

Estudio de la sensibilidad de un modelo barotrópico 2D para la predicción del nivel del mar

Matías G. Dinapoli, Claudia G. Simionato, Diego Moreira

CIMA - CONICET/UBA - UMI IFAECI/CNRS-CONICET-UBA

Email: matias.dinapoli@cima.fcen.uba.ar
simionato@cima.fcen.uba.ar
moreira@cima.fcen.uba.ar

Resumen

Tradicionalmente, el seguimiento de los sistemas acuáticos se hizo mediante mediciones *ad hoc* puntuales en el espacio y el tiempo. El uso combinado de datos obtenidos por medición *in situ* y teledetección permite un mejor abordaje del problema. Debido a la dinámica y la complejidad de los ecosistemas marinos, y el desafío que representa determinar la interacción entre la gran variabilidad natural y el impacto del hombre, el problema sólo puede resolverse mediante el uso extensivo de modelos físico-matemáticos en combinación con observaciones directas. Esto ha llevado al desarrollo de una nueva rama de las ciencias del mar, conocida como Oceanografía Operacional, que tiene como objetivo poner en disponibilidad datos producidos en base a observaciones y modelos de alta calidad tanto para estudios científicos como para aplicaciones prácticas.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo hidrodinámico barotrópico para el pronóstico del nivel del mar y las corrientes medias en la región Norte de Plataforma Continental Argentina, con énfasis en el Río de la Plata y su Frente Marítimo, que constituya la base para el desarrollo a mediano plazo de un sistema operativo experimental. Para ello, se implementa un modelo de la comunidad oceanográfica, ROMS_AGRIF, a la región de interés y se estudia la sensibilidad de las soluciones a diferentes condiciones de contorno, dominio de integración, técnicas de anidado, resolución espacial, e incertezas en los valores de los parámetros del modelo y el forzante atmosférico.

INTRODUCCIÓN

La utilidad de cualquier modelo numérico depende en gran medida de la exactitud y confiabilidad de sus soluciones. Sin embargo, debido a que todo modelo es una abstracción imperfecta de la realidad, por su naturaleza discreta y porque rara vez se dispone de datos de entrada precisos, todas las soluciones están sujetas a incertezas. Los errores en los datos de entrada y las incertidumbres en los parámetros de la modelización no son independientes unos de otros, sino que pueden interactuar de diversas maneras. Es por ello que llevar a cabo un *análisis de sensibilidad* (AS) (Saltelli *et al.*, 2000) permite conocer cómo las soluciones de un modelo varían con las parametrizaciones, forzantes y las condiciones de contorno, además

de que proporciona indicios acerca de qué información adicional se requiere para mejorar las deficiencias del modelo.

En un AS se toma como *parámetros* a los coeficientes de las ecuaciones y a las características de un forzante (o *input*); y como *output* se considera a un valor obtenido de las soluciones del modelo o de alguna característica estadística extraída de estas, tales como valores extremos o valores medios. La suposición esencial es que cada parámetro y output pueden ser descritos por un escalar. El AS busca, mediante algún tipo de análisis, determinar ciertos aspectos básicos como (i) el orden de importancia de los parámetros; (ii) la existencia de efectos combinados de tales parámetros; y (iii) en forma más genérica, el efecto que tienen sobre el output los cambios en el valor de los parámetros (Norton, 2015).

La determinación de tales aspectos permite, entre otras cosas, realizar óptimamente la regionalización de un modelo con una cantidad reducida de simulaciones. Es por ello que en este trabajo se realiza un AS para un modelo regional para la región Norte de la Plataforma Continental Argentina, con énfasis en el Río de la Plata (RdP), cuyo fin es ser implementado como un modelo *pre-operativo*, barotrópico y bidimensional, para la predicción del nivel del mar y las corrientes marinas. El mismo se divide en tres secciones, en la primera se describe el área de estudio y el conjunto de datos utilizados; luego, en la segunda parte se describe el modelo y la aplicación del análisis de Morris (Morris, 1991) para la realización del AS; y, por último, se desarrollan los resultados y las conclusiones obtenidas.

ÁREA DE ESTUDIO

El Río de la Plata (RdP, Figura 2-1) es un gran estuario somero localizado sobre la costa Este de Sudamérica, aproximadamente a 35° S. Presenta una forma de embudo con orientación NW-SE, una longitud de, aproximadamente 300 km de largo y un ancho que va de 40 km, en la parte superior, hasta 220 km en su boca (Balay, 1961). Sus dos principales tributarios son dos de los ríos más importantes de Sudamérica, el Paraná y el Uruguay, con descargas medias de 16,000 m³s⁻¹ y 6,000 m³s⁻¹, respectivamente (Nagy *et al.*, 1997; Jaime *et al.*, 2002). De este modo, la descarga media del estuario es tan grande como 22,000 m³s⁻¹, aunque el sistema presenta una gran variabilidad asociada a los ciclos de El Niño - Oscilación del Sur (Robertson y Mechoso, 1998) donde se han observado picos tan grandes como 80,000 m³s⁻¹ y tan bajos como 8,000 m³s⁻¹ (Jaime *et al.*, 2002).

