

## Development of computational meshes to implement the model ADCIRC (Advance Three Dimensional Circulation Model) in the Galapagos Archipelago

## Elaboración de mallas computacionales para la implementación del Modelo ADCIRC (Advance Three Dimensional Circulation Model) en el Archipiélago de Galápagos

Daniel E. Gaona<sup>1\*</sup>, Jesús Portilla<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad San Francisco de Quito - Colegio de Ciencias e Ingenierías. Diego de Robles y Vía Interoceánica, Cumbayá - Ecuador.

\*Autor principal/Corresponding author, e-mail: dgaona@gmail.com

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 01/10/2014. Aceptado/Accepted: 19/10/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 19/12/2014. Impreso/Printed: 19/12/2014.

### Abstract

The study of physical oceanographic variables is a topic of great interest for understanding other relevant processes like chemical, biological, heat transfer, among others. In the in the Galapagos Islands in particular, knowledge about these processes is a key issue to understanding its biodiversity and equilibrium, unique in the world. Among the most basic physical phenomena driving the whole physical regime, wind waves and tidal circulation are the dominant and can explain largely secondary fundamental processes like transport phenomena (e.g., larvae, plankton, fish, sediments, chemicals, heat, among others), which in turn have a direct impact over ecosystems. In the present paper, several preliminary developments for the implementation of the "Advanced Three Dimensional Circulation Model" (ADCIRC) are documented. An important aspect detailed here is the design and development of computational grids, a non-trivial pre-processing set of steps that requires bathymetry and mesh homogenization to guarantee the proper representation of physical process by the model, and to avoid numerical instabilities in the downstream operations. Several algorithms have been developed to this end and are presented here. With these developments, a preliminary implementation of ADCIRC was carried out to check the grids functionality.

**Keywords.** Mallas, Galápagos, Bluekenue, ADCIRC, Mesh generation, Circulation model.

### Resumen

El estudio de las variables oceanográficas físicas es un tema de gran interés para entender otros procesos relevantes como los químicos, biológicos, transferencia de calor, entre otros. En el Archipiélago de Galápagos en particular, el conocimiento de estos procesos es la clave para entender su biodiversidad y equilibrio, única en el mundo. De los fenómenos más básicos que controlan todo el régimen físico, las olas de viento y la circulación inducida por las mareas pueden explicar una parte importante de otros procesos secundarios fundamentales como los de transporte (e.g., larvas, plancton, peces, sedimentos, químicos, calor, entre otros), que tienen a su vez un efecto directo sobre los ecosistemas. En el presente artículo, se presenta la documentación algunos de los desarrollos preliminares para la implementación del modelo ADCIRC (Advanced Three Dimensional Circulation Model). Un aspecto importante es el diseño y elaboración de las mallas computacionales, compuesto de un grupo de pasos de pre-procesamiento que requiere homogeneización de datos de batimetría y mallas de cálculo para garantizar la adecuada representación de los procesos físicos y evitar inestabilidad numérica en operaciones posteriores. Varios algoritmos han sido desarrollados con este propósito y son presentados aquí. Con estos avances, se realizó una implementación preliminar de ADCIRC para evaluar la funcionalidad de las mallas.

**Palabras Clave.** ADCIRC, mallas computacionales, Islas Galápagos, circulación, mareas.

### Introducción

Durante las últimas décadas, los estudios oceanográficos han sido tópicos de especial interés a nivel mundial. El estudio de las corrientes, mareas y circulación oceánica ha ganado importancia debido a su implicación di-

recta sobre la explicación de una diversidad de fenómenos físicos y antropológicos [1], [2]. Las corrientes y las mareas son responsables de diversos fenómenos de transporte de nutrientes y biodiversidad tales como el transporte de larvas, plancton, peces y sedimentos

[3, 4]. Estos fenómenos tienen un gran impacto sobre los ecosistemas marítimos y sobre la producción biológica primaria y secundaria (e.g., [5, 6]). Asimismo, tienen un efecto importante sobre la conservación ambiental y los ecosistemas marinos. Además del transporte de sedimentos, las corrientes y mareas se encargan del transporte y dispersión de compuestos básicos como sales, oxígeno, dióxido de carbono e incluso contaminantes. El entendimiento del comportamiento dinámico de la circulación oceánica es esencial, por ejemplo, para predecir la propagación de químicos en accidentes ambientales y el comportamiento del océano cerca de puertos, playas y zonas costeras en donde además, el uso del suelo con fines comerciales o de producción acuícola [7], [8] están asociados a un gran impacto antrópico. Por otro lado, los fenómenos de circulación marina influyen en los procesos de transferencia de calor, que afectan directamente la climatología. Así por ejemplo, la corriente fría de Humbolt junto con la corriente y contracorriente Ecuatorial tienen un efecto sobre el clima de la región costera del noroeste sudamericano (e.g., [1]).

Los fenómenos de transporte tienen efectos directos importantes sobre las propiedades oceánicas como la densidad, temperatura y acidez, convirtiéndose así en componentes importantes de los ciclos bioquímicos, geoquímicos e hidrológicos. Es así que un adecuado entendimiento del comportamiento de corrientes, mareas y circulación oceánica constituye la base para comprender estos fenómenos, predecir su comportamiento, y aprovechar los recursos disponibles de forma sustentable [9]. Se debe tomar en cuenta que tanto las corrientes como las mareas obedecen a leyes físicas bien establecidas, por lo que es posible, mediante modelos numéricos, reproducir sus condiciones con bastante aproximación. Algunas corrientes son producidas por la rotación y traslación terrestre, los vientos planetarios, cambios de densidad y presión, fricción, la fuerza de Coriolis, entre otros [10]. Por otro lado, las mareas y su circulación asociada se producen principalmente por los efectos de atracción gravitacional del sol y de la luna por lo que tienen un alto grado de periodicidad y en condiciones de aguas profundas pueden predecirse con gran precisión, en aguas someras, el efecto de la batimetría adquiere la mayor relevancia. La descripción matemática de estos fenómenos físicos (i.e., continuidad, conservación de energía y momento), y la gran capacidad de computación actual, permiten el desarrollo y utilización de modelos numéricos de confiabilidad para describir estos procesos.

