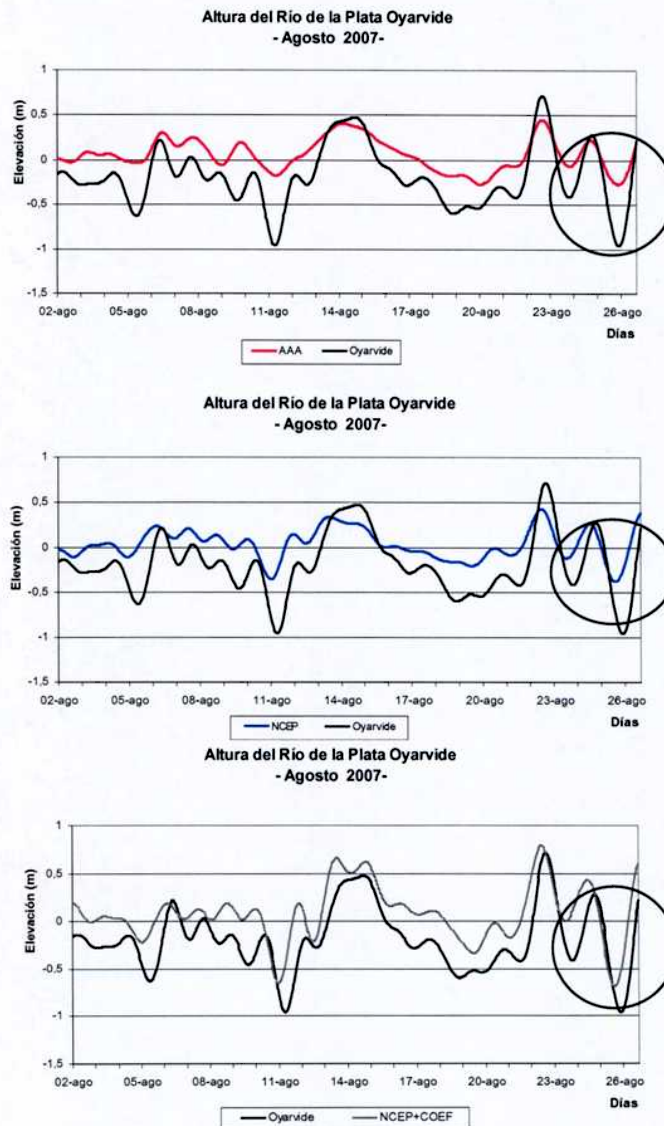


Fig.3.2.5. Alturas del Río de la Plata modeladas y observadas para Agosto del 2007, en la estación Oyarvide: a) Serie observada y modelada por HamSOM método AAA, b) Serie observada y modelada por HamSOM utilizando NCEP, c) Serie observada y modelada por HamSOM utilizando NCEP+COEF.

Al comparar las series observadas y modeladas para este mes en la estación Palermo, contrariamente a lo observado en Oyarvide, obtenemos un mejor ajuste al utilizar el modelo HamSOM en su forma AAA respecto de NCEP. En la fig 3.2.6 se presentan los gráficos correspondientes a la estación Palermo para Agosto del 2007, las simulaciones en que utilizamos los forzantes atmosféricos modelados con MM5 se obtiene un buen ajuste respecto de las observaciones. El modelo logra representar en tiempo los eventos,

aunque las intensidades se muestran algo inferiores en comparación a las observadas. Respecto de la utilización de NCEP con el coeficiente de corrección, este logra acompañar de forma correcta la intensidad de los eventos observados, para este punto la subestimación que observamos durante todo el periodo en la estación Oyarvide, no lo vemos. Respecto a las simulaciones, utilizando los forzantes atmosféricos de mayor resolución (ABB y ABC) las series son similares a las obtenidas en la simulación AAA, de manera que no las presentamos en este trabajo. El modelo HamSOM no mostraría diferencias significativas ante el aumento en la resolución de los forzantes atmosféricos modelados con MM5, lo que indica una baja sensibilidad del modelo HamSOM a la resolución del forzante atmosférico.

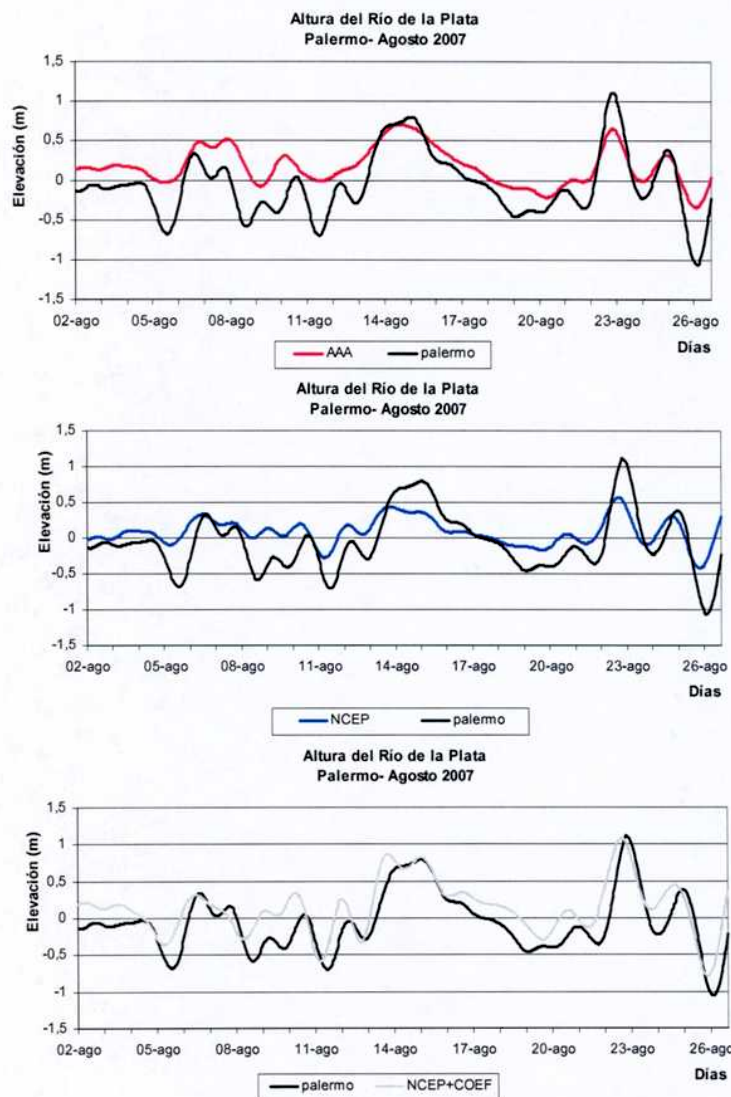


Fig.3.2.6. Alturas del Río de la Plata modeladas y observadas para Agosto del 2007, en la estación Palermo: a) Serie observada y modelada por HamSOM método AAA, b) Serie observada y modelada por HamSOM utilizando NCEP, c) Serie observada y modelada por HamSOM utilizando NCEP+COEF.