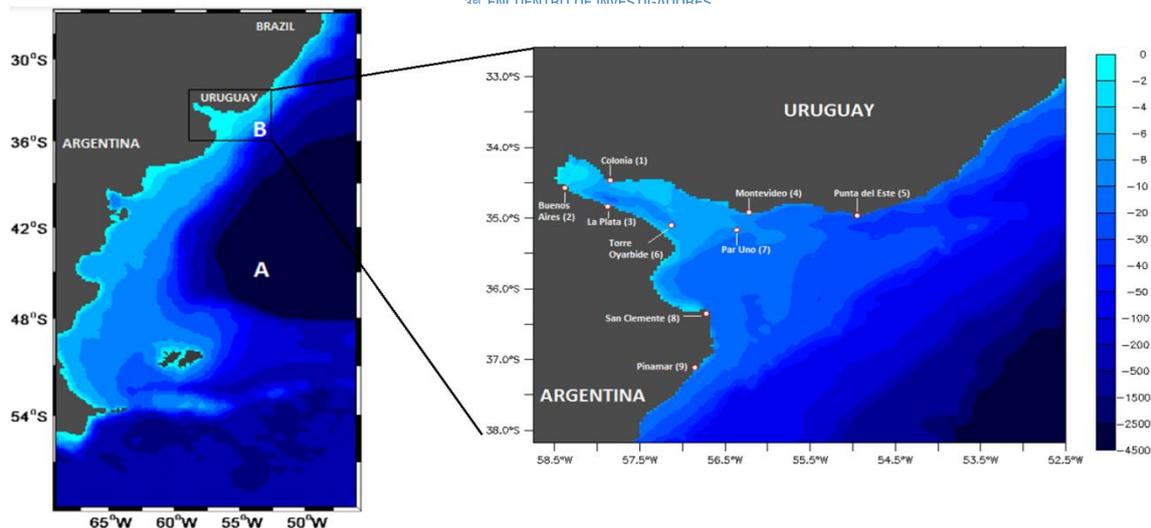


Figura 2-1. Región de estudio y batimetría del Río de la Plata, la profundidad está en metros.

Además, el RdP está localizado en una de las regiones más ciclogénicas del mundo, asociado al pasaje de ondas que se propagan latitudinalmente por las regiones subtropicales del Pacífico Sur y Sudamérica. Aproximadamente se producen 8 ciclones por año, con mayor frecuencia durante el verano. Cuando uno de estos ciclones se desarrolla sobre Uruguay, genera vientos fuertes del sudeste, cuyas velocidades llegan a ser mayores a 15 ms^{-1} (Seluchi, 1995; Seluchi y Saulo, 1996). Estas tormentas son conocidas como *Sudestadas* y son las causantes de las inundaciones del estuario superior (D'Onofrio *et al.*, 1999) ya que estos vientos son muy efectivos en frenar la descarga de los ríos Paraná y Uruguay hacia el mar, produciendo la acumulación de agua dentro de la costa Sur del estuario. Uno de los últimos eventos registrados más importantes de *Sudestadas* fue en el mes de septiembre del año 2010 donde se midió un nivel medio de 3.58 m en la zona de Buenos Aires, lo que produjo inundaciones y evacuaciones, en las ciudades ribereñas del lado argentino y, en especial, en el Delta del Paraná.

Debido a la gran variabilidad meteorológica que presenta la Plataforma en todas las escalas y que es muy susceptible a los cambios que puedan ocurrir en los forzantes atmosféricos (Simionato *et al.*, 2004, 2005, 2006a y b, 2007; Meccia *et al.*, 2009), es de gran importancia contar con la mejor información posible de estas variables y conocer la respuesta del modelo ante las inevitables incertezas en estos datos. Como ejemplo, la Figura 2-2 muestra los valores de intensidad y dirección de los esfuerzos del viento sobre la superficie del mar (por convención, a 10 m de altura), obtenida de distintos conjuntos de datos para un evento importante de *Sudestada* ocurrido durante el mes de mayo del año 2000. Los datos corresponden a: (i) observaciones de la estación Pontón Recalada (buque argentino fondeado, cercano a la estación Par Uno (7), Figura 2-1); datos de los re-análisis del (ii) National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research – Reanalysis 2 (NCEP/NCAR RII) (Kanamitsu *et al.*, 2002) y del (iii) European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ERA-INTERIM) (Dee *et al.*, 2011); y (iv) datos satelitales de la base Blended Sea Winds (BSW) (Zhang *et al.*, 2006) desarrollados por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), cuya característica principal es que combina (en inglés *blend*)

observaciones satelitales y realiza correcciones en la dirección del viento en base a los datos del NCEP/NCAR RII y del ERA-INTERIM. La tabla 2-1 resume las principales características de cada base de datos, junto con su resolución espacial y temporal.

Tabla 2-1. Principales características de las bases de datos de vientos elegidas.

Base de datos	Tipo de datos	Resolución espacial	Resolución temporal
Pontón Recalada	Observación	-	3 horas
NCEP/NCAR RII	Reanálisis	2.50 ° (278 km)	6 horas
ERA-INTERIM	Reanálisis	0.75 ° (83 km)	6 horas
BSW	Blended	0.25 ° (28 km)	6 horas

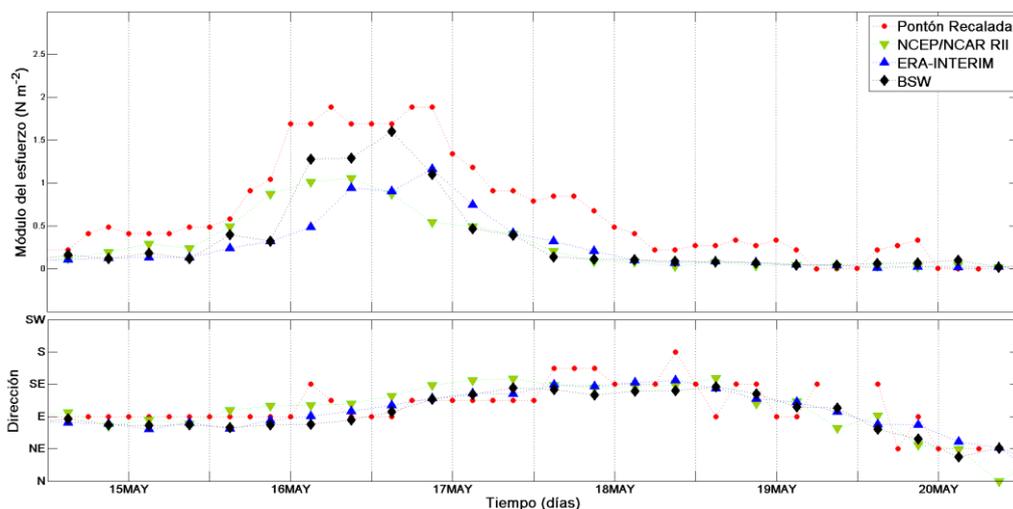


Figura 2-2. Series temporales de intensidad y dirección de las distintas bases para la estación de Pontón Recalada para el evento de sudestada del año 2000.

