

MODELADO DE LA CIRCULACIÓN CLIMATOLÓGICA EN LA BAHÍA DE PISCO

MODELING OF THE CLIMATOLOGICAL CIRCULATION IN PISCO BAY

Carlos Yvan Romero Jorge Tam¹

RESUMEN

ROMERO C, TAM J. 2021. Modelado de la circulación climatológica en la bahía de Pisco. *Inf Inst Mar Perú*. 48(3): 451-460.- La bahía de Pisco se encuentra en una zona en la cual el afloramiento se manifiesta persistentemente durante todo el año debido a la magnitud del viento cerca de sus costas, con mayor intensidad en invierno y primavera, lo cual hace posible la existencia de una amplia zona costera muy productiva y rica en nutrientes. Esta zona y sus islas adyacentes presentan gran diversidad de recursos pesqueros para el consumo humano directo, motivo por el cual tiene importancia para la pesquería artesanal del Perú. En este trabajo se realizó el modelado de la bahía de Pisco utilizando el modelo oceánico regional ROMS y la herramienta ROMS2ROMS con el fin de conocer la circulación marina y la distribución espacial de las principales variables oceanográficas a pequeña escala en la bahía seleccionada. Para lograr esto, se utilizaron los resultados de una simulación del sistema de corrientes de Humboldt a escala regional (~12 km), como condiciones de frontera para realizar un *downscaling* dinámico utilizando ROMS2ROMS para obtener la resolución espacial requerida (~1 km). El modelo reprodujo el ciclo estacional de la TSM en la bahía, con algunas diferencias en la intensidad de la TSM simulada y observada. Se encontró que la velocidad de las corrientes va en dirección noroeste con mayor intensidad al sur y al oeste de la península, alcanzando sus valores más altos en primavera (22,5 cm/s) y los más bajos en verano (7,5 cm/s).

PALABRAS CLAVE: modelado, ROMS, ROMS2ROMS, anidamiento, Pisco

ABSTRACT

ROMERO C, TAM J. 2021. Modeling of the climatological circulation in Pisco Bay. *Inf Inst Mar Peru*. 48(3): 451-460.- Due to the magnitude of the wind near its coasts, the Pisco Bay is a zone where upwelling is persistent throughout the year, with greater intensity in winter and spring. Therefore, there is a large productive and nutrient-rich coastal area, which has a great diversity of fishing resources for direct human consumption, thus having great importance for the Peruvian artisanal fishery. We used the ROMS regional ocean model and the ROMS2ROMS tool to understand the marine circulation and the spatial distribution of the main oceanographic variables on a small scale in Pisco Bay. Thus, the results of a simulation of the Humboldt Current System at a regional scale (~12 km) were used as boundary conditions to perform a dynamic downscaling using the ROMS2ROMS tool to obtain the required spatial resolution (~1 km). The model replicated the seasonal cycle of SST in the bay, with some differences between the intensity of the simulated and observed SST. In addition, it was found that the speed of the currents goes in a northwesterly direction with greater intensity to the south and west of the Paracas peninsula, reaching its highest values in spring (22.5 cm/s) and the lowest in summer (7.5 cm/s).

KEYWORDS: modeling, ROMS, ROMS2ROMS, nesting, Pisco

1. INTRODUCCIÓN

El área frente a Pisco está sujeta a los vientos más intensos que pueden manifestarse en toda la costa del Perú, por lo cual el afloramiento costero en esta zona, siendo permanente durante el año, muestra notable intensificación en el periodo invierno/primavera. La productividad primaria es mayor en el periodo primavera/verano debido a la estratificación de las aguas más superficiales, disminuyendo en invierno. De primavera a verano se manifiesta un gradiente térmico perpendicular a la costa, bien pronunciado, el cual da lugar a una “lengua de

agua fría” que indicaría la persistencia de una celda de afloramiento durante el periodo de máxima productividad acompañado de aguas más estratificadas (GUTIÉRREZ *et al.*, 2011).

A diferencia de otros Sistemas de Afloramiento de Borde Oriental (EBUS, por sus siglas en inglés), el afloramiento en Pisco no es afectado por el efecto del flujo geostrófico hacia la costa como en otras partes del litoral peruano, debido a que el mayor espesor de la capa de Ekman en esta zona mantiene la intensidad del afloramiento bastante fuerte (MARCHESIELLO & ESTRADA, 2010). Esta es una zona de intensa actividad de mesoescala,

1 IMARPE, DGIOCC, Ap. 22, Lima, Perú. cromero@imarpe.gob.pe; jtam@imarpe.gob.pe

puesto que se encuentra cerca de un "hot spot" en el cual se forma gran cantidad de remolinos (CHAIGNEAU *et al.*, 2009).

Por otra parte, la zona de Pisco presenta intensa actividad industrial pesquera, en la que destaca la producción de aceite y harina de pescado, además de gran variedad de recursos de importancia comercial como son moluscos, crustáceos, macroalgas y otros peces utilizados para el consumo humano directo, motivo por el cual tiene una importante participación en la pesquería artesanal del país, la cual descarga en los desembarcaderos pesqueros artesanales (DPA's) de San Andrés, El Chaco y La Puntilla (FLORES *et al.*, 2019). Todo esto trae como consecuencia, gran cantidad de materia orgánica en suspensión y otros residuos que son arrojados directamente al ambiente marino (GUZMÁN *et al.*, 1997), impactando en la calidad del agua de la bahía y costas adyacentes (VELAZCO y SOLÍS, 2000; CABELLO *et al.*, 2002). En respuesta a ello, se estableció un nuevo sistema de tratamiento de residuos para estas industrias y se construyó un emisario submarino que descarga fuera de la bahía en aguas de 50 m de profundidad. Además, desde 2004, el envío de productos de gas también se realiza en un muelle ubicado al norte de la bahía.

Los escenarios del cambio climático predicen un aumento promedio de 6% en las precipitaciones aguas arriba del río Pisco para el 2030, alcanzando un incremento del 16% en verano (SENAMHI, 2013; MINAM, 2016). El aumento de la descarga del río contribuiría directamente a intensificar la estratificación de la bahía en verano, y puede también ayudar a incrementar el aporte de nutrientes y materia orgánica.

