

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SEPTIEMBRE DE 2012**

**MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DE LOS PATRONES DE CIRCULACIÓN EN ISLA  
GORGONA (COLOMBIA), PARA EL AÑO 2011**

**Juan Guerrero-Gallego<sup>1</sup>, Francisco Mauricio Toro<sup>2</sup>, Andrés Osorio<sup>3</sup>, Oscar Álvarez-Silva<sup>4</sup> y  
Alan Giraldo<sup>5</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4</sup>Grupo de Investigación en Oceanografía e Ingeniería Costera (OCEÁNICOS),  
Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, Medellín

<sup>5</sup>Grupo de Investigación en Ciencias Oceanográficas

Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Biología. Universidad del Valle  
<sup>1</sup>[jjguerre@unal.edu.co](mailto:jjguerre@unal.edu.co); <sup>2</sup>[fmtoro@unal.edu.co](mailto:fmtoro@unal.edu.co); <sup>3</sup>[afosorioar@unal.edu.co](mailto:afosorioar@unal.edu.co); <sup>4</sup>[oaalvare@unal.edu.co](mailto:oaalvare@unal.edu.co);  
<sup>5</sup>[oceanografia@univalle.edu.co](mailto:oceanografia@univalle.edu.co)

## RESUMEN

En la zona del Océano Pacífico Colombiano cercano al Parque Nacional Natural Isla Gorgona se realizó un estudio para comprender de forma detallada la dinámica de las corrientes marinas, con el fin de desarrollar herramientas para la gestión y la conservación de esta zona de gran riqueza natural. Se plantearon diferentes escenarios climáticos y oceanográficos característicos de las dos épocas climáticas intra-anales de la zona, para determinar las características principales de los patrones de circulación en la zona de estudio para el año 2011. Estos escenarios se simularon utilizando el modelo hidrodinámico tridimensional ELCOM (*Estuary, Lake and COastal Model*). Para implementar el modelo y validar los resultados se utilizó información medida en campañas de campo realizadas en el año 2011, durante ambas épocas climáticas. Los resultados muestran que el modelo es capaz de reproducir aproximadamente la estructura termohalina de la zona en las dos épocas, pudiendo obtenerse resultados que pueden servir como noción de las condiciones de circulación para periodos de simulación cortos. Se encontró que los patrones de circulación cerca a la costa están altamente influenciados por variables locales como la batimetría y las condiciones hidroclimáticas presentes en la zona y no solo por procesos de mesoescala.

## ABSTRACT

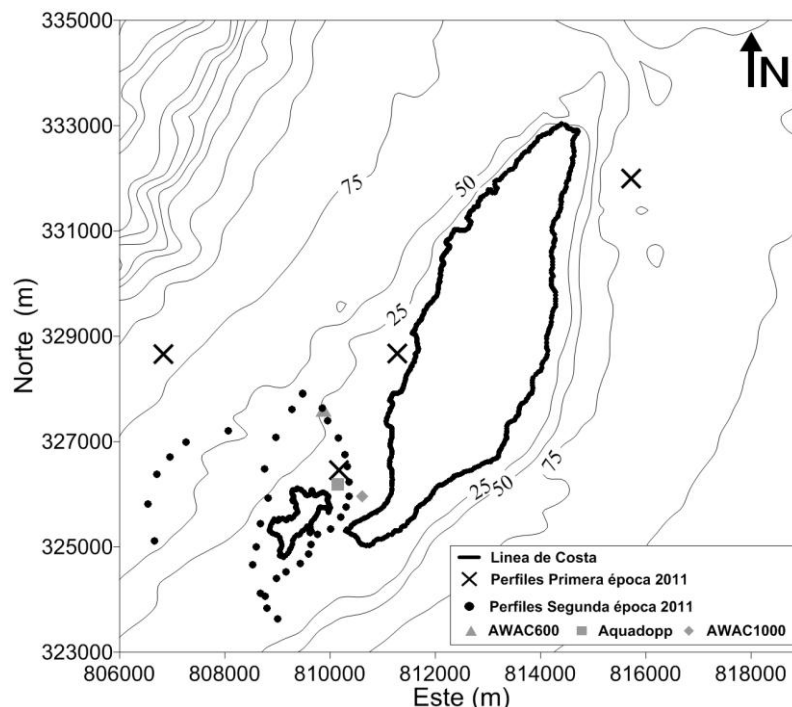
In the Colombian Pacific Ocean, near National Natural Park Isla Gorgona was conducted a study to understand the coastal and marine dynamics, in order to develop tools for the management and preservation of this protected zone, known by its natural diversity. Different climatic and oceanographic scenarios were proposed, which represent each of the two intra-annual climatic seasons, to determine the main features of the circulation patterns in this zone. The tridimensional hydrodynamic model ELCOM (*Estuary, Lake COastal Model*) was used to simulate these scenarios. To implement this model and validate the results field data was used. This data was obtained in two campaigns in the year 2011, during both climate seasons. The results indicate that ELCOM model is able to represent approximately the thermohaline structure found in the zone in both climate seasons, so that a notion about the circulation can be obtained for short simulation periods. It was also found that the circulation patterns near shore are highly influenced by local variables, like the bathymetry and meteorological conditions of the zone, and not just by mesoscale processes.