Se observa en la Figura 2-2 que las bases de datos presentan una mayor correlación con los datos observados en la dirección (panel inferior) que en intensidad (panel superior) del viento. Para los dos re-análisis, la intensidad presenta un importante desfase en el valor máximo del esfuerzo lo que implica un cambio en la ubicación temporal del pico máximo de la onda de tormenta (ODT), altamente perjudicial para la exactitud de un pronóstico. Por otro lado, se observa que los datos del BSW se aproximan más a las observaciones, la combinación de ambos reanálisis produce una mejora en la intensidad, pero sigue habiendo una importante discrepancia con la sincronización de la evolución temporal de la intensidad del esfuerzo dado que se nota una atenuación más pronunciada luego del valor máximo. Dado este gran problema en la diferencia de los datos de vientos es necesario estudiar la sensibilidad del modelo ante el principal forzante del evento extremo de la Sudestada. Esta es una de las principales motivaciones de este trabajo, ya que evalúa la calidad del modelo ante la simulación de un evento importante en la región.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE UN MODELO REGIONAL

Regionalización del modelo ROMS_AGRIF

El modelo ROMS (Regional Ocean Modeling System, <https://www.myroms.org/>) es un modelo numérico oceánico de la comunidad, desarrollado por H. Shchepetkin y A. McWilliams (Shchepetkin y McWilliams, 2005). Está configurado para la simulación tanto procesos físicos como biogeoquímicos, bioópticos, sedimentológicos y hasta de la dinámica de hielos marinos. Ha sido aplicado a numerosos sitios (Magaldi *et al.*, 2010; Manson *et al.*, 2011; Kumar *et al.*, 2012), incluyendo la Plataforma Continental Argentina (Tonini y Palma, 2008; Tonini y Palma, 2009; Combes y Matano, 2014b), donde ha demostrado ser muy eficiente para el estudio dinámico y biogeoquímico de la región. En este trabajo se utiliza la versión ROMS_AGRIF (Adaptative Grid Refinement in Fortran, <http://www.romsagrif.org/>), desarrollada en la universidad IRD/INRIA (Debreu *et al.*, 2012) que incluye algoritmos de los modelos oceánicos MARS (<http://wwz.ifremer.fr/mars3d>), para la parte sedimentológica, y HYCOM (<https://hycom.org>), para la parte de la estructura vertical, lo que permite una mejor adaptación en las técnicas de anidamiento dinámico con estos modelos oceánicos globales.

Para implementar el modelo en la región de interés, se consideró un refinamiento de las soluciones en dos niveles, con énfasis en el estuario del RdP. El modelo de mayor escala "Modelo A", cubre la región comprendida entre 69°W y 46°W y 59°S y 26.5°S (Figura 2-1). Cuenta con una resolución horizontal de 7.5' (1/8°, aproximadamente 14 km) en la dirección longitudinal y 5.25' (1/11°, aproximadamente 9.75 km) en la dirección meridional. Este modelo es forzado en los bordes con datos de marea de la base TPX08 (http://volkov.oce.orst.edu/tides/tpxo8_atlas.html), que cuentan con una resolución de 2.0' (1/30°, aproximadamente 3.7 km), y presenta un buen acople con el modelo ROMS en la región (Dinapoli, 2016). Para este forzado de marea se tomaron las ocho componentes armónicas más importantes para la región: M₂, S₂, N₂, K₂, K₁, O₁ y P₁.

Las soluciones del "Modelo A" son utilizadas como condición de contorno para el "Modelo B" (Figura2-1) de mayor resolución. Su dominio abarca la región entre 58.75°W y 52.50°W y 38.2°S y 32.6°S, con una resolución de 2.5' (1/24°, aproximadamente 5.0 km) en la dirección longitudinal y 1.75' (1/33°, aproximadamente 3.25 km), consistente con el criterio de reducción de 1/3 con respecto al modelo escala inmediatamente mayor.

Las grillas batimétricas se crearon mediante interpolación de información de cartas náuticas digitalizadas y datos satelitales, a partir de una batimetría que cuenta con una resolución de 18'' en la dirección zonal y 14.4'' en la dirección meridional disponible en el CIMA/CONICET-UBA.

En la superficie del mar ambos modelos fueron forzados con los datos de viento de NCEP-NCAR RII, utilizados por otros autores para un estudio de validación de un modelo regional en el mismo dominio (Simionato *et al.*, 2006).

Metodología para el análisis de sensibilidad

Para realizar el AS se utilizó el análisis de Morris (Morris, 1991). Con una cantidad relativamente modesta de simulaciones, este método permite establecer una jerarquización acorde a la influencia de cada parámetro en un output determinado y evalúa si presenta algún tipo de no-linealidad. Morris propone que tal ordenamiento se obtiene a partir del análisis estadístico de los cambios en la salida de un modelo, producidos por cambios del tipo *uno-a-la-vez* en los k parámetros propuestos.

Para obtener una de las muestras de estos cambios del tipo *uno-a-la-vez*, en primer lugar se elige aleatoriamente un vector cuyas componentes son los valores que puede tomar cada uno de los k parámetro. Luego se generan una sucesión de k vectores cambiando de a una y ordenadamente el valor de una coordenada en un paso previamente establecido. Este conjunto de $k+1$ vectores establece una “trayectoria”, donde se tiene que al final de la trayectoria (luego de k “pasos”) todos los parámetros fueron variados una vez. Usualmente, la dimensión del cambio de cada parámetro es fija y corresponde a la mitad de la longitud de su intervalo de pertenencia. Este proceso puede repetirse r -veces ($r \ll k$), teniéndose r trayectorias aleatorias, y cada una de estas trayectorias brinda una muestra de las variaciones en la salida del modelo debido a los cambios de un parámetro (*efecto elemental*). La magnitud de la media del valor absoluto de tales muestras (Campolongo *et al.*, 2007) indica el grado de influencia de cada parámetro, mientras que la medida del desvío estándar indica la no-linealidad del parámetro (incluyendo la interacción entre ellos, o multilinealidad).