Por lo mencionado, es necesario tener un mejor conocimiento de las características físicas, químicas y biológicas de la zona, para lo cual el modelado es un herramienta de gran utilidad en ese sentido, a la par de un monitoreo constante y de su reserva natural.

Por su ubicación geográfica y las condiciones atmosféricas que ejercen influencia sobre éste, el mar peruano posee características dinámicas en un amplio rango de escalas espaciales y temporales. Particularmente, en la plataforma continental la dinámica costera es afectada por sus fronteras en el fondo marino y en la línea de costa adyacente

(JANEKOVIĆ & POWELL, 2012). Debido al elevado costo computacional que implica resolver todas estas características con una sola grilla, lo cual involucraría un costo de procesamiento innecesario cuando se requiere estudiar un área en particular contenida dentro de esta, se han utilizado para el estudio de la dinámica superficial de la zona, modelos hidrodinámicos de aguas rasas (YZOCUPE, 2002) y de gravedad reducida (CARBONEL, 2013), en ambos casos, con aproximaciones bidimensionales y fronteras abiertas no reflectantes, modificando de manera artificial el forzante atmosférico y en periodos de tiempo cortos (mayo y agosto 1999, respectivamente).

En nuestro caso, para conservar la información de las fronteras abiertas y transferirlas a la simulación en cada paso de tiempo, hemos realizado anidamientos de grillas de mayor resolución (grilla hijo) con las de resolución más baja (grilla padre). Esta última, trasmite su información a la grilla hijo a través de las condiciones de frontera (BC) que se necesita para la simulación.

Para ello se utilizó el modelo ROMS (SHCHEPETKIN & McWILLIAMS, 2005, 2009) para construir ambas grillas, las BC y realizar las simulaciones. ROMS ha probado ser capaz de reproducir una circulación realista en cada uno de los EBUS conocidos (MARCHESIELLO *et al.*, 2003; MARCHESIELLO & ESTRADÉ, 2007; ESTRADÉ *et al.*, 2008; CAPET *et al.*, 2008; MASON *et al.*, 2010). Para estudiar las zonas más cercanas a la costa con mayor detalle, se realizaron anidamientos no acoplados con la ayuda de la herramienta ROMS2ROMS, la cual permite el uso de la información de entrada de los datos de las fronteras, así como la evolución libre en el flujo simulado (MASON *et al.*, 2010). Para lograr esto, se utilizan los resultados de la simulación padre como condiciones de borde de la simulación hijo; este procedimiento ha sido empleado para estudiar la interacción de las ondas y las corrientes en cuencas semicerradas (BENETAZZO *et al.*, 2013), la variabilidad semidiurna de las mareas en ensenadas (BUIJSMAN *et al.*, 2012), la interacción océano-atmósfera en zonas de afloramiento costero (BOE *et al.*, 2011), la generación de filamentos en cabos (TROUPIN *et al.*, 2012), la circulación en cañones submarinos (AHUMADA-SEMPOAL *et al.*, 2013) el transporte de huevos y larvas entre la costa y las islas (BROCHIER *et al.*, 2011) y la dispersión de efluentes de aguas

residuales en bahías (UCHIYAMA *et al.*, 2014). En todos los casos las resoluciones horizontales han sido menores a 5 km llegando en algunos casos hasta 75 m.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Modelado ROMS y ROMS2ROMS

El método utilizado, desarrollado por MASON *et al.* (2010), consiste en realizar un anidamiento de un solo sentido (*one-way*) no acoplado, entre dos grillas de diferente resolución espacial, la simulación es secuencial, es decir, primero se utiliza el modelo ROMS sobre la grilla de menor resolución (padre) y luego se toman los resultados de esta simulación para construir las condiciones iniciales y de frontera que utilizará el modelo ROMS al ejecutarse sobre la grilla de mayor resolución (hijo), la cual a su vez se utiliza para realizar otro anidamiento de mayor resolución. La ventaja de este método es que mejora la estabilidad y precisión de las condiciones de frontera del modelo por medio de la reducción de efectos indeseables en las fronteras como son las corrientes espurias o la reflexión de ondas, así como asegura la conservación del volumen en las fronteras abiertas (MARCHESIELLO *et al.*, 2001; MASON *et al.*, 2010).

Configuración del modelo

Para estudiar la variación climatológica de la temperatura y las corrientes en la bahía seleccionada, se realizó una simulación ROMS a 12,3 km de resolución horizontal (padre) y dos anidamientos sucesivos de 4,1 km (hijo 1) y de 1,37 km (hijo 2), los cuales están dentro del rango recomendado para la relación entre grillas padre/hijo cuando se utiliza la herramienta ROMS2ROMS (TROUPIN *et al.*, 2012). El área de estudio estuvo comprendida entre 78°W – 75°W y 15°S – 11°S la cual abarca las bahías de Miraflores y de Paracas (Fig. 1).

Para obtener los forzantes atmosféricos necesarios para el modelo se emplearon datos del satélite QUIKSCAT (vientos) y del modelo ECMWF (flujos de calor y precipitación), los cuales, para ser utilizados como forzantes en los anidamientos, fueron interpolados a la resolución de las grillas hijo 1 y 2. Para construir las condiciones de frontera del hijo 1 se aprovecharon los resultados de la simulación padre y para las condiciones de frontera del hijo 2 los resultados de la simulación hijo 1. En ambos anidamientos se utilizó el procedimiento ROMS2ROMS.