ADCIRC (Advanced Three Dimensional Circulation Model), es un modelo de circulación desarrollado por el Departamento de Ciencias Marinas de la Universidad de North Caroline (Chapel Hill). ADCIRC resuelve las ecuaciones de movimiento de fluidos sobre un marco de referencia rotativo [11]. El programa permite resolver de manera bidimensional y tridimensional problemas (de superficie libre) de circulación y transporte en función del tiempo. ADCIRC utiliza las ecuaciones de

presión hidrostática tradicionales y aproximaciones de la ecuación de Boussinesq. Numéricamente utiliza métodos de elementos finitos (en espacio) y métodos de diferencias finitas para permitir un alto grado de flexibilidad por medio del uso de mallas no estructuradas [12, 13]. En general, ADCIRC puede ser usado para predecir mareas e inundaciones, modelar mareas y circulaciones causadas por vientos. Las aplicaciones varían desde la cuantificación del transporte de larvas, hasta operaciones marítimas cerca de las costas [14–16].

Dada la importancia del papel que juegan las mareas y sus corrientes asociadas en la dinámica del océano [17], en el presente estudio se tiene como meta la aplicación de ADCIRC al estudio de ecosistemas, con la finalidad de predecir fenómenos ambientales, optimizar el uso de recursos y sustentar la conservación ambiental. Dado a que el archipiélago de Galápagos uno de los ecosistema más ricos del mundo, resulta un caso especialmente relevante. El objetivo general es simular procesos de transporte, describir las mareas y la circulación de corrientes alrededor del Archipiélago. El objetivo específico en este caso, es preparar las herramientas, métodos y algoritmos para la creación de las mallas computacionales y obtener resultados preliminares de la simulación. Se debe notar también que la metodología y los algoritmos desarrollados puede utilizarse también en otros casos de estudios.

## Métodos

### El modelo ADCIRC

ADCIRC es un modelo de circulación oceánica compuesto de robustos algoritmos de cálculo. La base matemática del modelo está constituida por las ecuaciones de Continuidad y de Momento en dos y tres dimensiones [13, 18].

### Ecuación de la Continuidad

Tanto en el modelo bidimensional como en el tridimensional, ADCIRC resuelve la ecuación de la continuidad utilizando la GWCE (Generalized Wave Continuity Equation), [19], que se muestra a continuación

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UH) + \frac{\partial}{\partial y}(VH) \quad (1)$$

donde:

- H: Altura total de la columna de agua =  $\zeta + h$ .
- $\zeta$ : Variación del nivel del mar sobre el geoid.
- h: Profundidad del fondo oceánico bajo el geoid (batimetría).
- U: Velocidad promedio (espacial) en la dirección X.
- V: Velocidad promedio (espacial) en la dirección Y.

El primer término se refiere a la variación del nivel de mar en el tiempo. Cuando la batimetría (h) es invariable, dicho término depende únicamente de  $\zeta$ . El segundo término, por su parte aporta con el gradiente de velocidad en la dirección  $x$ ; mientras que el tercer término representa el gradiente de velocidad en el eje  $y$ .

**Ecuación de conservación de momento**

Además de la ecuación de continuidad, ADCIRC resuelve la ecuación de balance de momento, que se muestra a continuación

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -g \frac{\partial [\zeta + P_s/g\rho_o - \alpha\eta]}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{H\rho_o} - \frac{\tau_{bx}}{H\rho_o} + \frac{M_x}{H} - \frac{D_x}{H} - \frac{B_x}{H} \tag{2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - fU = -g \frac{\partial [\zeta + P_s/g\rho_o - \alpha\eta]}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{H\rho_o} - \frac{\tau_{by}}{H\rho_o} + \frac{M_y}{H} - \frac{D_y}{H} - \frac{B_y}{H} \tag{3}$$

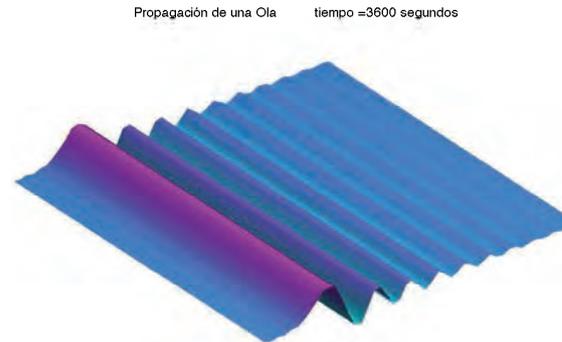
donde:

- f: Parámetro de Coriolis =  $2\omega \sin(\phi)$ .
- $\omega$ : Coeficiente de Coriolis =  $7,29 \times 10^{-5} \text{rad/s}$ .
- $\phi$ : Latitud en grados.
- $P_s$ : Presión atmosférica a nivel del mar.
- $g$ : Gravedad =  $9,8 \text{m/s}^2$
- $\alpha\eta$ : Potencial de Marea de Equilibrio
- $\rho_o$ : Densidad de Referencia del agua.
- $\tau_{sx}, \tau_{sy}$ : Esfuerzos superficiales impuestos.
- $\tau_{bx}, \tau_{by}$ : Esfuerzos por fricción en el fondo.
- $M_x, M_y$ : Gradiente de esfuerzos laterales.
- $M_x = \frac{H\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{H\tau_{yx}}{\partial y}$
- $M_y = \frac{H\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{H\tau_{yy}}{\partial y}$

El primer término de ambas ecuaciones se refiere a la variación de la velocidad en función del tiempo en los ejes  $x$  y  $y$  respectivamente. El segundo y tercer término considera el gradiente de momento lineal. El cuarto término se refiere al cambio de momento generado por el efecto de Coriolis, que depende de la latitud. En el lado derecho de la igualdad, se tienen los cambios de momento debido a la variación de la altura con respecto al geoid, al gradiente de presiones y al potencial de las mareas. Además, se consideran los efectos del viento al incluir esfuerzos superficiales  $\tau$  en la ecuación. La fricción con el fondo marino se toma en cuenta como un esfuerzo cortante  $\tau_b$ . Finalmente, los últimos tres términos  $M$ ,  $D$  y  $B$  consideran los gradientes de los esfuerzos, la dispersión de momento y el gradiente de presiones baroclínicas debidas a los cambios de densidad. Estos términos completan la ecuación general. Según la aplicación se puede reducir algunos términos de la ecuación en función de las necesidades e importancia de los mismos [18, 20].