En este trabajo se eligió estudiar la distribución de los cambios normalizados, es decir

$$\frac{\frac{\delta y}{y}}{\frac{\delta p_k}{p_k}} = \frac{p_k}{y} \frac{\delta y}{\delta p_k} \quad (1)$$

donde y es el output del modelo y p_k es uno de los k parámetros. Al adimensionalizar la derivada se tiene cuenta con un escalar que permite comparar los cambios generados por los parámetros. Como output (y) se eligió la raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre la elevación de superficie libre simulada y la observada en las estaciones mareográficas de Palermo y Oyarvide (Figura 2-1). La elección de este output se debe a que permite cuantificar la acumulación neta de la discrepancia, tanto en amplitud como en fase, de la señal pronosticada respecto a la observada. Además, permite aprovechar las simulaciones realizadas para determinar la combinación de parámetros que generan la solución más semejante a la observada y así proporcionar de una base para la posterior calibración del modelo.

Descripción de los parámetros

Los parámetros elegidos corresponden a los forzantes para un modelo barotrópico y bidimensional: los que generan disipación de energía por fricción con el fondo, a los forzantes atmosféricos y a la descarga continental que alimenta al dominio. Más específicamente:

1. Parámetros de fricción de fondo: ROMS_AGRIF permite considerar tanto un coeficiente lineal (c_1) como el cuadrático (c_D). De acuerdo con trabajos anteriores (por ejemplo, Simionato *et al.*, 2006) el valor típico tabulado de $c_D = 2.5 \times 10^{-3}$ es razonable para la región; en este trabajo, para realizar una calibración fina del mismo (y siguiendo con los resultados de Dinapoli, 2016), se considera una variación de entre 2.0×10^{-3} y 3.0×10^{-3} . Respecto al c_1 , no es un parámetro cuyo uso esté muy extendido, pero los ejemplos que vienen con el modelo ROMS indican que se encuentra en un orden menor que el c_D ; para explorar su efecto se considera el intervalo de $1.5 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ a $5.0 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$.
2. Esfuerzo del viento: como se mostró en la sección anterior, los datos de vientos presentan una gran variabilidad según la base elegida; por ello se considera analizar el impacto los cambios en la velocidad (w) y la dirección (Θ) del viento. Para la velocidad se consideran cambios de la forma $w' = Iw$, donde I es un escalar que, de las observaciones anteriormente mostradas, se toma en el intervalo de 0.5 y 1.5. Para establecer el intervalo de la variación de Θ se calculó el RMSE de los reanálisis respecto a las observaciones en Pontón Recalada, determinándose un RMSE de 18° . Por lo tanto se consideró el intervalo de -18° a 18° para las rotaciones del campo de viento.
3. Descarga continental: en las simulaciones se incorporaron la descarga de agua los principales ríos que desembocan en el RdP: el Río Uruguay y las dos ramas del Río Paraná, Guazú-Bravo y Palmas. Las observaciones (Jaime *et al.*, 2002) indican que el caudal ingresante puede variar entre los $8,000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y los $80,000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Aunque la escala de variabilidad de este parámetro corresponde a una frecuencia baja (el caudal de los ríos está regulado por numerosas represas y su variabilidad se corresponde con el ENSO) y a los efectos del pronóstico a corto plazo su variabilidad no es significativa, esta variable aporta al nivel medio e interactúa con la marea (Luz Clara Tejedor *et al.*, 2014), por lo cual es importante considerarla para el análisis completo de la sensibilidad.

La viscosidad lateral (ν) no es considerada ya que los resultados de Dinapoli (2016) indican que no es un parámetro influyente en el modelo, por lo tanto fue fijada en 0. Los parámetros analizados se resumen en la tabla 3-1, donde se muestra el nombre del parámetro, la simbología utilizada, el intervalo de pertenencia y las respectivas unidades.

Tabla 3-1. Descripción de los parámetros utilizados para el análisis de Morris.

Parámetro	Intervalo	Unidad
Coef. de fricción de fondo cuad. (cD)	$[2.0 ; 3.0] \times 10^{-3}$	Adimensional
Coef. de fricción de fondo lineal (cD)	$[1.5 ; 5.0] \times 10^{-4}$	ms ⁻¹
Factor de intensidad del viento (I)	[0.5 ; 1.5]	Adimensional
Dirección del viento (Θ)	[-18 ; 18]	°
Descarga continental (Q)	$[8.0 ; 80.0] \times 10^3$	m ³ s ⁻¹

La base de datos de vientos elegida para el análisis de sensibilidad fue la NCEP-NCAR RII ya que es la que ha sido más estudiada y utilizada como forzante de modelos diversos para la región (Simionato *et al.*, 2004; Simionato *et al.*, 2006; Dragani *et al.*, 2010). Como el modelo impone al esfuerzo del viento (τ) como condición de contorno superficial, debe realizarse la transformación clásica (*bulk formula*) de los datos de viento a esfuerzos dada por

$$\tau_i = c_D^v \cdot \rho_A \cdot w \cdot u_i \quad (2)$$

donde i puede representar la componente zonal (x) o meridional (y), c_D^v es el coeficiente de arrastre del viento, ρ_A es la densidad del aire, u_i es la componente zonal o meridional del campo de velocidad y w es la velocidad escalar del viento. Para la parametrización del coeficiente de arrastre del viento se utilizó la expresión clásica:

$$c_D^v = \begin{cases} 1.1 \times 10^{-3} & , w < 5 \text{ ms}^{-1} \\ (1.1 + \frac{2.1}{35}w) \times 10^{-3} & , w \geq 5 \text{ ms}^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

RESULTADOS

Análisis del método de Morris

Para realizar el análisis se consideraron 30 trayectorias que al contar con 5 parámetros a modificar cada una, da un total de 180 simulaciones. Como se mencionó anteriormente, se compararán las SSH simuladas con las observadas para las estaciones de Palermo y Oyarvide (Figura 2-1) para el evento de Sudestada en el mes de mayo del año 2000, donde se registró una ODT positiva cuya altura máxima fue de 3.57 m en la estación de Palermo (Figura 2-1) y que además se encuentra seleccionada por el Proyecto AIACC LA2G ‘Impacto del Cambio Global en la Áreas Costeras del Río de la Plata: Aumento del Nivel del Mar y Efecto Meteorológicos’ como una *tormenta extrema*. Al contar con observaciones de una estación dentro del RdP superior y otra en el estuario intermedio, permite determinar si la influencia de los parámetros también depende la hidrodinámica de cada región. La Figura 4-1 muestra de manera resumida los valores de media (m) y varianza (S) de efectos elementales para cada parámetro en las estaciones mencionadas (Palermo, panel

izquierdo, y Oyarvide, panel derecho). Los puntos a la derecha de la línea de trazo roja son aquellos cuya media es significativamente distinta de cero (Morris, 1991).