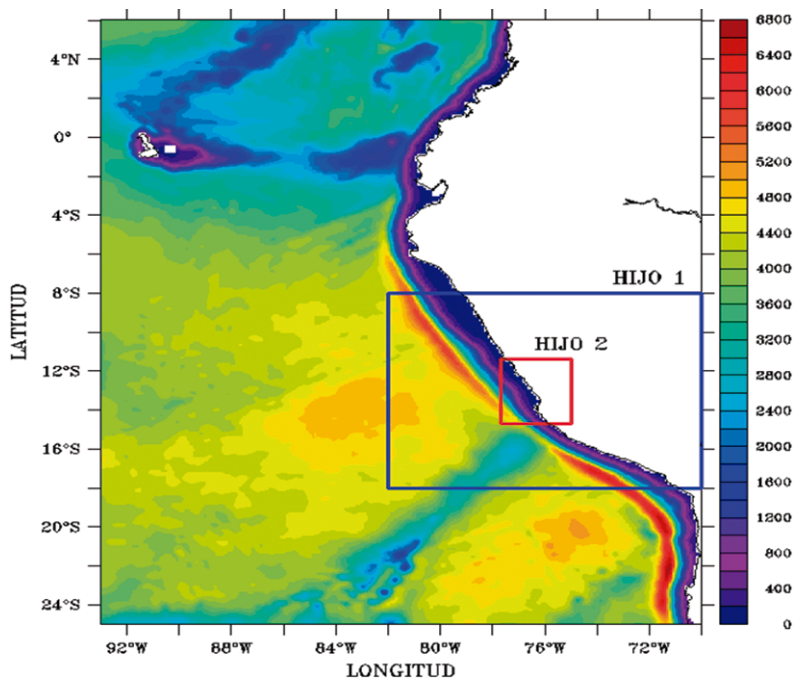


Figura 1.- Anidamientos sucesivos para el modelado ROMS2ROMS: 12,3 km de resolución horizontal (padre), en el rectángulo azul el primer anidamiento de 4,1 km (hijo 1) y en el rectángulo rojo el segundo anidamiento de 1,37 km (hijo 2)

Batimetría

Para su frontera inferior, el modelo necesitaba una batimetría de resolución mayor o igual a la que se pretendía simular, por este motivo, se utilizó la base de datos trabajada en el Proyecto “Batimetría Perú” realizado en el marco de la colaboración IMARPE-IRD (Yann Tremblay com. pers.) en el cual se construyó una grilla regular de la batimetría del Perú utilizando herramientas geoestadísticas y la información de cruceros de IMARPE, cartas de navegación y bases de datos internacionales de la NOAA, ETOPO y GEBCO para obtener una batimetría de alta resolución (50 m) cerca a la costa peruana. Este producto fue corregido para evitar diferencias en las profundidades que podrían existir entre las grillas padre e hijos aplicándole un filtro Hanning implementado en ROMS2ROMS. En la figura 2 se muestra la batimetría en el área de estudio correspondiente a la bahía seleccionada.

Datos observados

Se utilizó una climatología desarrollada en el marco del convenio interinstitucional entre el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) y el Instituto francés de Investigación para el Desarrollo (IRD), dentro del programa

“*Volontaire Civil International*”, generada a partir del procesamiento de datos obtenidos del *World Ocean Database* (WOD, http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr_wod.html) de la *National Oceanographic Data Center* (NODC) y cerca de 15000 perfiles verticales de temperatura recolectados entre 1961 y 2008 del IMARPE, con los cuales se obtuvo un campo grillado de resolución espacial de 0,1°. Las herramientas estadísticas utilizadas se describen en BERTRAND *et al.* (2011)

A continuación, se compararon series de TSM de esta climatología con las series de TSM simuladas con el modelo de mayor resolución (hijo 2) en dos puntos comunes: el punto “E” (76,6°W y 13,8°S) fuera de la bahía y en el punto “I” (76,3°W y 13,7°S) dentro de la bahía.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Distribución de temperatura y corrientes a diferente resolución espacial

A modo de comparación, en la figura 3 se muestra el impacto en la distribución de la temperatura y corrientes superficiales simuladas al aumentar la resolución espacial del modelo, en una zona que comprende la parte central del

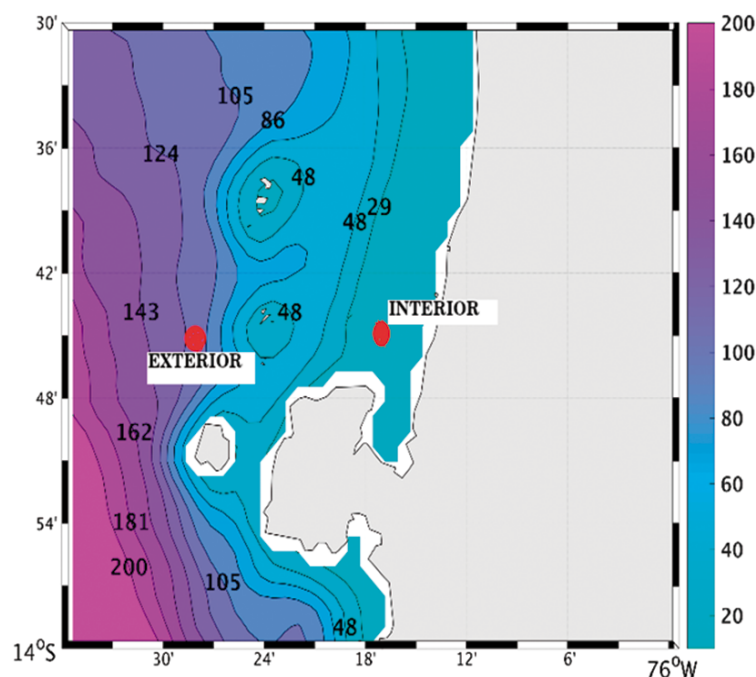


Figura 2.- Batimetría del área de estudio que comprende la bahía de Pisco, los valores están en metros (m). En rojo, dos puntos utilizados para validar la TSM, uno “exterior” (E) lejano a la bahía (76,6°W y 13,8°S) y el otro, más cercano a ella “interior” (I) (76,3°W y 13,7°S)

sistema de afloramiento peruano. En todos los casos, la temperatura es mayor en la frontera lateral oeste disminuyendo al acercarse a la costa, sin embargo, tanto en el primer como segundo anidamiento se observa la formación de filamentos, como resultado de la inestabilidad energética y los remolinos producidos por el flujo lateral y la re-estratificación que tiene lugar en cada anidamiento. Como puede verse, estas estructuras, así como la intensidad de las corrientes superficiales aumentan con la resolución del modelo (CAPET *et al.*, 2008b, COLAS *et al.*, 2012).