En la tabla 3.4 se presentan las correlaciones y la pendiente de la recta de regresión obtenida en las estaciones Oyarvide y Palermo para Agosto del 2007. Cuando el modelo HamSOM es forzado con los datos modelados por MM5 obtenemos una correlación de 0.89 en su modo AAA y 0.90 en las simulaciones ABB y ABC, lo que muestra una leve mejora en las correlaciones al utilizar como forzantes atmosféricos los campos simulados con una mayor resolución. Mientras que los valores resultantes para las simulaciones en que utilizamos NCEP y NCEP+COEF como forzantes atmosféricos, fueron de 0.79 y 0.83 respectivamente. En el caso de la comparación para la estación Palermo, los resultados son coincidentes con los obtenidos en la estación Oyarvide, con correlaciones de 0.86 para las tres corridas en que utilizamos como forzante atmosférico los datos modelados por el MM5, (AAA, ABB y ABC). Mientras que para las corridas en que utilizamos NCEP y NCEP+COEF, las correlaciones fueron 0.79 y 0.85 respectivamente.

En cuanto al análisis de la pendiente de la recta de regresión, en todos los casos obtuvimos un mejor ajuste al utilizar NCEP+COEF, esto indica que esta simulación es la que mejor capta la intensidad de los eventos modelados. Por otro lado al comparar las pendientes obtenidas con las simulaciones en que los forzantes fueron modelados con MM5, obtenemos un mejor ajuste respecto de las simulaciones en que utilizamos NCEP, lo indirectamente estaría indicando una mejor representación de las intensidades del viento por parte del MM5 respecto del reanálisis NCEP.

Tabla 3.4. Coef de Correlación y Pendiente de la recta de regresión para Agosto del 2007, en las estaciones Oyarvide y Palermo.

Oyarvide	AAA	ABB	ABC	NCEP	NCEP+COEF
Correlación	0,90	0,90	0,90	0,79	0,83
Pendiente	0,47	0,46	0,46	0,39	0,73
Palermo					
Correlación	0,87	0,87	0,86	0,80	0,85
Pendiente	0,51	0,50	0,51	0,36	0,75

En las Fig. 3.2.7-3.2.8 se presentan las series observadas y modeladas para el mes de Octubre, en las estaciones Oyarvide y Palermo respectivamente. Podemos ver que para ambas estaciones el modelo HamSOM cuando es forzado en su modo AAA logra representar los niveles del río durante todo el periodo, aunque con menores intensidades que las registradas. Se alcanza una mejor aproximación de las alturas observadas

cuando utilizamos los forzantes atmosféricos modelados con MM5, respecto de las simulaciones en que utilizamos como forzantes campos de viento en 10 metros y presión provenientes de NCEP. Lo que estaría indicando una mejora en la representación de la intensidad del viento en superficie sobre el área de estudio, cuando utilizamos el modelo atmosférico MM5.

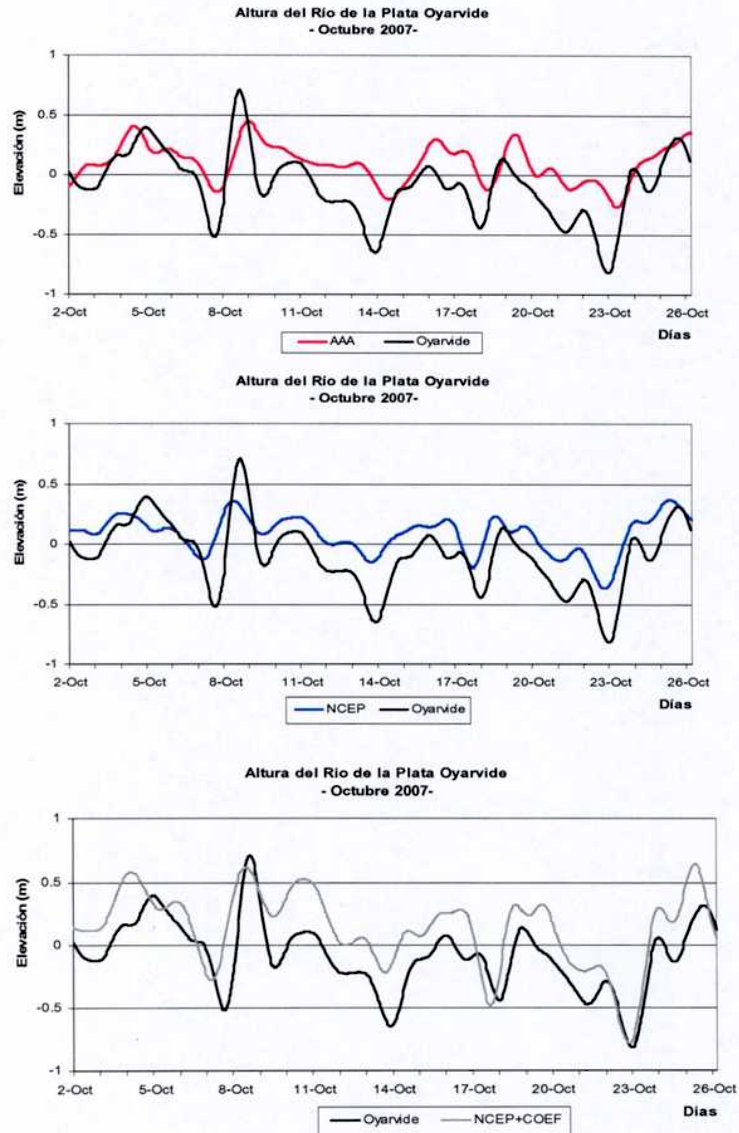


Fig.3.2.7. Alturas del Río de la Plata modeladas y observadas para Agosto del 2007, en la estación Palermo: a) Serie observada y modelada por HamSOM método AAA, b) Serie observada y modelada por HamSOM utilizando NCEP, c) Serie observada y modelada por HamSOM utilizando NCEP+COEF.