Se observa que la distribución de los puntos es distinta en para las dos estaciones lo que sugiere que la sensibilidad de los parámetros depende de la hidrodinámica local. Sin embargo, en ambos casos el factor de intensidad del viento es el que presenta la mayor media, indicando que es el parámetro el cual presenta mayor sensibilidad para el modelo. Además, este factor presenta una varianza relativamente alta indicando una repercusión no-lineal en los resultados del modelo.

Los parámetros c_D y Q fueron los que presentaron la sensibilidad espacial en el sistema. En ambas estaciones el c_D también presentó un impacto en las salidas del modelo, pero su importancia disminuye hacia el interior del estuario (mayor en Oyarvide y menor en Palermo), donde el Q se torna más significativo. Esto se debe a que cerca de la cabecera del estuario (donde se incorporó la descarga de los ríos, Q) se produce una fuerte interacción entre la marea y el caudal tal que la tasa de disipación de energía cinética, dada por el c_D , no es suficientemente alta como para producir una atenuación. Al alejarse de la cabecera del estuario las velocidades de las corrientes disminuyen debido al ensanchamiento del RdP y por lo tanto los efectos disipativos tornan a ser relativamente más fuertes.

En cuanto a los factores Θ y c_i , si bien producen cambios significativos, presentaron una influencia menor en el output del modelo. Por lo tanto, la elección del c_i pasa a ser un tipo de calibración fina. Mientras que las incertezas en la dirección del viento, dentro del rango estudiado, no repercuten en la señal de altura simulada.

En conclusión, se tiene que el modelo presenta una sensibilidad no-lineal a las incertezas de los datos de intensidad de viento, no así a su dirección. De los efectos disipativos por fricción de fondo, sólo el factor correspondiente al término cuadrático es aquel que repercute más en la señal simulada. Mientras que la baja influencia del factor lineal permite utilizarlo como un parámetro de calibración fina. Por último, la descarga

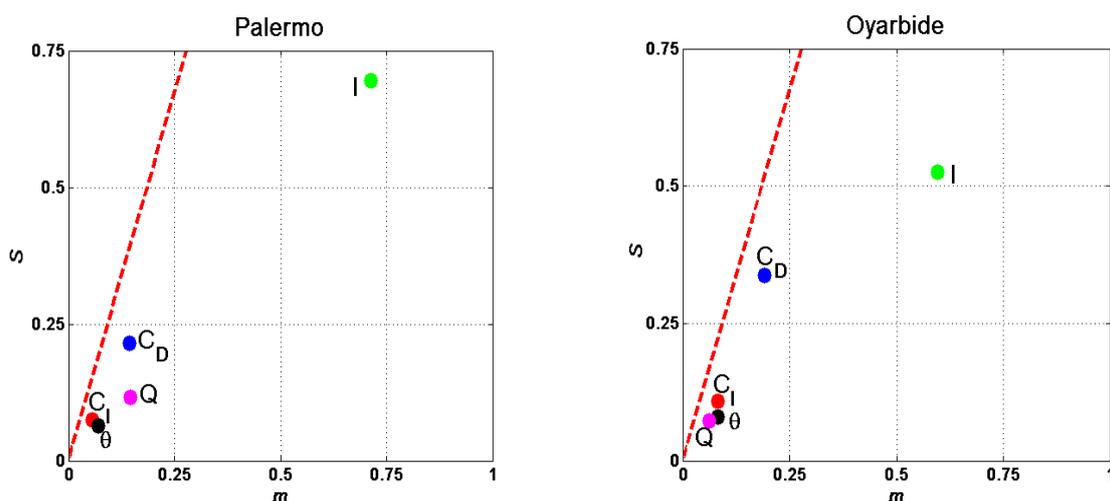


Figura 4-1. Medias (m) y varianzas (S) de las distribuciones de efectos elementales de cada parámetro para las estaciones de Palermo y Oyarvide.

continental presenta una mayor influencia en la parte superior del estuario, disminuyendo hacia el exterior. Si bien su impacto no es tan importante como la intensidad del viento, es necesario considerarlo en las simulaciones.