Variación estacional de la temperatura

En la figura 4 se muestra la distribución superficial de la temperatura del mar (en °C), así como la dirección de las corrientes marinas por medio de vectores. En ella podemos observar que durante el verano la TSM lejos de la bahía es alrededor de 20 °C y va disminuyendo al acercarse a la península de Paracas alcanzando los 19 °C en las proximidades de la isla San Gallán. En la zona comprendida entre la isla y la península, la TSM alcanza 18,2 °C y disminuye aún más al acercarse a la bahía de Pisco, llegando a 17,5 °C en la cercanía de la playa Lobería (donde se observa un núcleo más frío) y San Andrés.

En otoño, la temperatura entre la isla San Gallán y la península alcanza 16,1 °C, aumentando a 16,9 °C en el lado oeste de la isla y continuando

este ascenso hasta 17,5 °C a 76°33'W, alejándose de la península. Cerca de la bahía de Pisco, el valor de TSM llega a 15,8 °C frente a San Andrés, sin embargo, dentro de la bahía de Paracas se obtuvieron valores entre 17 y 17,5 °C. Estos valores son menores al compararlos con las mediciones realizadas por IMARPE en otoño de 1996, en la cual la TSM cerca de la bahía de Pisco fue, en promedio, 19,9 °C (GUZMÁN *et al.*, 1997).

Durante el invierno se obtuvo una TSM exterior (76°33'W) igual a 15,8 °C. Al acercarse a la bahía de Pisco, esta disminuye, llegando a 14,75 °C entre la isla Sangayan y la península de Paracas. Sin embargo, aumenta cerca de San Andrés hasta 15,1 °C y dentro de la bahía de Paracas supera los 16 °C. Estos valores son más cercanos a los registrados *in situ* en el invierno de 2003, 2004 y 2005 por los cruceros de evaluación de IMARPE, en los cuales la TSM en la bahía de Pisco se mantuvo entre 15 y 16 °C (VÁSQUEZ 2008a, b, c).

Finalmente, en primavera, la simulación generó un núcleo frío frente a playa Lobería, menor a 15 °C. En la parte norte de la península, la TSM fue de 15 °C aumentando dentro de la bahía de Paracas hasta 17 °C. En el extremo oeste de la isla Sangayan se obtuvo una temperatura de 16,5 °C y esta fue aumentando al alejarse de la costa hasta alcanzar 17,5 °C a 76°33'W. Estos valores son comparables a los registrados en la primavera de 2013, con un núcleo frío de 15 °C cerca de la bahía (MORÓN *et al.*, 2017) y 16 °C fuera de la bahía (MORÓN *et al.*, 2011).

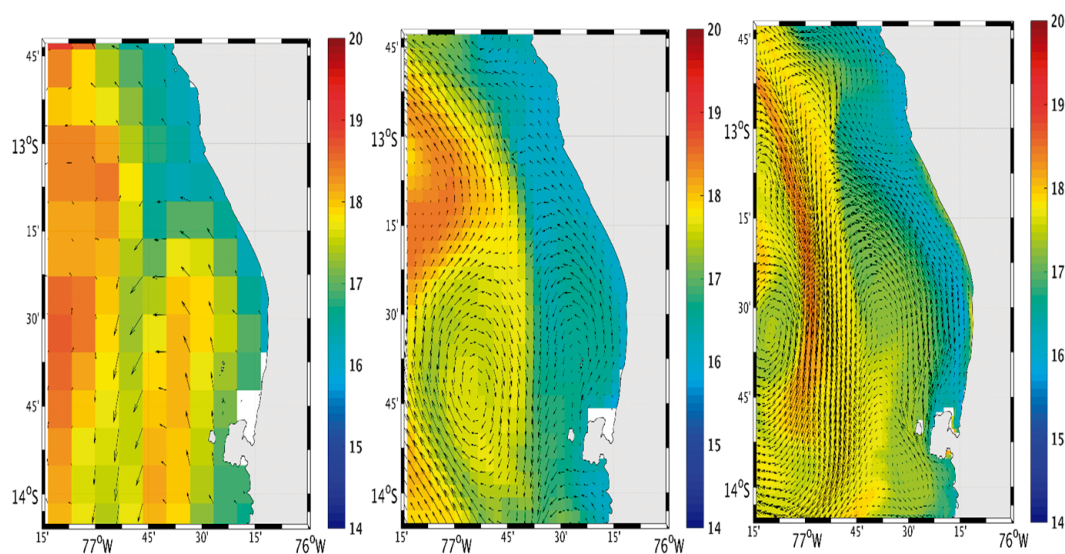


Figura 3.- Distribución espacial de la TSM obtenida. A la izquierda la simulación original de 12,3 km de resolución horizontal (padre), en el centro, el primer anidamiento de 4,1 km (hijo 1) y a la derecha, el segundo anidamiento de 1,37 km (hijo 2). Sobre esta se han colocado los vectores de velocidad de corriente en superficie, en cada punto de grilla, para mostrar la diferencia entre las resoluciones horizontales de cada simulación