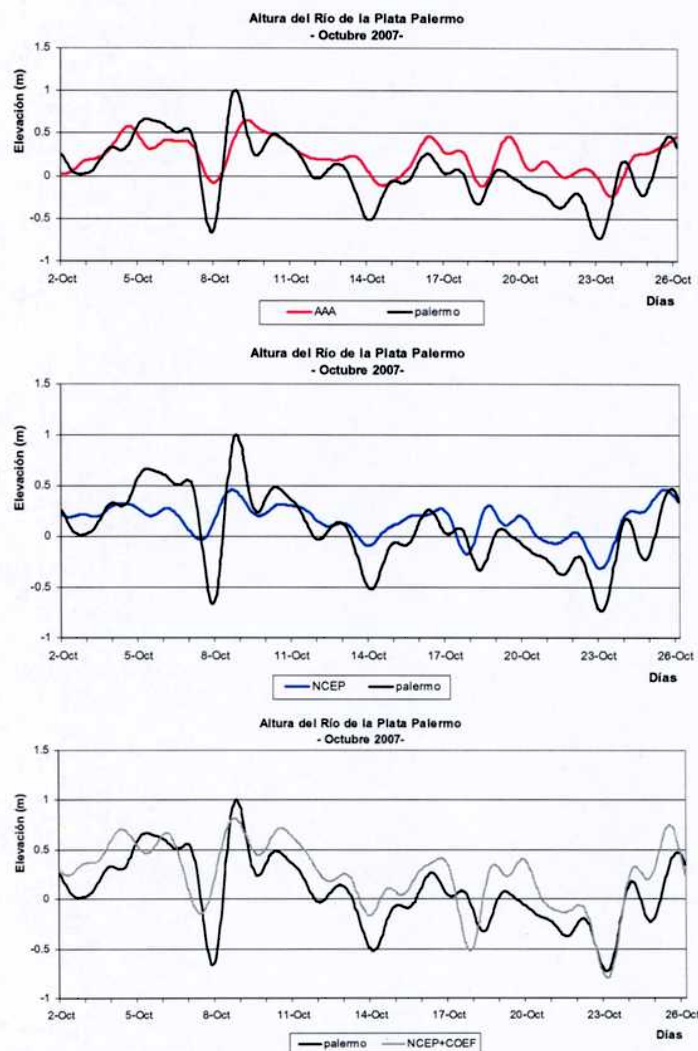


Fig.3.2.8. Alturas del Río de la Plata modeladas y observadas para Agosto del 2007, en la estación Palermo: a) Serie observada y modelada por HamSOM método AAA, b) Serie observada y modelada por HamSOM utilizando NCEP, c) Serie observada y modelada por HamSOM utilizando NCEP+COEF.

Cabe aclarar que el coeficiente de corrección aplicado a NCEP, ha sido ajustado para otro periodo (Simionato y otros, 2002), lo que podría explicar en parte los valores obtenidos para el 1996, periodo en el cual los autores trabajaron sobre el coeficiente, respecto del periodo simulado 2007.

Al comparar las series simuladas utilizando como forzantes atmosféricos datos modelados con MM5, provenientes de reanálisis NCEP o NCEP+COEF con un coeficiente de corrección, el mejor ajuste se obtiene con los datos modelados por MM5. La serie acompaña en tiempo las variaciones del nivel mostrando una mejor representación de las observaciones respecto de la utilización de NCEP y NCEP con coeficiente, donde encontramos algunos eventos ligeramente desfasados en tiempo y con algunas sobreestimaciones.

En la tabla 3.5, se presentan las correlaciones y pendiente de la recta de regresión, entre los datos observados y los modelados para las estaciones Oyarvide y Palermo, para Octubre del 2007. Los resultados indican, para la estación Oyarvide una mejor correlación con los datos observados cuando utilizamos NCEP como forzantes atmosféricos, mientras que por el contrario en la estación Palermo obtenemos una mejor correlación cuando los forzantes atmosféricos lo ofrecen los datos modelados por el modelo atmosférico MM5. En ambas estaciones obtenemos los mejores ajustes de la pendiente de la recta de regresión en las corridas que utilizamos NCEP+COEF, coincidiendo entonces con los cálculos obtenidos para los periodos que analizamos anteriormente. Por otro lado, se observa que en la estación Palermo obtenemos un mejor ajuste cuando utilizamos los forzantes modelados con MM5 respecto del reanálisis NCEP.

Tabla 3.5. Coef de Correlación y Pendiente de la recta de regresión entre los datos modelados y observados, para Octubre del 2007 en las estaciones Oyarvide y Palermo.

Oyarvide	AAA	ABB	ABC	NCEP	NCEP+COEF
Correlación	0,74	0,76	0,76	0,82	0,83
Pendiente	0,42	0,42	0,40	0,44	0,88
Palermo					
Correlación	0,76	0,77	0,77	0,71	0,78
Pendiente	0,43	0,60	0,43	0,33	0,76

En todos los casos cuando comparamos el triple anidado, la correlación no muestra diferencias significativas, las series modeladas AAA, ABB y ABC se superponen completamente a lo largo de todo el periodo. El modelo hidrodinámico HamSOM, parecería en este caso, no ser sensible a las distintas resoluciones del forzante atmosférico modelado por el MM5.

Finalmente, en la fig 3.2.9 se presentan las series modeladas y observadas para el mes de septiembre del 2007 en la estación Palermo. Para este mes el modelo muestra un ajuste algo desfasado en tiempo respecto de las observaciones, en este caso tiene problemas con el tiempo en que representa los eventos aunque logra representar la intensidad de estos. Al comparar las series simuladas en su modo AAA y con NCEP, obtenemos una mejora en la representación de la intensidad de los eventos al utilizar los forzantes atmosféricos modelados con MM5. En el caso de NCEP+COEF se obtiene una buena representación de las observaciones, representando en tiempo los eventos y las intensidades para este periodo. Para este mes el modelo se muestra bastante suavizado respecto de las observaciones.