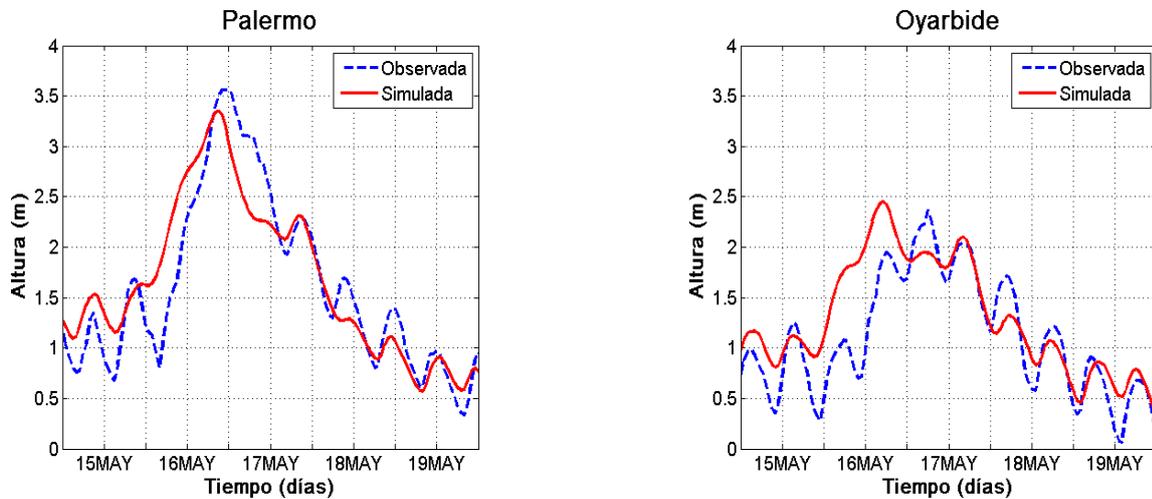


Figura 4-2. Comparación de la señal de SSH simulada (línea sólida roja) y la observada (línea de trazo azul) para las estaciones de Palermo y Oyarbide durante el evento de sudestada del año 2000. La señal simulada corresponde al modelo que mejor aproxima a la señal observada de todos los corridos para el análisis de Morris.

Ya que se cuentan con 180 simulaciones se aprovecharon para buscar la combinación de parámetros que producen la solución “óptima”, o que se ajusta mejor a las observaciones. La elección de tal simulación se hizo a través del análisis de los valores de correlación (R), pendiente de regresión (P_R), y la suma de errores cuadráticos (SSE) entre las simulaciones y los datos observados en las estaciones mareográficas. El primer estadístico es un indicador de la concordancia temporal entre ambos conjuntos de datos; el segundo sugiere si las soluciones del modelo son sobre y subestimadas; y el tercero es una acumulación de la discrepancias obtenidas. Para realizar la elección de la señal “óptima” se buscaron las soluciones que presentaban en ambas estaciones un R mayor a 0.9; una P_R entre 0.8 y 1.2; y que la SSE sea mínima. La Figura 4-2 muestra las señales simuladas “óptimas” (líneas sólidas rojas) comparada con las observaciones (líneas de trazo azules) para las estaciones de Palermo (panel izquierdo) y Oyarbide (panel derecho). Los parámetros utilizados para tal simulación fueron: $c_D = 2.20 \times 10^{-3}$; $c_I = 1.5 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$; $I = 1.15$; $\Theta = 1.5^\circ$; $Q = 22,400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Los valores obtenidos para la fricción de fondo pueden ser utilizados como un estimador de referencia para la posterior calibración del modelo; mientras que los parámetros relativos al viento muestran que la dirección es correcta mientras que la intensidad está subestimada. Este resultado es consistente con el trabajo de Simionato *et. al* (2006). Por otro lado, el corrimiento del máximo indica que los datos de viento se encuentran, temporalmente adelantados. Y por último, el valor de Q se corresponde para el observado durante el evento, sugiriendo que la inclusión de esta variable es importante para este tipo de simulaciones.

Cuantificación de la influencia de la velocidad del viento y el caudal

La no-linealidad obtenida del análisis de Morris para el parámetro I no queda determinada si se corresponde a la interacción con otro parámetro del modelo o si es intrínseca. En principio podría considerarse propia del factor ya que por construcción se tiene:

$$\tau'_i = c_D^v \cdot \rho_A \cdot w' \cdot u'_i = c_D^v \cdot \rho_A \cdot Iw \cdot Iu_i = I^2 \cdot \tau_i \quad (4)$$

por lo tanto las perturbaciones de intensidad repercuten cuadráticamente a los campos con los que fuerza al modelo. Pero también se tiene que no sólo la descarga continental influye localmente en el estuario sino que también impone una corriente opuesta a la que el viento fuerza. Esta interacción en principio puede ser no-lineal y por lo tanto la respuesta del modelo ante la variación del valor de una u otra también lo sea.

Para determinar el tipo de no-linealidad del parámetro I se procede a realizar un conjunto de simulaciones donde se varían tanto el valor de I como el de Q pero utilizando los resultados del análisis de Morris: ya que I es el parámetro influyente se discretiza más finamente el intervalo ya utilizado (tabla 3-1); mientras que para Q el paso de la discretización fue mayor, debido a su relativa menor influencia, elegido de manera que se tomase el valor medio de descarga del RdP de $22,000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Se computó el RMSE entre la serie observada y la simulada para (i) analizar la eventual interacción y (ii) aprovechar los resultados para obtener la señal que minimiza este error, de modo de determinar el valor de los parámetros que optimizan la simulación. La Figura 4-3 muestra líneas de contorno del RMSE en función del factor de intensidad de la velocidad del viento y el caudal para las estaciones de Palermo (panel izquierdo) y Oyarvide (panel derecho). Se observa que el centro de mínimo RMSE para la estación de Palermo se corresponde a $I = 1.1$ y $Q = 22,000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; esto significa que el caudal que optimiza la solución numérica es el correspondiente al valor medio, que es el que se observó durante este evento. Y que el factor de intensidad debe ser aumentado en un 10%. Esto es consistente con los factores obtenidos en la subsección anterior para la señal simulada “óptima”. En la estación de Oyarvide, se observa que la zona del mínimo es más difusa ya que como el Q es muy poco influyente en esta dirección se tiene un RMSE inferior, pero para el caso de I las isolíneas indican que tiene que estar en el orden de $I = 1.0$, lo que sugiere que la intensificación del viento no debe ser igual para todo los datos. Este último resultado también es consistente con el factor de corrección empírico propuesto en el trabajo de Simionato *et al.* (2006) para los datos del NCEP/NCAR RII.

Las pendientes pronunciadas de las isolíneas de RMSE en la dirección del caudal indican que la descarga continental y la intensidad del viento son dos parámetros independientes dado que se obtiene cambios significativos en el RMSE cuando el caudal aumenta mucho más que la intensidad. Posiblemente debido a la gran diferencia de la variabilidad temporal de ambos parámetros (estacional para el caudal y sinóptica para la intensidad del viento) se puede considerar que las variables no presentan una dependencia entre ellas. Esto permite concluir que la respuesta no-linealidad del modelo a la intensidad del viento es intrínseca a la variable tal como se muestra en la expresión (4).