**Ejemplos**

Las ecuaciones descritas anteriormente pueden llegar ser tan complejas como se requiera. Por lo tanto su complejidad (o simplificación) dependerá de la cantidad de



**Figura 1: Propagación de una ola en un dominio cerrado.**

variables y fenómenos físicos que se deseen incluir. Mientras más fenómenos se incluya, mayor será la precisión de los resultados, pero también mayores las demandas computacionales y en cuanto al conocimiento de las condiciones iniciales y de frontera (e.g., [21]).

Continuidad  $\frac{\partial \zeta}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0$   
 Momento  $\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + ru = 0$

Según este modelo, el balance de momento se reduce de tal manera que la aceleración del fluido depende únicamente del cambio de altura en el nivel de agua y de la fricción. Aplicando el método de diferencia centradas se pueden convertir las ecuaciones diferenciales en ecuaciones discretas:

Cont.  $\frac{\zeta_{n+1} - \zeta_{n-1}}{2\Delta t} + h \frac{u_{n+1} - u_{n-1}}{2\Delta x} = 0$   
 Mom.  $\frac{u_{n+1} - u_{n-1}}{2\Delta t} + g \frac{\zeta_{n+1} - \zeta_{n-1}}{2\Delta x} + r \frac{u_{n+1} - u_{n-1}}{2} = 0$

Para efectos ilustrativos y para relacionar adecuadamente las variables temporales y espaciales en el modelo de las islas, estas ecuaciones fueron implementadas en un entorno MATLAB y aplicadas a un dominio sencillo (un reservorio). El resultado de esta implementación se presenta en la Figura 1

**Datos**

Para el sitio de estudio de Galápagos, los datos de la batimetría utilizados para la creación de la malla corresponden a la base de datos de William Chadwick (Oregon State University), que es una compilación de mediciones in-situ. Para las zonas más profundas, se cuenta con datos de batimetría satelital provenientes de la base de datos de ETOPO [22]. Estas dos fuentes de batimetría fueron combinadas para obtener una cobertura en toda la zona de estudio con suficiente detalle en las zonas costeras de interés. Algunos detalles del proceso de combinación se indican a continuación. En primer lugar, la distribución de los datos in-situ es irregular, dispersa y en algunos puntos, se hay heterogeneidad de los valores de los diversos grupos de datos que la componen. La ventaja de los datos in-situ es la densidad relativamente alta, sobretodo en las zonas costeras. La desventaja es que en muchas zonas, especialmente en aguas profundas no existen datos. Por esta razón, la combinación de

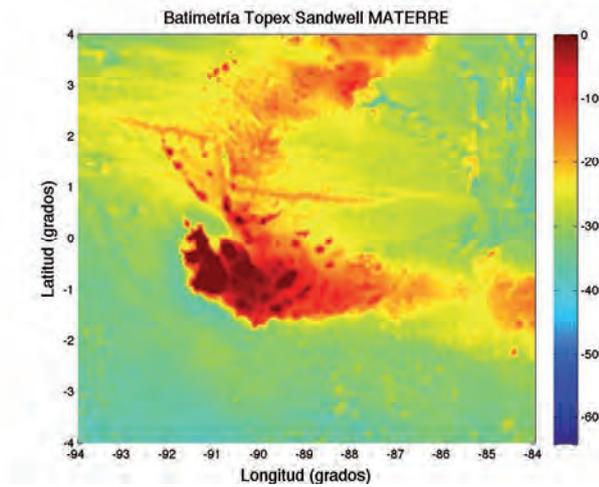


Figura 2: Batimetría Topex Sandwell MATERRE (ETOPO)

estas dos fuentes es mandatoria. La batimetría de ETOPO se muestra en las Figura 2, mientras que la densidad de puntos de los datos in-situ se muestra en la Figura 3.

### Resultados

#### Procesamiento de datos e implementación de la malla computacional en Galápagos

A partir de las batimetrías de ETOPO e in-situ (Oregon State University [23]) se construyó la malla computacional.

#### Corrección de bordes de islas

El primer paso fue adecuar el nivel-0 de la batimetría que corresponde a los bordes de las islas. Los datos de batimetría de ETOPO son menos densos, mientras que en los datos in-situ, a menudo se puede encontrar más de un borde costero para cada isla, esto se debe a la variación del nivel de marea durante las diferentes campañas de medición (ver por ejemplo la Figura 4). La necesidad de tener los puntos del borde de la isla radica en que