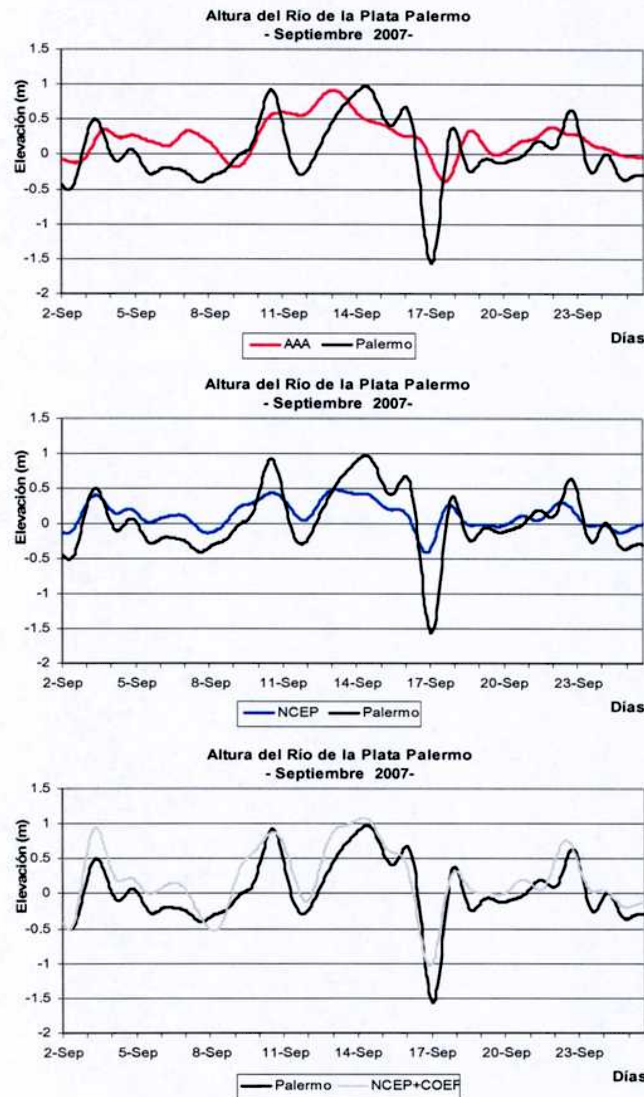


Fig.3.2.9. Alturas del Río de la Plata modeladas y observadas para Agosto del 2007, en la estación Palermo: a) Serie observada y modelada por HamSOM método AAA, b) Serie observada y modelada por HamSOM utilizando NCEP, c) Serie observada y modelada por HamSOM utilizando NCEP+COEF.

El resultado de la correlación es aleatorio, modelo y NCEP tienen resultados comparables. Las simulaciones en que utilizamos datos modelados por el MM5 como forzante atmosférico acompañan mejor los máximos respecto a cuando utilizamos los datos de NCEP como forzantes atmosféricos, pero no logra capturar las situaciones de bajantes. En la serie correspondiente a Septiembre del 2007, se presenta un evento de bajante importante que solo estaría siendo captado por la simulación en que utilizamos

NCEP+COEF. Si bien NCEP + COEF capta adecuadamente la intensidad de los eventos, en algunos casos tiende a sobreestimar la altura del Río de la Plata respecto de las observaciones.

En la tabla 3.6 se presentan los cálculos entre las alturas modeladas con HamSOM en todas sus simulaciones (AAA, ABB, ABC, NCEP y NCEP+COEF) y las observadas en la estación Palermo, para Septiembre del 2007. Podemos ver que las bajas correlaciones obtenidas en este periodo, están relacionadas con la bajante registrada el 17 de septiembre, que el modelo no estaría representando.

Tabla 3.6. Coef de Correlación y Pendiente de la recta de regresión entre los datos modelados y observados para la estación Palermo, Septiembre del 2007

Palermo	AAA	ABB	ABC	NCEP	NCEP+COEF
Correlación	0,54	0,56	0,56	0,84	0,91
Pendiente	0,32	0,33	0,34	0,35	0,91

Podemos concluir en líneas generales, que mientras las simulaciones logan reproducir correctamente la variabilidad temporal y la dirección de la elevación de la superficie del Río de la Plata, la intensidad de los eventos modelados tiende a ser más débil que la observada. Esto sugiere que el modelo captura la dirección del viento pero subestima la intensidad. Por otro lado, al evaluar la sensibilidad del modelo hidrodinámico al aumento en la resolución de los forzantes atmosféricos no observamos diferencias significativas con las distintas resoluciones, pero si un mejor ajuste al comparar la utilización de los forzantes atmosféricos modelados con MM5, respecto del reanálisis NCEP. Esto indica que el modelo MM5 logra representar adecuadamente los eventos que determinan la elevación de la columna, indicando una leve mejora respecto de la utilización de NCEP como forzante atmosférico al modelo hidrodinámico.

4. Conclusiones

En este trabajo realizamos una serie de simulaciones numéricas con el Modelo Regional MM5 en tres dominios anidados, mediante la técnica de anidado unidireccional. Esto permitió resolver procesos de escala menor como resultado de la interrelación entre el flujo de gran escala (provisto por las condiciones de borde laterales) y las características de escala pequeña asociadas a las inhomogeneidades de la superficie (topografía, distribución de continente-océano, uso de suelo).

En cada dominio seleccionamos paquetes de datos de terreno y vegetación para las distintas resoluciones, las propiedades del suelo y vegetación fueron obtenidas a partir de la base de datos USGS (vegetación y uso de la tierra). En cada caso analizamos la sensibilidad del modelo al dominio utilizado, en particular a la posición de los bordes laterales. La elección de los dominios fue definida teniendo en cuenta el sistema integrado de modelado utilizado en este trabajo, que involucra el modelo atmosférico MM5 y el modelo hidrodinámico HamSOM. En este sentido, las dimensiones de los dominios del modelo atmosférico cubren los dominios utilizados en el modelo oceánico, dado que el MM5 aportó los forzantes atmosféricos de viento en 10 m y presión en superficie al modelo hidrodinámico.