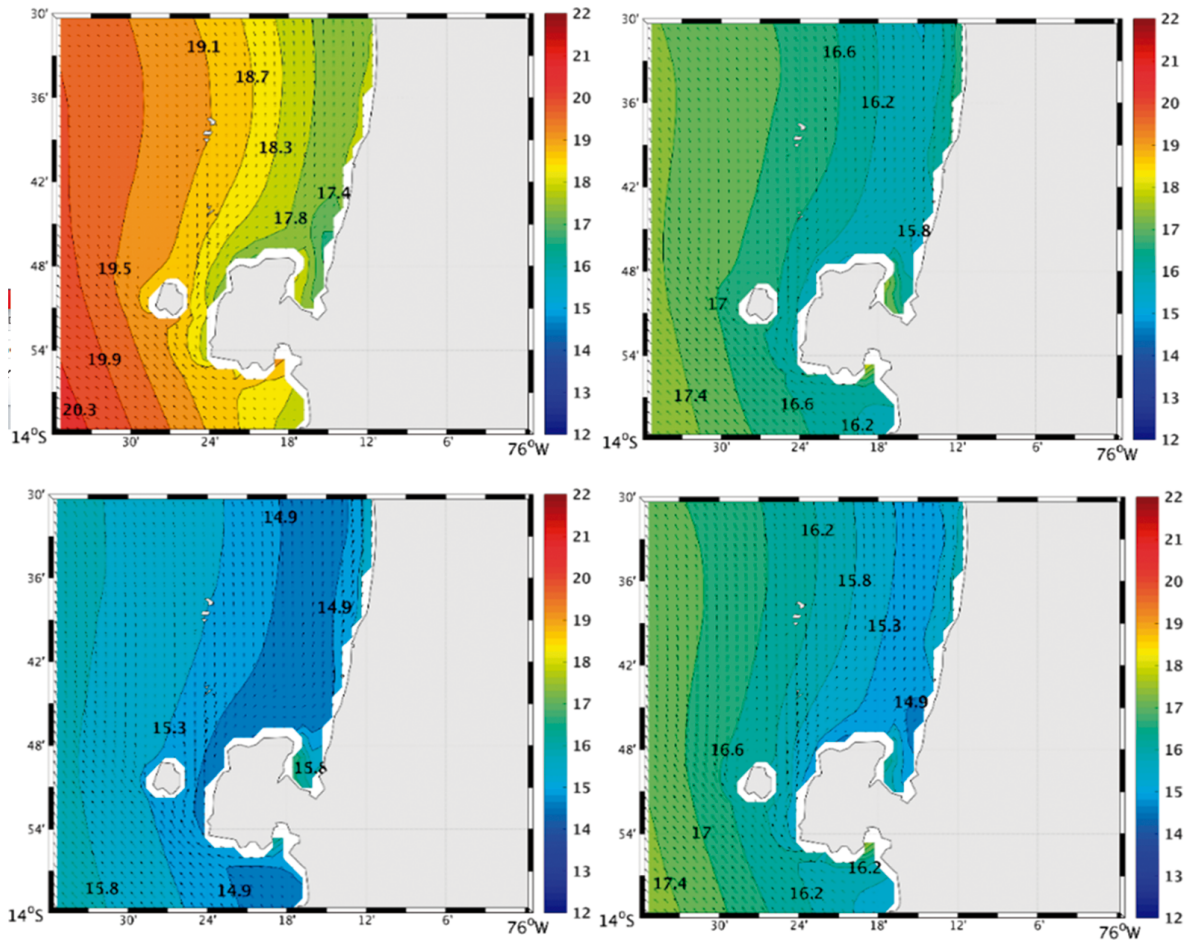


Figura 4.- Variación estacional de la TSM (°C) en el área de estudio durante el verano (arriba izquierda), otoño (arriba derecha), invierno (abajo izquierda) y primavera (abajo derecha). Las flechas indican la dirección de las corrientes, en colores, la intensidad de la temperatura

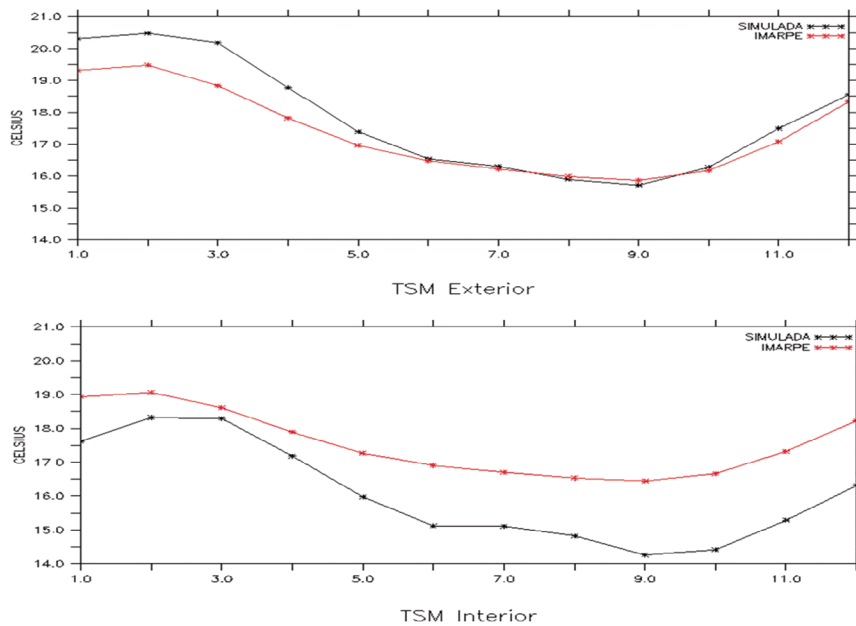


Figura 5.- Series temporales de TSM en la bahía de Paracas, simulada por ROMS (negro) y registradas por IMARPE (rojo) que muestran la variación estacional en dos puntos: uno exterior lejano a la bahía "E" (76,6°W y 13,8°S) en la parte de arriba y el otro, en la parte de abajo, frente a la boca de bahía Paracas "I", según los datos de IMARPE obtenidos (76,3°W y 13,7°S), los valores están en °C

Las series de TSM observadas y simuladas se muestran en la figura 5, las series dentro ($r = 0,99$, $p < 0,05$) y fuera ($r = 0,95$, $p < 0,05$) de la bahía tienen buena correlación con la TSM *in situ*, indicando que el modelo reproduce adecuadamente la variación estacional de la TSM. La TSM muestra variación estacional, con los valores más altos en verano para ambos puntos. La TSM del IMARPE dentro de la bahía es mayor a la TSM simulada, en cambio, la TSM simulada es menor que la TSM observada fuera de la bahía.

En invierno se presentan los valores más bajos de TSM, y se observa que los valores fuera de la bahía coinciden con los datos *in situ* registrados por IMARPE, mientras que, dentro de la bahía los datos simulados llegan a ser hasta 2,5 °C menores a los datos observados. Estas diferencias pueden deberse al hecho que el viento superficial con el que se fuerza el dominio del modelo más pequeño viene de una interpolación matemática, que impone un “dropoff” del viento (RENAULT *et al.*, 2012) artificialmente más intenso, que un viento más intenso de lo normal propicia un mayor afloramiento en la bahía, produciendo como consecuencia aguas más frías que lo observado en esa zona.