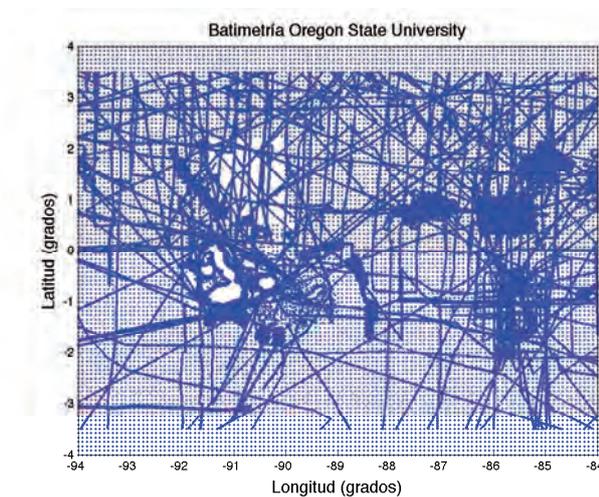


Figura 3: Batimetría OSU-William Chadwick

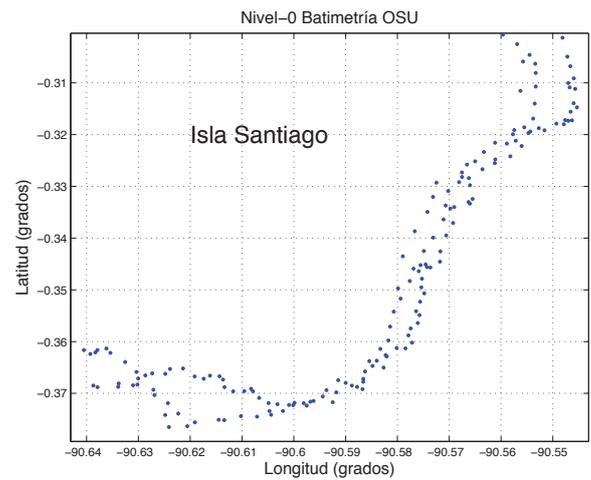


Figura 4: Batimetría OSU. Repetición de puntos en la línea costera.

el modelo de ADCIRC requiere es información para establecer las condiciones de borde para la simulación.

Dado a que todos los procesos numéricos se realizan de forma automática, resulta evidente que la falta de definición de un único borde para las islas, genera problemas numéricos, por lo que es necesario procesar los datos antes de pasarlos al programa de generación de mallas (BlueKeneu en este caso). Además, dado a que el número de puntos y el número de islas es elevado, este procedimiento no puede llevarse a cabo de forma manual, por lo que fue necesario escribir dos algoritmos para realizar esta tarea. Estos procedimientos siguen criterios distintos a) de distancia mínima, y b) del mayor ángulo externo. En ambos casos se decidió tomar los puntos más externos para definir los bordes. Esto implica considerar el perfil de marea baja como borde.

1. **Distancia Mínima.-** En algunos casos, los datos in-situ presentan bordes regulares por lo que un algoritmo de selección del punto más cercano permite definir directamente el borde de la misma. El resultado se muestra en la Figura 5:

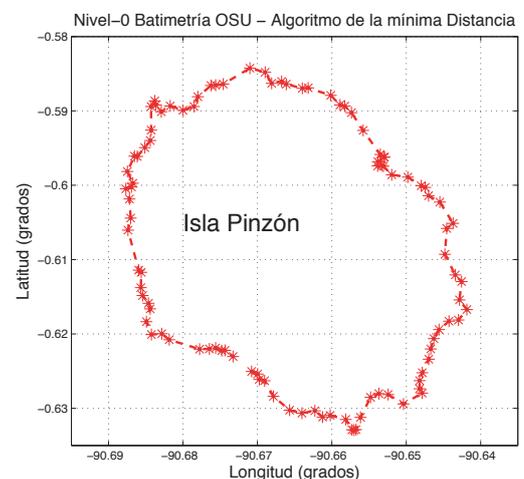


Figura 5: Batimetría in-situ. Corrección de la línea costera. Método de la Distancia mínima

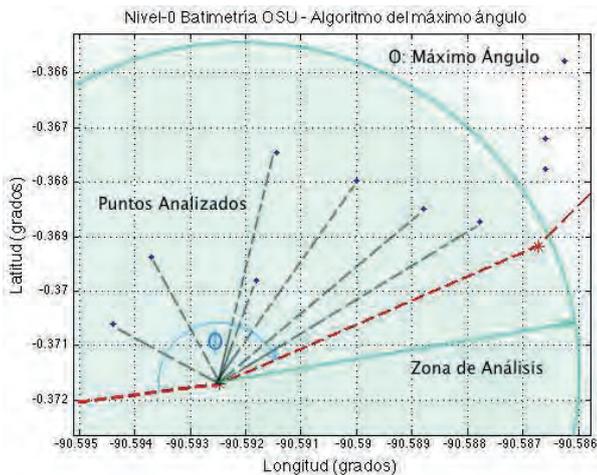


Figura 6: Concepto del Método del ángulo Máximo.

2. **Mayor ángulo Externo.-** En otras ocasiones los bordes de las islas no están delimitados perfectamente, sino que se presentan repeticiones y alta densidad de puntos. El algoritmo desarrollado para esos casos considera los puntos más externos de un entramado de puntos a cierta distancia del punto de análisis. Este criterio se ilustra en la Figura 6. El resultado obtenido, por ejemplo para la Isla Pinzón se muestra en la Figura 7.

### Creación de la máscara de alta resolución

Para hacer por un lado las simulaciones computacionalmente eficientes y aprovechar por otro la flexibilidad de los elementos finitos, se requiere una malla que tenga alta densidad en las cercanías de las islas y baja resolución en el resto del dominio. Entonces, como segundo paso se creó una máscara que permitiera esta dualidad de resolución, gruesa y fina. La malla gruesa se forma a partir de los datos de la batimetría de ETOPO, mientras que la malla fina se forma a partir de los datos in-situ. Para esto el algoritmo toma una distancia de 20 km y traza círculos a partir de cada punto de borde. El dominio de alta resolución se toma de la intersección de los

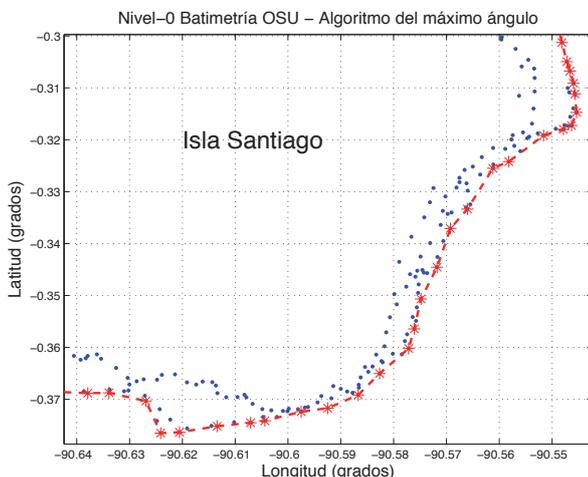


Figura 7: Batimetría de datos in-situ. Corrección de la línea costera. Método del ángulo Máximo.