Analizamos la sensibilidad del modelo MM5 a distintos esquemas de Capa Límite Planetaria (CLP), realizamos una serie de simulaciones con el *Esquema de CLP Eta* (Janjic 1990, Janjic 1994) y el esquema *MRF o Hong-Pan* (Hong and Pan 1996) y evaluamos el comportamiento del modelo para representar el viento en 10 metros y la presión en superficie. En el caso de la simulación en que utilizamos el esquema de capa límite ETA obtenemos un error sistemático mayor tanto en la componente zonal (u) y meridional (v) del viento a 10 m como en la presión, por lo que decidimos realizar el resto de las simulaciones utilizando el esquema de capa límite MRF.

Los períodos seleccionados para realizar las simulaciones numéricas fueron Junio y Julio de 1996; Agosto, Septiembre y Octubre del 2007. En el caso del periodo 1996, este fue seleccionado debido a que fue analizado previamente por Simionato et. al. (2006). El segundo periodo simulado, correspondiente al año 2007 fue seleccionado en base a los datos obtenidos en la estación meteorológica del CIMA, ubicada en el muelle del Club de Pescadores de la Costanera Norte de Buenos Aires.

Con el objeto de determinar el efecto de la circulación atmosférica sobre la altura del Río de la Plata, abordamos el trabajo desde el forzante atmosférico, en este sentido

tuvimos en cuenta la intensidad y dirección del viento del cuadrante (E-S) registrados en la estación meteorológica del CIMA. Cabe destacar que los periodos simulados presentan condiciones normales, es decir, no hay eventos extremos. Los casos seleccionados en la estación del CIMA corresponden a eventos de sudestadas leves, de manera que no esperamos un gran efecto del forzante atmosférico sobre la altura del Río de la Plata.

Evalúamos la calidad de las simulaciones en reproducir los patrones de circulación de la escala sinóptica, comparamos los campos de viento en 10m y presión en superficie calculados por el modelo MM5 con los proporcionados por el reanálisis NCEP/NCAR. Identificamos los días y horas en que registramos vientos del sector SE –NW en la estación del CIMA y analizamos los campos de circulación asociados a esos días.

Observamos que el modelo MM5 logra representar los patrones de circulación dominantes asociados a las ocurrencias de sudestadas leves, correspondientes a una estructura de circulación anticiclónica al sur del Río de la Plata. Los campos de circulación modelados correspondientes a cada caso de sudestada en el Río de la Plata se correlacionan con las observaciones, y esto lo podemos evidenciar indirectamente con la respuesta del forzante atmosférico sobre el modelo hidrodinámico.

Podemos concluir que los campos de viento en 10 m y presión en superficie calculados por el modelo MM5 consiguen reproducir satisfactoriamente las características de circulación en capas bajas, siguiendo el forzamiento de la situación de gran escala.

En general la dirección del viento está bien representada por el modelo en sus tres resoluciones, de esta forma se logra mejorar la resolución espacial del forzante atmosférico a través de la implementación del modelo Regional MM5.

Los campos de circulación reales correspondientes a cada evento seleccionado, se correlacionaron con los campos descriptos anteriormente modelados con MM5. En todos los casos obtuvimos buenas correlaciones de la presión en superficie modelada con MM5. Los valores para los periodos simulados de la componente zonal (u) y meridional (v) del viento a 10 m y presión en superficie son coincidentes con los resultados obtenidos a partir de los datos de estaciones, lo cual nos permite comparar con un buen criterio los resultados de las simulaciones.

En la estación Ponton Recalada, todas las simulaciones muestran una subestimación de la intensidad del viento comparado con el resto de las estaciones analizadas. En ese sentido al ser Ponton Recalada la única estación que se encuentra en el río puede ser el motivo de la subestimación de la intensidad del viento. Como resultado de la baja

resolución de los datos de reanálisis (250km, casi la extensión completa de estuario), el Río de la Plata es representado como un punto seco, es decir sobre continente y no un punto húmedo sobre el océano, la velocidad del viento disminuye exponencialmente cerca de la superficie terrestre debido a los efectos de rozamiento de la superficie. De manera que sobre el continente hay una mayor fricción que sobre el océano, resultando en una disminución en la velocidad del viento.

En este sentido la pregunta que debe ser respondida es en que medida el modelo oceánico es capaz de representar la variabilidad de la respuesta del Río de la Plata a los forzantes atmosféricos provenientes de NCEP o MM5. En la comparación respecto a los dominios anidados, encontramos una menor subestimación de la intensidad del viento a 10 metros al aumentar la resolución.

En la estación Ponton Recalada, los Dominios 2 y 3 tiene un valor de BIAS ligeramente menor lo que implica una menor subestimación, es decir una mejor representación de esta variable sobre el área de interés. Este resultado indica una adecuada representación de las características del viento en 10 metros y presión en superficie por parte del modelo atmosférico MM5, donde en algunos casos los dominios de mayor resolución logran mejorar la representación de estas variables sobre el área de estudio.

En una segunda etapa del trabajo realizamos una serie de simulaciones para evaluar la sensibilidad del modelo HamSOM a ser forzado con distintas resoluciones en los forzantes atmosféricos, generamos los bordes para forzar el modelo hidrodinámico, las variables atmosféricas necesarias para forzar al modelo HamSOM fueron la componente zonal (u) y meridional (v) del viento a 10m y presión en superficie.

Evalúamos el nivel del Río de la Plata provocado puramente por efectos meteorológicos, realizamos la comparación entre los datos observados y los simulados por el modelo HamSOM para las estaciones Palermo y Oyarvide. La aplicación de un filtro pasa bajos permitió distinguir el efecto de las acciones meteorológicas sobre la columna de agua, pudimos observar una buena representación de la altura del río por parte del modelo HamSOM, en líneas generales el modelo acompaña la serie observada, logra representar en tiempo las variaciones del nivel aunque la intensidad de los eventos modelados son menores respecto de los observados.

Estos resultados sugieren que el modelo MM5, logra representar las condiciones meteorológicas vinculadas a provocar bajantes y crecidas en el Río de la Plata, aunque con menor intensidad que las observadas.

Podemos concluir que mientras las simulaciones logan reproducir correctamente la variabilidad temporal y la dirección de la elevación de la superficie del Río de la Plata, la intensidad de los eventos modelados tiende a ser más débil que la observada, lo que sugiere que el modelo captura la dirección del viento pero subestima la intensidad.