Variación estacional de las corrientes

En la figura 6 se muestra la distribución superficial de las corrientes marinas, así como la dirección de estas por medio de vectores. En ella podemos observar que durante el verano la velocidad es mayor en las cercanías de la península de Paracas y al norte de los 13,4°S (7,5 cm/s en ambos casos) y disminuye al acercarse a la costa hasta 2,5 cm/s.

En otoño, la velocidad aumenta en las cercanías de la península de Paracas llegando hasta 12,5 cm/s en la parte sur, también se encontró este valor cerca a la costa en 13,2°S, mientras que en las cercanías de la parte norte de la península la corriente disminuye hasta 5 cm/s conforme nos acercamos a la bahía de Paracas, estos resultados están dentro del rango registrado en las cercanías de la bahía durante el otoño de 1995, cuando se registraron flujos lentos menores a 9 cm/s (JACINTO *et al.*, 1996). En el área que abarca la bahía de Pisco (13°40' y 13°50') se obtuvieron valores cercanos a 12,5 cm/s, los cuales están acorde a las mediciones realizadas por el IMARPE en el otoño de 1996 cuando los valores no superaron los 15 cm/s (GUZMÁN *et al.*, 1997).

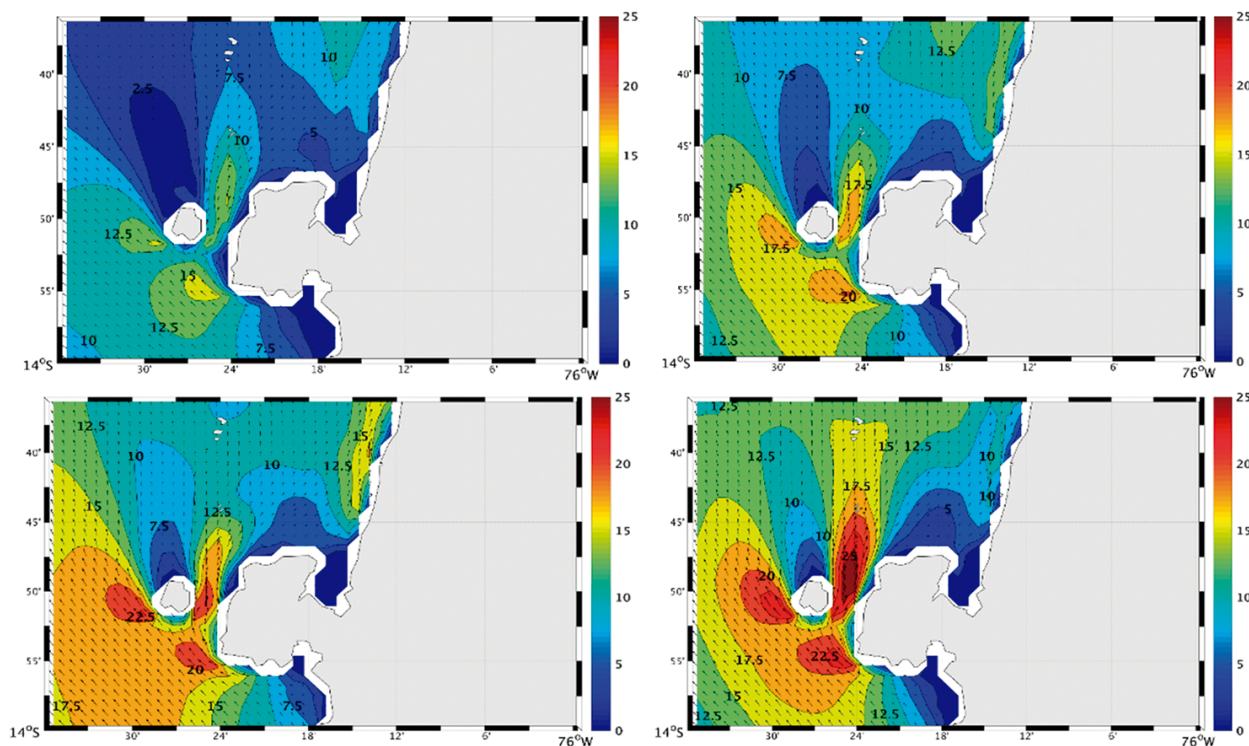


Figura 6.- Variación estacional de las corrientes marinas en superficie (cm/s) en el área de estudio durante el verano (arriba izquierda), otoño (arriba derecha), invierno (abajo izquierda) y primavera (abajo izquierda). Las flechas indican la dirección de las corrientes, en colores, la intensidad de las mismas

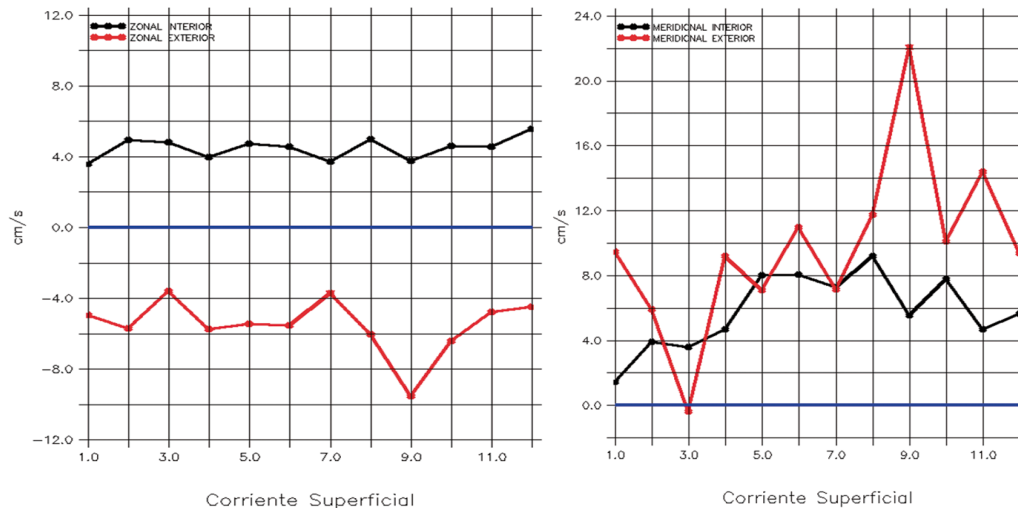


Figura 7.- Series temporales de corriente superficial simulada (en cm/s), zonal (izquierda) y meridional (derecha) en los puntos interior (negro) (76,3°W y 13,7°S) y exterior (rojo) (76,6°W y 13,8°S), de la bahía de Pisco

Durante el invierno, se observa cerca al sur de la península de Paracas que la velocidad aumenta hasta 15 cm/s, mientras que en su parte norte disminuye hasta 2,5 cm/s, además se observan dos núcleos de 12,5 cm/s que se forman frente a la costa. Finalmente, en primavera la velocidad aumenta y los dos núcleos detectados en invierno alcanzan velocidades de 22,5 cm/s, ambos incluidos en una corriente formada aproximadamente a 20 km de la costa y que circula a lo largo de ella a la velocidad de 20 cm/s en dirección noroeste.