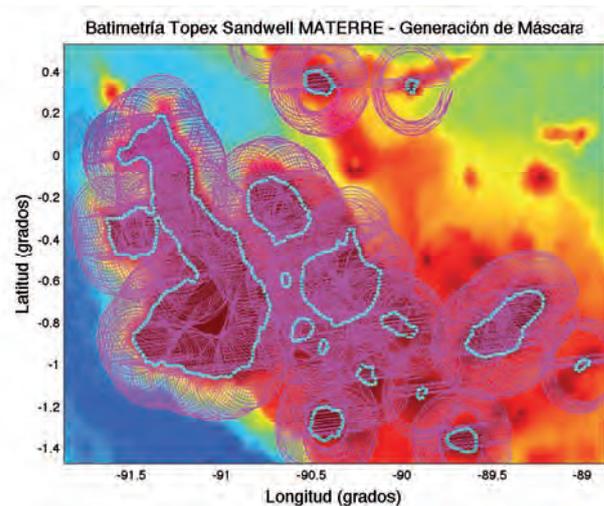


Figura 8: Batimetría ETOPO. Algoritmo de Enmascaramiento.

más externa de estos círculos. En la Figura 8, se ilustra este procedimiento.

### Corrección de uniformidad de la malla

Por otro lado, como se observa en la Figura 3, la densidad de los puntos no es uniforme en el dominio. Con el objetivo de obtener una malla de distribución más uniforme, sin perder mayor información, se desarrolló un método de interpolación por capas. La necesidad de este algoritmo radica en que por la misma falta de uniformidad, los algoritmos de interpolación disponibles en MATLAB no operan correctamente o colapsan. El algoritmo parte de una malla fina predefinida y mapea sobre ésta los puntos de la malla de datos in-situ. En algunos casos, más de un punto de la batimetría in-situ corresponde a un sector de la malla fina. En este caso, se crea otra malla de tal manera de que no haya más de un punto por sector. Obviamente, se trabaja solo en la porción determinada por la máscara. La Figura 9 muestra la densidad de la Primera y la Tercera malla. Este algoritmo permite no solamente formar una malla de mayor uniformidad, sino también, determinar la desviación estándar de los puntos de diversas campañas en cada sector de la malla. Cada nueva malla contiene una menor cantidad de puntos que la anterior y se obtuvieron en total 11 mallas, las últimas con muy pocos datos.

Se calculó luego las desviaciones estándar de cada uno de los segmentos de la malla fina con el objetivo de estimar la variabilidad de los datos dentro de un mismo sector, el resultado se muestra en la Figura 10, donde se aprecia ciertos puntos atípicos con variaciones de profundidad de hasta 1000m. Sin embargo, la gran mayoría de los puntos mantienen variaciones menores a 100m. Esta variabilidad se debe al desfase entre campaña y campaña y al hecho de que la batimetría cambia con abruptamente en las cercanías de las islas.

Posteriormente, se interpoló la malla de ETOPO a la resolución de la malla fina utilizando el algoritmo de

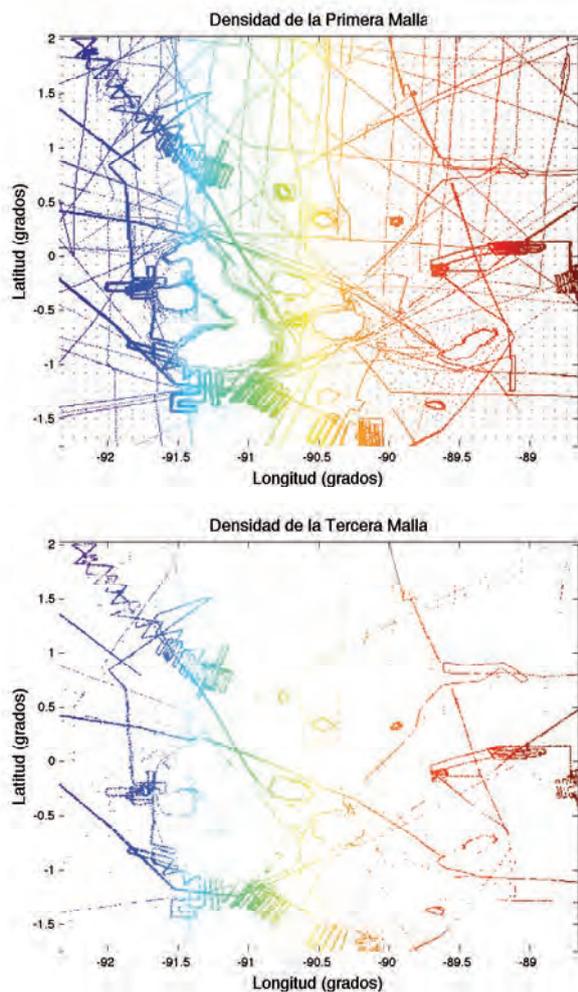


Figura 9: Batimetría OSU. Algoritmo de Corrección de Uniformidad. Densidad en la Primera y Tercera Malla.

interpolación bidimensional de MATLAB (*interp2*) y se obtuvo la malla final a partir del promedio, sector a sector, de todas las mallas.

**Creación de la Máscara de las islas**

Se observa que la malla incluye valores dentro de las islas debido a que la malla de ETOPO está contiene también valores de topografía, por lo que se creó una máscara que permita discernir los puntos del interior de las islas. El algoritmo creado para este fin utiliza los bordes de las islas calculados anteriormente e interpola estos bordes a la resolución de la malla fina. Luego realiza un barrido en latitud, isla por isla. Para cada diferencial de latitud se seleccionan los puntos extremos que definen el borde de la isla. Todos los puntos internos hacen parte de la máscara de islas. Al final, se obtiene una máscara como se muestra en la Figura 11.

**Filtro bidimensional**

Un análisis detallado de la batimetría obtenida muestra cambios bruscos y persistentes, especialmente en los puntos donde sólo existe información de ETOPO (ver por ejemplo Figura 12).