Por otro lado, al evaluar la sensibilidad del modelo hidrodinámico al aumento en la resolución de los forzantes atmosféricos no observamos diferencias significativas con las distintas resoluciones. Las simulaciones no mostraría diferencias significativas ante el aumento en la resolución de los forzantes atmosféricos modelados con MM5, es decir con las tres resoluciones del forzante atmosférico, pero si un mejor ajuste al comparar la utilización de los forzantes atmosféricos modelados con MM5 respecto del reanálisis NCEP.

El análisis en la región de estudio y la evolución diaria de las variables permitieron arribar las siguientes conclusiones:

- Como resultado de los experimentos numéricos realizados, se encontraron los dominios que mejor representan las variables de intensidad, dirección del viento a 10 metros y presión en superficie, sobre el estuario del Río de la Plata.
- Las estructuras dominantes de los campos de circulación asociados a las ocurrencias de las sudestadas, están bien representadas por el modelo MM5. Según los patrones de superficie y la evolución temporal de variables meteorológicas en distintas estaciones, en los periodos simulados tenemos solo algunos casos de sudestadas leves que el modelo MM5 es capaz de representar.
- La intensidad del viento es subestimada con respecto a las observaciones, tanto para las salidas del modelo MM5 como por los datos de reanálisis NCEP, obteniendo los mejores ajustes sobre el estuario de Río de la Plata con las mayores resoluciones del modelo MM5.
- En todos los casos el mayor error lo obtenemos en la estación Pontón Recalada, para las simulaciones del MM5 y para NCEP.
- Al comparar los valores de BIAS para la intensidad del viento, obtenemos una mejora en la representación de esta variable en los dominios de mayor resolución del modelo MM5, de manera que justificaría hacer el anidado.
- Al analizar las simulaciones del modelo hidrodinámico HamSOM no se observan diferencias cuando el modelo oceánico es forzado con las distintas resoluciones de modelo atmosférico, las series se solapan completamente.
- El modelo HamSOM no mostraría diferencias significativas ante el aumento en la resolución de los forzantes atmosféricos modelados con MM5 en este trabajo, el modelo hidrodinámico HamSOM no sería sensible al aumento de la resolución en el forzante atmosférico.
- Por otro lado, se alcanza una mejor aproximación de las alturas observadas en el estuario del Río de la Plata cuando utilizamos los forzantes atmosféricos modelados con MM5, respecto de las simulaciones en que utilizamos como forzantes campos de viento en 10 metros y presión provenientes de NCEP. Lo que estaría indicando una mejora en la representación de la intensidad del viento en superficie sobre el área de estudio cuando utilizamos el modelo atmosférico MM5 para dar las condiciones de borde al modelo hidrodinámico.

Referencias

- Albarracín, J., 1987, *Análisis de la Hidrodinámica del Río de La Plata a partir de una Simulación Numérica*, Tesis de grado para la Licenciatura en Oceanografía, ITBA (Argentina), Director: A.N. Menéndez (Informe LHA-INCYTH 065-001-88).
- Andersen O. B.; Woodworth, P.L., and Flather, R.A., 1995. Intercomparison of recent ocean tide models. *Journal of Geophysical Research*, 100(C12), 25261–25282.
- Arakawa A. and W. H. Shubert (1974) Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large scale environment. Part I. *J. Atmos. Sci.*, 31, 674-701
- Backhaus, J. O., 1983: A semi-implicit scheme for the shallow water equations for application to shelf sea modelling. *Continental Shelf Research* **2(4)**, 243-254.
- Backhaus, J. O., 1985: A three dimensional model for simulation of shelf sea dynamics. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift* **38(H.4)**, 164-187.
- Backhaus, J. O. y D. Hainbucher, 1987: A finite difference general circulation model for shelf sea and its applications to low frequency variability on the North European Shelf. En: Nihoul, J. C., Jamart B. M. (Eds.), *Three Dimensional Model of Marine and Estuarine Dynamics*. Oceanographic Series, 45. Elsevier, Amsterdam, 221-244.
- Balay, M.A., 1961, *El Río de la Plata entre la atmósfera y el mar*, Publicación Servicio de Hidrografía Naval, Buenos Aires, 1961.
- Barros V. 2004: Tendencias climáticas. Proyecto Agenda Ambiental Regional- Mejora de la Gobernabilidad para el Desarrollo Sustentable PNUD ARG/01/001.
- Barros, V., A. Grimm y M. Doyle, 2002: "Relationship between Temperature and Circulation in Southeastern South America and its Influence from El Niño and La Niña" Events. *J. of Meteor. Soc. of Japan*, 89, 21-32.
- Boschi, E. E., 1988. El ecosistema estuarial del Río de la Plata (Argentina y Uruguay). *Anales Instituto de Ciencias del mar y Limnología*, Universidad Nacional Autónoma de México, 15, 159–182.
- Borús, J., M. Uriburu Quirno y D. Calvo, 2007: Evaluación de caudales diarios descargados por los grandes ríos del sistema del Plata al estuario del Río de la Plata. Alerta Hidrológico - Instituto Nacional del Agua y el Ambiente, Ezeiza, Argentina.
- Campos J.D., Lentini C.A., Miler J.L. and Piola A.R., 1999: Interannual variability of the sea surface temperature in the South Brazilian Bight, *Geophysical Research Letters*, **26 (14)**, 2061-2064.
- Canevari P., D.E. Blanco y E.H. Bucher, 1999. Los beneficios de los humedales de la Argentina. Amenazas y propuestas de soluciones. Humedales para las Américas.
- CARP, 1989, *Estudio para la Evaluación de la Contaminación en el Río de la Plata*, SHN y SOHMA.
- Cavalloto, J.L., R. Violante y G. Parker. 1999. Historia evolutiva del Río de la Plata durante el Holoceno. XIV Congreso Geológico Argentino, Actas, (1):508-515.
- Celemin A.H. (1984). "Meteorología Práctica". Mar del Plata. p.p 282
- Chen F, Dudhia J (2001) Coupling and advanced land surface hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity. *Mon Wea Rev* 129:569–585
- Ciappesoni, H. H. & Salio, P. (1997) Pronóstico de Sudestada en el Río de la Plata. *Meteorologica* **22 (2)**: 71–86.