En la figura 7, se muestran las series temporales de corriente superficial (en cm/s) para los puntos situados dentro y fuera de la bahía, en las cuales se observa que, la componente zonal de la corriente dentro de la bahía se mantiene en dirección al este (hacia la costa), durante todo el año, alcanzando sus máximos valores en primavera (diciembre - 5,7 cm/s), y mínimos en invierno, aunque es enero (3,8 cm/s) cuando se registra el mínimo anual. Fuera de la bahía la dirección es al oeste durante todo el año (alejándose de la costa) con su máximo en invierno (9,8 cm/s en setiembre) y mínimo en verano (3,9 cm/s en marzo).

Para la componente meridional de la corriente, se observa que dentro de la bahía la dirección es hacia el norte durante todo el año, con su máximo en invierno (10 cm/s en agosto) y el mínimo en verano (1,7 cm/s en enero). Para el punto fuera de la bahía, solo se obtienen valores de corriente hacia el sur, durante marzo (0,3 cm/s), el resto del año la dirección es hacia el norte, destacando el máximo en invierno (22 cm/s en setiembre).

4. CONCLUSIONES

El modelo reprodujo el ciclo estacional de la TSM, dentro ($r = 0,99$) y fuera ($r = 0,95$) de la bahía de Pisco, con algunas diferencias en la intensidad de la TSM simulada y observada.

En el caso de la TSM fuera de la bahía el modelo reprodujo de manera aceptable los resultados observados en invierno y primavera, mientras que para el punto dentro de la bahía en las mismas estaciones se obtiene una diferencia mayor a 2 °C. Durante el verano el modelo subestima la TSM dentro y fuera de la bahía.

En el área que incluye la Península de Paracas se observa que la velocidad de las corrientes va en dirección noroeste con mayor intensidad al sur y al oeste de la península, alcanzando sus valores más altos en primavera (22,5 cm/s) y los más bajos en verano (7,5 cm/s). La corriente detectada en primavera podría estar asociada a la Corriente Costera Peruana. Dentro de la bahía de Pisco la velocidad de las corrientes disminuye hasta los 2,5 cm/s durante todo el año.

En vista que la simulación a esta escala brinda mejores resultados fuera de la bahía que dentro de esta, se recomienda mejorar el forzamiento atmosférico antes de realizar una simulación aplicando el ROMS2ROMS a mayor resolución espacial (e.g. 300 m).