Para corregir estas imperfecciones se utilizó un filtro de suavizado aplicado a toda la batimetría. El filtrado se

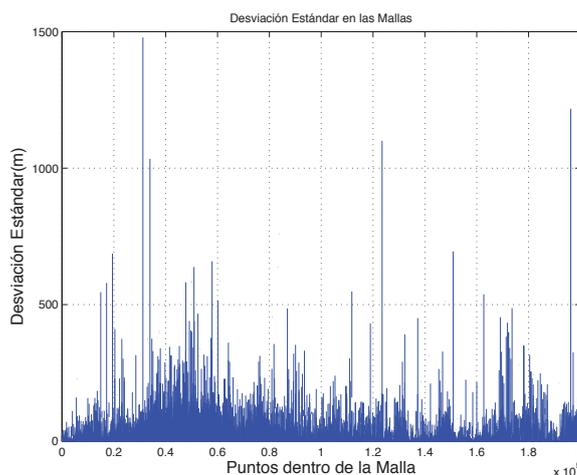


Figura 10: Batimetría OSU. Desviación Estándar por sectores de las mallas resultantes del Algoritmo de Corrección de Uniformidad.

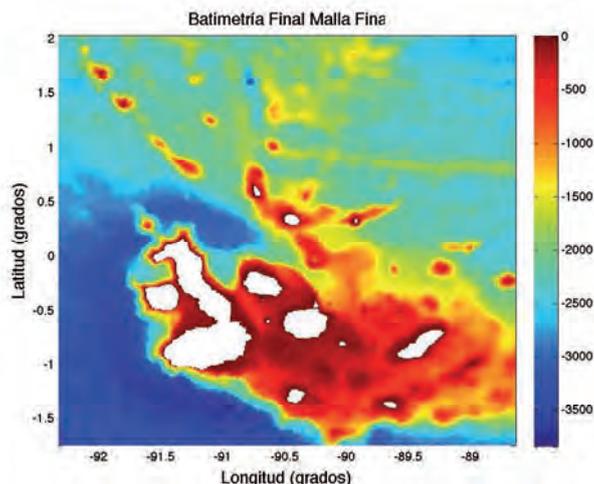


Figura 11: Batimetría Final de la Malla Fina. Algoritmo de Corrección de Uniformidad.

hizo usando la función *medfilt2* de MATLAB. Los resultados fueron satisfactorios y se muestran en la Figura 13.

**Fusión de mallas**

La máscara para el dominio de resolución fina, permitió fusionar la malla fina creada en los alrededores de las islas y la malla gruesa proveniente de ETOPO. El resultado se muestra en la Figura 14.

Un análisis más detallado de la Figura 14 revela ciertas brechas en los límites de fusión de las malla fina y gruesa. Estos vacíos fueron corregidos por la interpolación final sobre la malla generada utilizando el software Bluekenue.

**BlueKenue**

Una vez obtenida una batimetría consistente, la elaboración de la malla computacional se realizó utilizando el software Bluekenue. Este programa fue integrado para crear y adaptar mallas bidimensionales para ser usadas

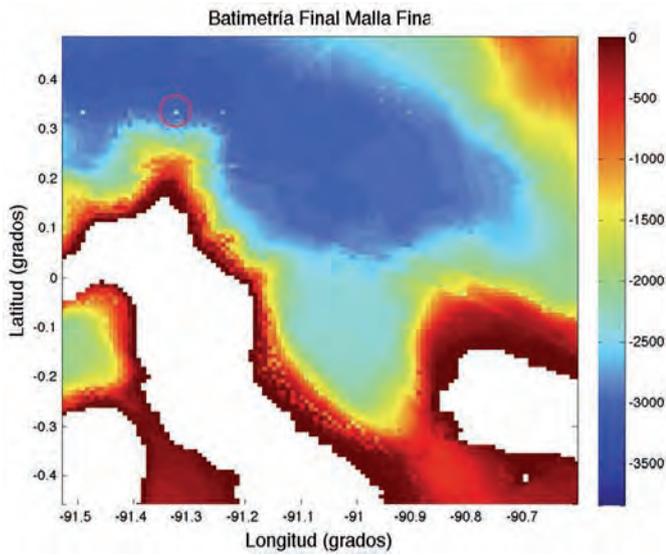


Figura 12: Batimetría Final de la Malla Fina. Algoritmo de Corrección de Uniformidad.

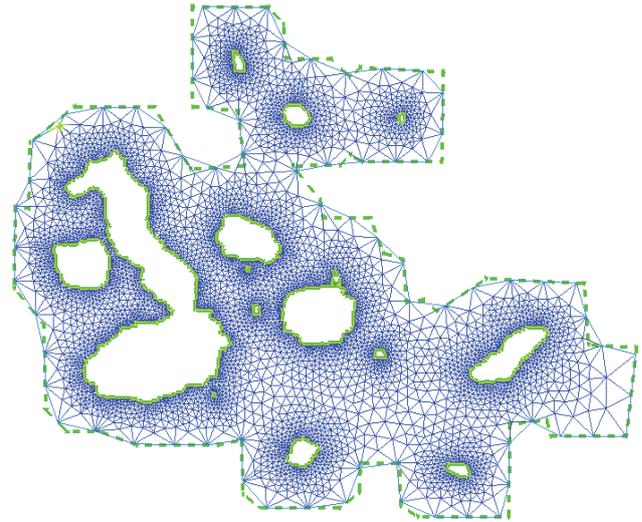


Figura 15: Malla fina desarrollada en BlueKenue.

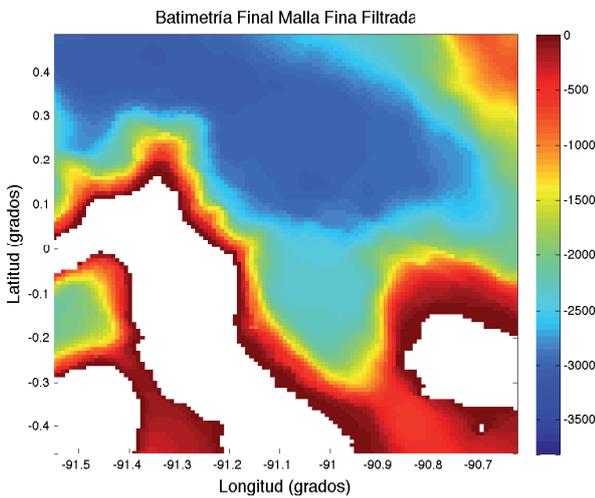


Figura 13: Batimetría Final de la Malla Fina. Algoritmo de Corrección de Uniformidad. Batimetría Filtrada.