- Cousseau, M. B., 1985. Los peces del Río de la Plata y su Frente Marítimo. In: YAN[~] EZ-ARANCIBIA, A. (Ed). *Fish Community Ecology in Estuaries and Coastal Lagoons: towards and ecosystem integration*. UNAM Press Mexico. Pp. 515–534.
- D'Onofrio, E., Fiore M. and Romero S, 1999, Return periods of extreme water levels estimated for some vulnerable areas of Buenos Aires, *Continental Shelf Research*, 19, 1681-1693.
- Escobar, G., W. Vargas, and S. Bischoff (2004), Wind tides in the Río de la Plata Estuary: Meteorological conditions, *Int. J. Climatol.*, 24, 1159–1169.
- Etala M.P. y Alonso S.M., 1995. "*Pronóstico numérico de olas 1992-1994*". Boletín del
- Framiñán, M. B., and O. B. Brown (1996), Study of the Río de la Plata turbidity front, part I: spatial and temporal distribution, *Cont. Shelf Res.*, 16, 1259– 1282.
- Framiñán, M.B., Etala, M.P., Acha, E.M., Guerrero, R.A., Lasta, C.A., Brown, O., 1999, *Physical characteristics and procesos of the Río de la Plata estuary*, In: Perillo, G.M., Piccolo, M.C., Pino, M. (Eds), *Estuaries of South America. Their geomorfology and dynamics*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 161-194.
- Fritsch J. M. and C. F. Chappell (1980) Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. *J. Atmos., Sci.*, 37: 1722-1733.
- Gan, M.A. and Rao, V.B., 1991. Surface cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review* 119(5), 1293–1302.
- Garand L (1983) Some improvements and complements to the infrared emissivity algorithm including a parameterization of the absorption in the continuum region. *J Atmos Sci* 40:230–244.
- Glorioso P.D. and Simpson, J.H., 1994. Numerical modelling of the M2 tide on the northern Patagonian shelf. *Continental Shelf Research*, 14, 267–278.
- Glorioso P.D. and Flather, R.A., 1995. A barotropic model of the currents off SE South America. *Journal of Geophysical Research*, 100, 13427–13440.
- Glorioso P.D. and Flather, R.A., 1997. The Patagonian Shelf tides. *Progress in Oceanography*, 40, 263–283.
- Glorioso, P., 2000. Patagonian Shelf 3-D tide and surge model. *Journal of Marine Systems*, 24, 141–151.
- Grell GA, Dudhia J, Stauffer DR (1993) A description of the fifth generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Tech Note NCAR/TN–398+1A, 107 pp
- Guerrero, R. A., E. M. Acha, M. B. Framiñán, and C. A. Lasta (1997), Physical oceanography of the Río de la Plata Estuary, Argentina, *Cont. Shelf Res.*, 17(7), 727–742.
- Guarga, R., Vinzón, S., Rodriguez, H., Piedra Cueva, I., Kaplan, E., 1991, *Corrientes y sedimentos en el Río de la Plata*. Report CARP (Comisión Administradora del Río de la Plata).
- Guo YR and S Chen (1994) Terrain and land use for the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale modeling system (MM5). NCAR Technical Note, NCAR/TN-397+1A, 114 pp.
- Hong S and Pan H (1996) Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2322-2339.

- Hsie EY, Anthes RA, Keyser D (1984) Numerical simulation of frontogenesis in a moist atmosphere. *J Atmos Sci* 41:2581–2594.
- Jaime, P., A. Menéndez, M. Uriburu Quirno y J. Torchio, 2002: Análisis del régimen hidrológico de los ríos Paraná y Uruguay. *Informe LHA 05-216-02*, Instituto Nacional del Agua, Buenos Aires, Argentina.
- Janjic and Zavisla I (1990) The step-mountain coordinate: Physical package. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1429-1443.
- Janjic and Zavisla I (1994) The step-mountain eta coordinate model: Further development of the convection, viscous sublayer, and turbulent closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927-945.
- Kain J, Fritsch J (1993) Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. In: Emanuel KA, Raymond DJ (eds) *The representation of cumulus convection in numerical models*. Amer Meteor Soc, Boston, pp 165–170
- Kalnay, E., et al. (1996), The NCEP/NCAR 40-Year reanalysis project, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77, 437– 471.
- Lasta C., Acha M., Machi G., Guerrero R. and Miazán H., 1998: Identificación de un área de desove multiespecífica en la zona de El Rincón. Propuesta para el establecimiento de una zona de veda. *Inf. Tec. Interno INIDEP*, 102:1-5.
- Le Provost, C., A. F. Bennet y D. E. Cartwright, 1995: Ocean tide for and from TOPEX/POSEIDON. *Science*, **267**, 639-642.
- Le Provost, C., F. Lyard, J. M. Molines, M. L. Genco y F. Rabilloud, 1998: A hydrodynamic ocean tide model improved by assimilating satellite altimeter-derived data set. *Journal of Geophysical Research*, **103(C3)**, 5513-5529.
- Menéndez, A.N., 1985, *Simulación numérica de flujos cuasi-bidimensionales a superficie libre*, Informe LHA-INCYTH S5-016-85.
- Menéndez C.G., Cabre M.F., Solman S.A., Nuñez M.N. (2003) Regional climate simulation over southern South America using MM5. In: 7th international conference on southern hemisphere meteorology and oceanography. Am Met Soc, Wellington, New Zealand, pp 59–61
- Menéndez C.G., Cabre M.F., Nuñez M.N. (2004) Interannual and diurnal variability of January precipitation over subtropical South America simulated by regional climate model. *Clivar Exchanges* 29:1–3
- Minetti, J. L., and W. M. Vargas (1990), Comportamiento del borde anticiclónico subtropical en Sudamérica. II Parte, *Rev. Geofís.*, 33, 177– 190.
- Molinari, G.N, 1986, *Simulación numérica de la circulación en el Río de la Plata*, Tesis de grado para la Licenciatura en Oceanografía, ITBA (Argentina), Director: A.N. Menéndez (Informe LHA-INCYTH S5-017-86).
- Nagy G. J., Martinez C., Caffera M., Pedrosa G., Forbes, Perdomo A. and Lopez Laborde J. 1997: Hydrological and Climatic setting of the Río de la Plata. Chapter 2 In
- Necco, G., 1982. Comportamiento de vórtices ciclónicos en el área sudamericana durante FGGE: Ciclogénesis. *Meteorológica*, 13, 7– 20.
- Nogues-Paegle, J., and K. C. Mo (1997), Alternating wet and dry conditions over South America during summer, *Mon. Weather Rev.*, 125, 279– 291.
- O'connor, W. P., 1991. A numerical model of tides and storm surges in the Río de la Plata estuary. *Continental Shelf Research*, 11, 1491–1508.
- Olalde, A. M., 1988, *Simulación numérica de corrientes de deriva en el Río de la Plata*,