5. REFERENCIAS

- AHUMADA-SEMPOAL M.-A, FLEXAS M, BERNARDELLO R, BAHAMON N, CRUZADO A. 2013. Northern Current variability and its impact on the Blanes Canyon circulation: A numerical study. *Progress in Oceanography*. 118: 61-70.
- BENETAZZO A, CARNIEL S, SCLAVO M, BERGAMASCO A. 2013. Wave–current interaction: effect on the wave field in a semi-enclosed basin. *Ocean Model*. 70: 152–165.
- BERTRAND A, CHAIGNEAU A, PERALTILLA S, LEDESMA J, GRACO M, *et al.* 2011. Oxygen: A Fundamental Property Regulating Pelagic Ecosystem Structure in the Coastal Southeastern Tropical Pacific. *PLoS ONE* 6(12): e29558. doi:10.1371/journal.pone.0029558
- BOE J, HALL A, COLAS F, McWILLIAMS J, QU X, KURIAN J. 2011. What shapes mesoscale wind anomalies in coastal upwelling zones? *Climate Dynamics*. 36: 871-877.
- BROCHIER T, MASON E, MOYANO M, BERRAHO A, COLAS F, SANGRÀ P, HERNÁNDEZ-LEÓN S, ETTAHIRI O, LETT C. 2011. Ichthyoplankton transport from the African coast to the Canary Islands. *J. Marine Systems*. 87(2): 109–122.
- BUIJSMAN M C, UCHIYAMA Y, McWILLIAMS J C, HILL-LINDSAY C R. 2012. Modeling semidiurnal internal tide variability in the Southern California bight. *J. Phys. Oceanogr*. 42: 62–77.
- CABELLO R, TAM J, JACINTO M E. 2002. Procesos naturales y antropogénicos asociados al evento de mortalidad de conchas de abanico ocurrido en la bahía de Paracas (Pisco, Perú) en junio del 2000. *Rev. peruana Biología*. 9(2): 94-110.
- CAPET X, COLAS F, PENVEN P, MARCHESIELLO P, McWILLIAMS J C. 2008. Eddies in eastern boundary subtropical upwelling systems, in *Ocean Modeling in an Eddying Regime*. AGU, Washington, D C. *Geophys. Monogr. Ser.* 177: 131–147.
- CAPET X, McWILLIAMS J C, MOLEMAKER M J, SHCHEPETKIN A F. 2008b. Mesoscale to submesoscale Transition in the California Current System. Part I: Flow Structure, Eddy Flux, and Observational Tests. *J. Phys. Oceanogr*. 38: 29–43, <https://doi.org/10.1175/2007JPO3671.1>.
- CHAIGNEAU A, ELGIN G, DEWITTE B. 2009. Eddy activity in the four major upwelling systems from satellite altimetry (1992–2007). *Progress in Oceanography*. 83(1–4): 117-123. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.012>.
- CARBONEL C A A. 2013. Un modelo de gravedad reducida de la hidrodinámica y termodinámica en zona costera. Caso de estudio: Bahías de Pisco y Paracas. *Revista de Investigación de Física*. 16(1): 1-8.
- COLAS F, McWILLIAMS J C, CAPET X, *et al.* 2012. Heat balance and eddies in the Peru-Chile current system. *Clim Dyn*. 39; 509–529. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1170-6>.
- ESTRADE P, MARCHESIELLO P, COLIN DE VERDIÈRE A, ROY C. 2008. Cross-shelf structure of coastal upwelling: A two-dimensional extension of Ekman's theory and a mechanism for inner shelf upwelling shut down. *J. Mar. Res.* 66: 589–616.
- FLORES D, TEJADA A, ALARCÓN J, SARMIENTO H, MUÑOZ R. 2019. Línea Base del Sitio Piloto Islas Ballestas: Recursos Pesqueros. *Inf Inst Mar Perú*. 46(1): 67-77.
- GUZMÁN M, CHAVEZ J, MORÓN O, SANCHEZ S, FLORES G. 1997. Evaluación de la calidad del medio ambiente marino en la bahía de Pisco – Paracas, 22 a 24 mayo 1996, *Inf Prog Inst Mar Perú*. N°54.
- GUTIÉRREZ D, *et al.* 2011. Coastal cooling and increased productivity in the main upwelling zone off Peru since the mid-twentieth century. *Geophys. Res. Lett.* 38: L07603. doi:10.1029/2010GL046324.
- JACINTO M E, MARTINEZ C, SANCHEZ S, FLORES F, PIZARRO L. 1996. Evaluación de la varazón y contaminación en la bahía Paracas – Pisco, *Inf Prog Inst Mar Perú*. N°29.
- JANEKOVIC I, POWELL B S. 2012. Analysis of imposing tidal dynamics to nested numerical models. *Cont. Shelf Res.* 34: 30–40.
- MARCHESIELLO P, ESTRADE P. 2007. Eddy activity and mixing in upwelling systems: A comparative study of Northwest Africa and California regions. *International Journal of Earth Sciences*. DOI 10.1007/s00531-007-0235-6
- MARCHESIELLO P, ESTRADE P. 2010. Upwelling limitation by onshore geostrophic flow. *Journal of Marine Research*. 68(1): 37-62(26). <https://doi.org/10.1357/002224010793079004>.
- MARCHESIELLO P, McWILLIAMS J C, SHCHEPETKIN A. 2001. Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models. *Ocean Modelling*. 3: 1–20.
- MARCHESIELLO P, McWILLIAMS J C, SHCHEPETKIN A. 2003. Equilibrium structure and dynamics of the California Current System. *J. Phys. Oceanogr*. 33: 753–783.
- MASON E, MOLEMAKER J, SHCHEPETKIN A F, COLAS F, McWILLIAMS J C, SANGRÀ P. 2010. Procedures for offline grid nesting in regional ocean models. *Ocean Modelling*. 35: 1–15.
- MINAM. 2016. Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 326 pp.
- MORÓN O, CAMPOS M. 2011. Condiciones oceanográficas en primavera 2005: Crucero BIC Olaya 0509-10. *Inf Inst Mar Perú*. 38(1): 127-133.
- MORÓN O, QUISPE J, LORENZO A, FLORES G, SÁNCHEZ S, ARONÉS K, SOLÍS J, QUIPUZCOA L. 2017. Caracterización de los procesos físicos, químicos, biológicos y sedimentológicos en las islas Ballestas y Chincha. 2013. *Inf Inst Mar Perú*. 44(4): 472-506.
- SENAMHI. 2013. Cambio climático en las Cuencas de los Ríos Ica y Pisco: Proyecciones para el año 2030. Proyecto “Adaptación al Cambio Climático y Reducción del Riesgo de desastres en cuencas priorizadas de Ica y Huancavelica – ACCIH”. 40 pp.
- RENAULT L, DEWITTE B, MARCHESIELLO P, ILLIG S, ECHEVIN V, CAMBON G, RAMOS M, ASTUDILLO O, MINNIS P, AYERS J K. 2012. Upwelling response to atmospheric coastal jets off central Chile: A modeling study of the October 2000 event. *J. Geophys. Res.* 117: C02030.

- SHCHEPETKIN A F, McWILLIAMS J C. 2005. The regional oceanic modeling system: a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate ocean model. *Ocean Modelling*. 9: 347-404.
- SHCHEPETKIN A F, McWILLIAMS J C. 2009. Correction and commentary for ocean forecasting in terrain-following coordinates: formulation and skill assessment of the regional ocean modeling system by Haidvogel *et al.* *J. Comput. Phys.* 227: 3595-3624. *J. of Computational Physics*. 228: 8985-9000.
- TROUPIN C, MASON E, BECKERS J M, SANGRÀ P. 2012. Generation of the Cape Ghir upwelling filament: A numerical study. *Ocean Modelling*. 41: 1-15.
- UCHIYAMA Y, IDICA E, McWILLIAMS J C, STOLZENBACH K D. 2014. Wastewater effluent dispersal in Southern California Bays. *Cont. Shelf Res.* 76: 36-52.
- UNEP. 2006. Permanent Commission for the South Pacific (CPPS). Humboldt Current, GIWA Regional assessment 64. University of Kalmar, Kalmar, Sweden.
- VÁSQUEZ L. 2008a. Condiciones oceanográficas físicas en invierno 2003. *Inf Inst Mar Perú* 35(2): 109-114.
- VÁSQUEZ L. 2008b. Características oceanográficas físicas en invierno 2004. *Inf Inst Mar Perú*. 35(2): 123-128.
- VÁSQUEZ L. 2008c. Condiciones ambientales físicas del mar peruano a finales del invierno 2005. *Inf Inst Mar Perú*. 35(2): 173-180.
- VELAZCO F, SOLÍS J. 2000. Estudio sedimentológico de la bahía de Paracas. *Inf Prog Inst Mar Perú*. 133: 3-22.
- YZOCUPE V A. 2002. Modelo numérico de flujo bidimensional de la bahía de Paracas. *Revista de Investigación de Física*. 5: 1-9.