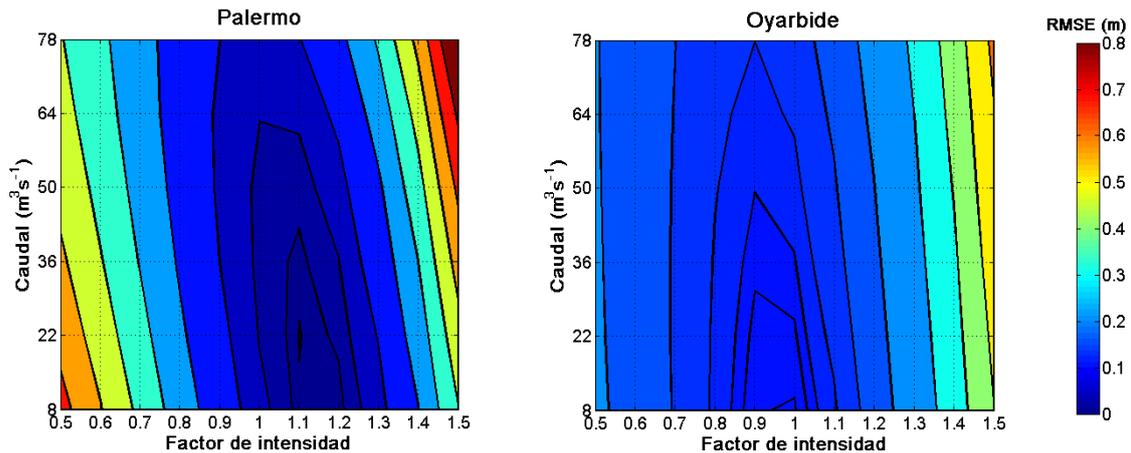


Figura 4-3. Líneas de contorno del RMSE de la señal simulada vs. la señal observada para distintos valores de I y Q.

CONCLUSIONES

Un análisis de sensibilidad (AS) permite conocer la relación entre los parámetros (inputs) y las soluciones (outputs) de un modelo numérico. La determinación de tal relación permite llevar a cabo, como por ejemplo, la regionalización de un modelo oceánico de manera computacionalmente económica. Con esta motivación, se realizó un AS para el modelo ROMS_AGRIF en una versión barotrópica y bidimensional en la Plataforma Continental Norte argentina. La información brindada por este análisis permitirá realizar una futura calibración de manera eficiente y agilizar su implementación como un modelo pre-operativo.

Se estudió la sensibilidad del modelo con un refinamiento de dos niveles, con énfasis en el Río de la Plata, durante un evento de Sudestada del año 2000. Los parámetros considerados fueron los correspondientes a la fricción de fondo, el factor de arrastre cuadrático c_D y el lineal c_i ; la descarga continental que de los principales tributarios del Río de la Plata (Paraná-Guazú, Paraná-Palmas y Uruguay); y, por último, perturbaciones en la intensidad y dirección en los campos de vientos. En particular se eligió estudiar la raíz del error cuadrático medio entre la señal de altura del nivel del mar simulada y la observada en las estaciones mareográficas de Palermo y Oyarvide. Los análisis obtenidos en ambas estaciones permiten notar si la sensibilidad presenta una dependencia regional. Es decir, si algunos parámetros influyen a la hidrodinámica dentro y/o fuera del estuario.

Como resultado se obtuvo que la intensidad del viento es un parámetro que impacta fuertemente a la salida del modelo, y hasta de manera no-lineal. No así la dirección, cuya respuesta si bien fue significativamente no nula, su impacto prácticamente puede ser desconsiderado. Respecto a los parámetros de fricción de fondo, se obtuvo que el correspondiente al término lineal es no influyente en la salida del modelo, mientras que el cuadrático sí lo es, pero en menor medida que la intensidad del viento. También se observa que el impacto de este término cuadrático tiene una dependencia espacial y compite con la descarga continental. Dentro del estuario la energía cinética que introduce la corriente de la descarga es mucho mayor que la energía que disipa la fricción de fondo. Por otro lado, afueras del estuario, la velocidad de la corriente es menor y tiene más peso la disipación. En resumen se tiene que dentro del estuario la información de la descarga continental es más importante que el factor de fricción de fondo cuadrático, y a las afueras del estuario se invierte el orden de influencia.

Por último, el análisis de Morris determina la no-linealidad de un parámetro pero no a qué se debe. Dado a que la descarga continental se encuentra en una parte del dominio y que las corriente que impone interactúa con la onda de tormenta de la Sudestada, en principio podría considerarse que la no-linealidad de la intensidad del viento se debe a la interacción con esta descarga. Del estudio en detalle de la interacción entre ambos parámetros se obtuvo que tanto dentro como fuera del estuario ambos parámetros son independientes dentro de los órdenes que suele variar la descarga. La no-linealidad de la intensidad en realidad se corresponde a que al modelo se lo fuerza con el esfuerzo del viento, y el producto de las velocidades en la expresión su expresión matemática, impone el cuadrado de la eventual perturbación. Esto reafirma el hecho de que debe estudiarse con mayor detalle la base de dato de vientos con la que a futuro se utilizará para alimentar el modelo pre-operacional.