- Piola A. R., Campos E. J., Möller O.O., Charo M. and Martinez 2000: Subtropical Shelf Front off Eastern South America, *Journal of Geophysical Research*, **105 (C3)**, 6565-6578.
- Reynolds RW, Rayner NA, Smith TM, Stokes DC, Wang W (2002) An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J Climate* 15:1609–1625
- Rodríguez, I., 1998: Modelado de los procesos barotrópicos y baroclínicos en la costa Noroeste de África. Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas, España, 222 pp.
- Rodríguez, I. y E. Alvarez, 1991: Modelo tridimensional de Corrientes. Condiciones de aplicación a las costas españolas y análisis de resultados para el caso de un esquema de mallas anidadas. *Clima Marítimo Report* **42**, 65 pp.
- Rodríguez, I., E. Alvarez, E. Krohn y J. Backhaus, 1991: A mid-scale tidal analysis of waters around the north western corner of the Iberian Peninsula. *Proceedings of a Computer Modelling in Ocean Engineering*, **91**, Balkema, 568 pp.
- Seluchi M. E. (1993): Estudio del comportamiento de los sistemas sinópticos migratorios en la Argentina. Tesis Doctoral, UBA, 74-78.
- Seluchi, M. E. (1995), Diagnóstico y pronóstico de situaciones sinópticas conducentes a ciclogénesis sobre el este de Sudamérica, *Geofis. Int.*, **34**, 171–186.
- Seluchi, M. E., and A. C. Saulo (1996), Possible mechanisms yielding an explosive coastal cyclogenesis over South America: Experiments using a limited area model, *Aust. Meteorol. Mag.*, **47**, 309–320.
- SHN, 2008. Tablas de Marea 2007, Servicio de Hidrografía Naval, Armada Argentina.
- Simionato, C. G., M. N. Nuñez y M. Engel, 2001: The salinity front of the Río de la Plata - a numerical case study for winter and summer conditions. *Geophysical Research Letters*, **28(13)**, 2641-2644.
- Simionato, C. G., W. C. Dragani, M. N. Nuñez y M. Engel, 2004a: A set of 3-D nested models for tidal propagation from the Argentinean Continental Shelf to the Río de la Plata Estuary: I. M₂. *Journal of Coastal Research*, **20(3)**, 893-912.
- Simionato, C. G., W. C. Dragani, V. L. Meccia y M. N. Nuñez, 2004b: A numerical study of the barotropic circulation of the Río de La Plata Estuary: Sensitivity to bathymetry, the earth's rotation and low frequency wind variability. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, **61**, 261-273.
- Simionato, C. G., C. Vera, and F. Siegmund (2005a), Surface wind variability on seasonal and interannual scales over Río de la Plata area, *J. Coastal Res.*, **21(4)**, 770–783.
- Simionato, C. G., V. L. Meccia, W. C. Dragani, and M. Nuñez (2005b), Barotropic tide and baroclinic waves observations in the Río de la Plata Estuary, *J. Geophys. Res.*, **110**, C06008, doi:10.1029/2004JC002842.
- Simionato, C. G., A. Berasategui, V. L. Meccia, M. Acha, and H. Mianzan (2006a), The potential role of wind variability on plankton retention in the Río de la Plata Estuary: A numerical study, paper presented at 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Am. Meteorol. Soc., Foz do Iguazu' Brazil.
- Simionato, C. G., V. L. Meccia, W. C. Dragani, R. Guerrero, and M. Nuñez (2006b), The Río de la Plata estuary response to wind variability in synoptic to intraseasonal scales: Part I. Barotropic response, *J. Geophys. Res.*, **111**, C09031, doi:10.1029/2005JC003297.

- Simionato C. G., V. L. Meccia, W. C. Dragani y M. N. Nuñez, 2006c: On the use of the NCEP/NCAR surface winds for modelling barotropic circulation in the Río de la Plata Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **70**, 195-206.
- Simmonds, I., and K. Keay (2000), Mean Southern Hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-year NCEP-NCAR Reanalysis, *J. Clim.*, **13**, 873– 885.
- Sinclair, M.R., 1994. An objective cyclone climatology for the southern hemisphere. *Monthly Weather Review*, **122**, 2239–2256.
- Solman SA, Nunez MN, Cabré MF (2007) Regional climate change experiments over southern South America. I: present climate. *Clim. Dyn*, DOI101007/s00382-007-0304-3
- Stephens GL (1978) Radiation profiles in extended water clouds: II. Parameterization schemes. *J Atmos Sci* **35**:2123–2132
- Stephens GL (1984) The parameterization of radiation for numerical weather prediction and climate models. *Mon Wea Rev* **112**:826–867.
- Stronach, J. A., J. Backhaus y T. S. Murty, 1993: An update on the numerical simulation of oceanographic processes in the waters between Vancouver Island and the mainland: the GF8 model. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, **31**, 1-86.
- Urien, C.M., 1967. Los sedimentos modernos del Río de la Plata Exterior. *Bol. SHN* **3**, 197–203.
- Vera, C., P. K. Vigliarolo, and E. H. Berbery (2002), Cold season synoptic scale waves over subtropical South America, *Mon. Weather Rev.*, **130**, 684– 699.
- Viale M. and A. E. Fernández, 2006: "Comparison of the reanalysis ERA-40 and the reanalysis NCEP/NCAR with the radiosondes over Argentina and Chile". Extended Abstracts CD, 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, American Meteorological Society. Foz de Iguazú, Brasil, 63-69.
- Vieira, A. and Lanfredi, N.W., 1996. A hydrodynamic model for the Río de la Plata. *Journal of Coastal Research*, **12**(2), 430–446.
- Wells, P.G & G.R. Daborn (Eds), The Río de la Plata. An Environmental Overview. An EcoPlata Project Background Report. Dalhousie Univ, Halifax, Nova Scotia, 248 pp.
- Zahel, W., 1997. Ocean Tides. In: Wilhelm, H.; ZÜRN, W., and Wenzel, H-G. (Eds.) *Lecture Notes in Earth Sciences: Tidal Phenomena*. 66 pp, Springer.