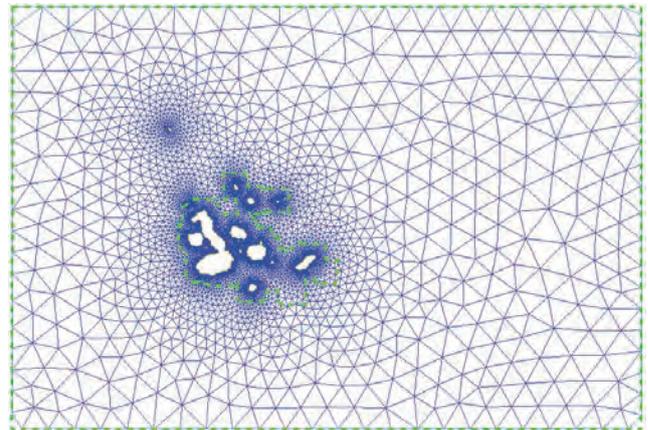


Figura 16: Malla final desarrollada en BlueKenue.

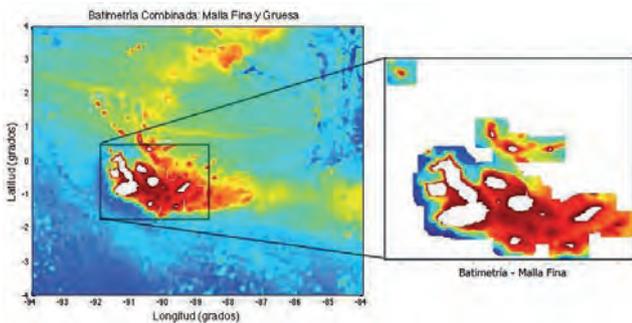


Figura 14: Batimetría Final. Algoritmo de Fusión de Mallas.

en el desarrollo de simulaciones basadas en elementos finitos. Para la creación de la malla se importaron los datos de la batimetría final, los bordes de las islas y la máscara de islas. El proceso comienza con la inicialización de una nueva malla tridimensional *new3TMesh* y la creación de las dos mallas: *Bluekenue: Sub-mesh* y *Principal-Mesh*. Los datos de entrada para la generación de estas mallas son: a) Outline, el borde exterior de la máscara, y b) Hard Lines, el borde exterior de la

cada isla. Para la malla de mayor cobertura se requiere además proporcionar datos del borde de la máscara (Sub-Mesh). El resultado de la malla se muestra en las Figura 15 y 16.

La malla final es de tipo bidimensional. El archivo de exportación, incorpora una variable adicional que permite distinguir los nodos de acuerdo a su ubicación, esto es los límites de las islas o bordes externos de la malla (outline). Esta variable facilita el proceso de interpretación de ésta malla junto con la de batimetría. El algoritmo de interpolación utiliza el comando *griddata* de MATLAB para consolidar ambas mallas. El resultado de la malla de batimetría final se muestra en la Figura 17.

### Implementación preliminar de ADCIRC

La implementación en ADCIRC se realizó de la manera más simplificada posible, sin considerar condiciones de fuerzas externas como la acción del viento, y resolviendo únicamente la ecuación de la continuidad sobre el espacio predeterminado bajo las condiciones iniciales adecuadas. Se asumió una marea de altura de 0,7m en la componente lunar semidiurna *M2* y se fijó únicamente el extremo oeste como abierto al mar. El resultado se muestra en la Figura 18, donde se puede distinguir la de

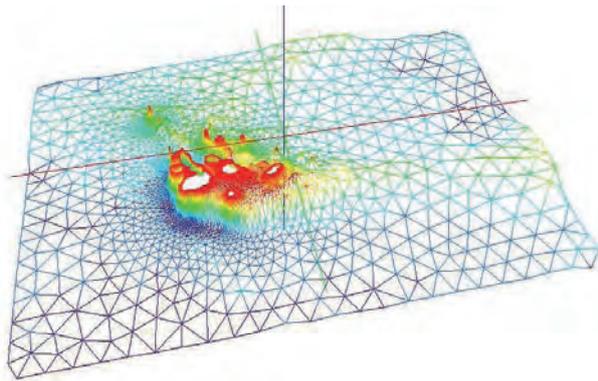


Figura 17: Malla de batimetría interpolada para Bluekenue.

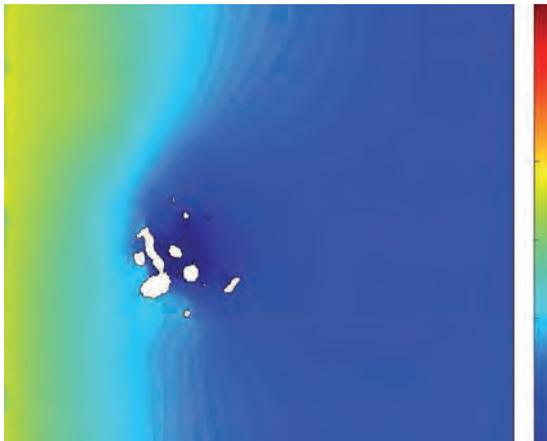


Figura 18: Propagación de una ola en la malla usando ADCIRC.

la propagación en el dominio y la refracción alrededor de las islas.

### Conclusiones

En el presente artículo se describe los pasos preliminares para la implementación del modelo ADCIRC en el Archipiélago de Galápagos. El énfasis del presente trabajo ha sido en la obtención de una batimetría uniforme y consistente, la misma que es fundamental para el cómputo posterior de las mareas y corrientes. Se describen los procedimientos realizados, para los cuales ha sido necesaria la implementación de varios códigos, que fueron escritos en entorno MATLAB. Se describe además el desarrollo de las mallas computacionales utilizando el software Bluekenue, y se presentan los resultados de las corridas preliminares en ADCIRC.