REFERENCIAS

- Balay, M. A., 1961. *El Río de la Plata entre la Atmósfera y el Mar. Publicación H-621*. Servicio de Hidrografía Naval, Armada Argentina, Buenos Aires, 153 pp.
- Campolongo, F., Keijnen, J., y Andres, T., 2000. *Screening methods in: Sensitivity Analysis*, edited by: Saltelli, A., Chan, K., Scott, E. M., John Wiley & Sons, Ltd., New York.
- Campolongo, F., Cariboni, J., y Saltelli, A., 2007. *An effective screening design for sensitivity analysis of large models*, Environ. Modell. Softw., 22, 1509–1518.
- Combes V. y Matano R. P., 2014b. *A two-way nested simulation of the oceanic circulation in the southwestern atlantic*. Journal of Geophysical Research: Oceans, 119 (2) ,731--756.
- D'Onofrio, E. E., Fiore, M. E. y Romero, S., 1999. *Return periods of extreme water levels estimated for some vulnerable areas of Buenos Aires*. Continental Shelf Research, 19, 1681--1693.
- Debreu, L., Marchesiello, P., Penven, P. y Cambon, G., 2012. *Two-way nesting in split-explicit ocean models: algorithms, implementation and validation*. Ocean Modelling, 49-50, 1-21.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L.,

- Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N. y Vitart, F., 2001. *The ERA-Interim reanalysis: configuration, performance of the data assimilation system*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137 (656), pp. 553--597. doi: 10.1002/qj.828.
- Dinapoli, M., 2016. *Estudio de la sensibilidad de un modelo barotrópico 2-D para la predicción del nivel del mar*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Dragani, W. C., Martín, P., Campos, M. I. y Simionato, C., 2010. *Are wind wave heights increasing in southeastern south American continental shelf between 32S and 40S?* *Continental Shelf Research*, 30 (5), pp. 481-490. doi:10.1016/j.csr.2010.01.002
- Jaime, P., Menéndez, A., Uriburu Quirno, M. y Torchio, J., 2002. Análisis del régimen hidrológico de los ríos Paraná y Uruguay. Informe LHA 05-216-02. Instituto Nacional del Agua, Buenos Aires, Argentina.
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen J., Yang S-K, Hnilo J. J., Fiorino M. y Potter G. L., Nov. 2002. *NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2)*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1631-1643.
- Kumar, N., Voulgaris, G., Warner, J. C. y Olabarrieta, M., 2012. *Implementation of the vortex force formalism in the coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system for inner shelf and surf zone applications*. *Ocean Modelling*, 47, pp. 65--95.
- Luz Clara Tejedor, M., 2014. *Cambios en la propagación de la onda de marea en la Plataforma Continental y el Río de la Plata, asociados a cambios en el nivel medio del mar y los ciclos de la descarga continental*. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Magaldi, M. G., Özgökmen, T. M., Griffa, A. y Rixen, M., 2010. *On the response of a turbulent coastal buoyant current to wind events: the case of the Western Adriatic Current*. *Ocean Dynamics*, 60 (1), pp. 93--122.
- Mason, E., Colas, F., Molemaker, J., Shchepetkin, A. F., Troupin, C., McWilliams, J. C. y Sangra, P., 2011. *Seasonal variability of the Canary Current: a numerical study*. *Journal of Geophysical Research*.
- Morris, M. D., 1991. *Factorial sampling plans for preliminary computational experiments*, *Technometrics*, 33, pp. 161--174.
- Norton, J. P., 2015. *An introduction to sensitivity assessment of simulation models*. *Environ. Modell. Softw.*, 69, pp. 166--174.
- Nagy, G. J., Martinez, C. M., Caffera, R. M., Pedralosa, G., Forbes, E. A., Perdomo, A. C. y Laborde, J. L., 1997. *The hydrological and climatic setting of the Río de la Plata*. In: *The Río de la Plata. An Environmental Review*, An EcoPlata Project Background Report. Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, pp. 17--68.
- Robertson, A. y Mechoso, C. R., 1998. *Interannual and decadal cycles in river flows of southeastern South America*. *Journal of Climate* 11, 2570-2581.
- Satelli, A., Chan, K. y Scott, E. M., 2000. *Sensitivity Analysis*, Wiley, Chichester, UK.
- Shchepetkin, A. F. y McWilliams J. C., 2005. *The Regional Ocean Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model*. *Ocean Modelling*, 9, 347-404
- 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. y Saulo, A. C., 1996. *Possible mechanisms yielding an explosive cyclogenesis over South America: Experiments using a limited area model*. *Aust. Meteorol. Mag.*, 47, 309--320.

- Simionato, C. G., Dragani, W. C., Meccia, V. L. y Nuñez, M. N., 2004a. *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., Dragani, W. C., Nuñez, M. N., Engel, M., 2004b. *A set of 3-D nested models for tidal propagation from the Argentinian Continental Shelf to the Río de la Plata Estuary: I. M₂*. Journal of Coastal Research, 20 (3). 893--912.
- Simionato C. G., Meccia, V. L., Dragani, W. C. y Nuñez, M. N., 2005a. *Barotropic tide and baroclinic waves observations in the Río de la Plata Estuary*. Journal of Geophysical Research, 110, C06008. doi: 10.1029/2004JC002842.
- Simionato, C. G., Vera, C. y Siegmund, F., 2005b. *Surface wind variability on seasonal and interannual scales over Río de la Plata area*. Journal of Coastal Research, 21 (4), 770--783.
- Simionato, C. G., Meccia, V. L., Dragani, W. C., Guerrero, R. A. y Nuñez, M. N., 2006a. *The Río de la Plata Estuary response to wind variability in synoptic to intra-seasonal scales: Barotropic response*. Journal of Geophysical Research, 111, C09031. doi: 10.1029/2005JC003297.
- Simionato, C. G., Meccia, V. L., Dragani, W. C. y Nuñez, M. N., 2006b. *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.
- Simionato, C. G., Meccia, V. L., Guerrero, R. A., Dragani, W. C. y Nuñez, M. N. 2007. *Río de la Plata Estuary response to wind variability in synoptic to interseasonal scales: 2. Current's vertical structure and its implications for the salt wedge structure*. Journal of Geophysical Research, 112, C07005. doi: 10.1029/2006JC003815.
- Tonini, M. H. y Palma, E. D., Nov. 2008. *Modelado de frentes térmicos costeros*. Asociación de Mecánica Computacional XXVII, 369--383.
- Tonini, M. H. y Palma, E. D., Nov. 2009. *Circulación residual y vorticidad mareal en los golfos norpatagónicos*. Asociación de Mecánica Computacional XXVIII, 2851--2867.
- Zhang, H.-M., Bates J. J. y Reynolds, R.W., 2006. *Assessment of composite global sampling: Sea surface wind speed*. Geophysical Research Letters 33, L17714. doi: 10.1029/2006GL027086.