En cuanto al procesamiento de los datos de batimetría, el algoritmo de distancia más corta resultó excelente para la definición única de los bordes de las islas en los casos en que el perfil de las mismas estaba bastante bien definido, a excepción de ciertos puntos discretos. Por otro lado, el algoritmo de mayor ángulo se destacó por permitir definir un único contorno de las islas en casos con diversidad de bordes. Asimismo, el algoritmo de corrección de uniformidad de la malla permitió obtener una distribución más uniforme de los datos y reducir así errores de interpolación durante el proceso. De esta

manera, la malla final generada por la superposición de la malla gruesa y fina mostró suavidad superficial y representó consistentemente el fondo oceánico del archipiélago.

El Modelo implementado en ADCIRC fue ejecutado y una simulación de propagación simple fue desarrollada con la malla del Archipiélago mostrando los resultados esperados. Es posible notar como la ola generada se propaga, llega al borde de las islas y se refracta como se espera. La coherencia de la simulación permite garantizar una adecuada simulación y pronosticar adecuados resultados de futuras simulaciones. En la realidad, no existe ningún borde cerrado por lo que se deberán establecer condiciones de borde de altura y de velocidad en los puntos exteriores de la malla. Asimismo, se deberán incluir factores de simulación adecuados como velocidad de vientos y coeficientes de fricción acordes al dominio y profundizar sobre todas las diversas opciones que ADCIRC ofrece para mejorar los resultados.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a Rick Luettich, Director del Instituto de Ciencias Marinas (University of North Carolina), por la licencia del modelo ADCIRC y por su apoyo desinteresado durante esta implementación. Se agradece el suministro de los datos de batimetría a William Chadwick, y a la base de datos de ETOPO. El presente estudio tiene el soporte de la Universidad San Francisco de Quito, a través de los fondos GAIAS. La colaboración de Margarita Brandt y Luis Vinueza en el presente estudio son altamente apreciados.

### Referencias

- [1] Stewart, R. 2009. "Introduction to Physical Oceanography". *University Press of Florida*. <http://books.google.com.ec/books?id=3dXTRAAACAAJ>.
- [2] Cifuentes, J. 2010. "El océano y sus recursos III. Las ciencias del Mar: oceanografía, física, matemáticas e ingeniería". *Biblioteca Digital ILCE*, 1.
- [3] Luettich, J.; et al. 1999. "Barotropic tidal and wind driven larval transport in the vicinity of a barrier island inlet". *Fisheries Oceanography*, 8(2):190–209.
- [4] Fleming, J. 2008. "A Real Time Storm Surge Forecasting System using ADCIRC". *Estuarine and Coastal Modeling X*, M. L. Spaulding [ed], ASCE: 373–392.
- [5] Mann, K.; Lazier, J. 2005. "Dynamics of marine ecosystems Biological-physical interactions in the oceans". *Wiley-Blackwell*. 3 edition: 512.
- [6] Carter, R. 1990. "Coastal Environments: An Introduction to the Physical, Ecological, and Cultural Systems of Coastlines". *Academic Press*: 617.
- [7] Dietrich, J. 2012. "Surface Trajectories of Oil Transport along the Northern Coastline of the Gulf of Mexico". *Continental Shelf Research*, 41(1):17–47.

- [8] Dietrich, C.; et al. 2011. "Hurricane Gustav (2008) Waves and Storm Surge: Hindcast, Synoptic Analysis, and Validation in Southern Louisiana". *Mon. Wea. Rev.*, 139: 2488-2522.
- [9] Palumbi, S. 2003. "Population genetics, demographic connectivity, and the design of marine reserves". *Ecological Applications*, 13:146–158.
- [10] Nielsen, P. 2009. "Coastal and Estuarine Processes". *World Scientific. Advanced series on ocean engineering*. <http://books.google.com.ec/books?id=eLpyPwAACAAJ>.
- [11] University of North Carolina at Chapel Hill. 2014. "ADCIRC". <http://adcirc.org/>.
- [12] Luettich, R.; et al. 2002. "Considerations in the calculation of vertical velocity in three-dimensional circulation models". *Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(12): 2063–2076.
- [13] Luettich, R.; et al. 2004. "Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC finite element model version 44". *Institute of Marine Sciences UNC*.
- [14] Seahorse Coastal Consulting. 2014. "ADCIRC". <http://seahorsecoastal.com/docs>.
- [15] Davenport, J.; et al. 2010. "Challenges to Marine Ecosystems: Proceedings of the 41st European Marine Biology Symposium". *Springer*: 211.
- [16] Cowen, R.; Sponaugle, S. 2009. "Larval Dispersal and Marine Population Connectivity". *Annual Review of Marine Sciences*, 1:443–466.
- [17] Haase, A.; et al. 2012. "Estuarine circulation and predicted oyster larval dispersal among a network of reserves". *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.
- [18] Luettich, R.; et al. 1992. "ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts and estuaries, report 1: theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL". *Dredging Research Program Technical Report DRP-92-6, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS*: 137.
- [19] Dresback, K.; et al. 2004. "A 2D Implicit Time-Marching Algorithm for Shallow Water Models Based on the Generalized Wave Continuity Equation". *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 45: 253–274.
- [20] ADCIRC. 2014. "ADCIRC home page (online, 2014)".
- [21] Demirbilek, Z.; et al. 2005. "Prediction of Storm-Induced High Water Levels in Chesapeake Bay. Solutions to Coastal Disasters 2005". *Charleston, South Carolina, US Army Engineer Research and Development Center*.
- [22] Amante, C.; Eakins, B. 2009. "ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center". *Biblioteca Digital ILCE*, 1.
- [23] Chadwick, B. 2014. "Galapagos bathymetry". <http://www.pmel.noaa.gov/eoi/staff/chadwick/galapagos.html>.