**PALABRAS CLAVES:** Modelación Hidrodinámica, Circulación tridimensional, Pacífico Colombiano

## INTRODUCCIÓN

La Isla Gorgona está localizada en el Océano Pacífico, en el suroeste colombiano, a aproximadamente 36 km al oeste del continente (Figura 1), es una isla de origen volcánico de 9 km de largo y un ancho máximo de 3 km. Fue declarada Parque Nacional Natural (PNN) en 1984, en conjunto con el islote Gorgonilla y aproximadamente 610 km<sup>2</sup> de las aguas adyacentes

Es importante desarrollar herramientas para la gestión y conservación de esta zona protegida. El valor de Isla Gorgona puede ser definido desde múltiples puntos de vista, desde la gran biodiversidad que se presenta en la isla, debida a su situación geográfica y ser uno de los pocos enclaves rocosos en el Pacífico Sur Colombiano que dan sustrato a múltiples organismos, hasta razones culturales, como la existencia de restos arqueológicos precolombinos. Una herramienta de gran utilidad para conocer la dinámica en cuerpos de agua y comprender las causas y efectos de los procesos naturales y antropogénicos que allí se desarrollan es la simulación hidrodinámica (Stanev & Beckers, 1999). Esta permite plantear multitud de escenarios y extrapolar espacial y temporalmente la información obtenida a partir de mediciones de campo, pudiendo obtener una perspectiva más amplia de los fenómenos estudiados.



**Figura 1.-** Zona de estudio Isla Gorgona e Islote Gorgonilla. Batimetría mostrada en curvas de nivel. Sistema de coordenadas UTM Zona 17N. Se ponen los marcadores de los puntos de medición de salinidad y temperatura para ambas épocas del año y los equipos de medición de mareas y corrientes.

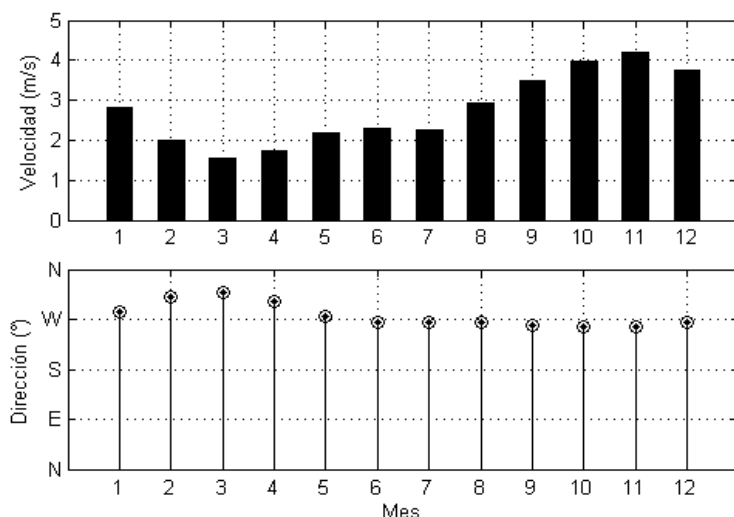
Los estudios de modelación tridimensional de corrientes marinas por efecto de la marea y los forzadores climatológicos que se han desarrollado en Colombia se han enfocado principalmente en el mar Caribe (e.g. Álvarez-Silva et al., 2010 y Montoya y Toro, 2006), mientras que en el Pacífico Colombiano los estudios de circulación se han realizado principalmente a partir de análisis numérico y estadístico de datos (e.g. Devis-Morales et al, 2008 y Rodríguez-Rubio et al, 2003) y con modelos bidimensionales en el caso de los estudios de circulación (e.g. Otero, 2005).

Este estudio pretende aportar al conocimiento actual de las dinámicas de corrientes del Pacífico Colombiano por medio de modelación de los patrones tridimensionales generales de circulación las zonas marítimas circundantes al PNN Gorgona y su evolución debido a la variabilidad de las condiciones hidroclimáticas locales a lo largo del año 2011. Para estudio se caracterizaron los forzadores que se identifican como más relevantes en el desarrollo de las dinámicas, utilizando registros in situ, resultados de estudios anteriores de la zona y modelación hidrodinámica.

## DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En general los forzadores que influyen la circulación en la Zona Ecuatorial son los aportes fluviales, las corrientes oceánicas y las variables meteorológicas (Bubnov, 1990 en DIMAR – CCCP, 2002). En Isla Gorgona el efecto fluvial tiene una importancia relativamente baja en comparación con los otros forzadores, debido a que los cursos de agua presentes son de bajo caudal (pequeñas quebradas), que en comparación con los procesos oceánicos y meteorológicos se consideran despreciables. Cercano a las islas se encuentra el complejo deltaico Patia-Sanquianga, el cual podría tener efectos sobre la circulación de la zona (Giraldo et al, 2008). Sin embargo, dado que la escala a la que se hace este análisis es una escala menor a la mesoescala ( $O(10\text{km})$ ), los efectos del océano y los procesos atmosféricos se consideran dominantes para este caso.

Por su ubicación en la cuenca del Pacífico Este Tropical, particularmente en la Ensenada de Panamá, Isla Gorgona se encuentra influenciada por los distintos fenómenos meteorológicos y oceanográficos, los cuales se dan en diversas escalas de tiempo, (desde estacionales hasta decadales) y de espacio (desde la escala global hasta escalas más pequeñas como la que aquí se trabaja). Estos condicionan la forma en que se configura el patrón de circulación en la zona. A escala intra-anual se tiene la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) como el forzador físico de mayor importancia en la variabilidad climática de Colombia. La ZCIT oscila aproximadamente entre las latitudes  $1^{\circ}\text{N}$  y  $10^{\circ}\text{N}$ . Los lugares en los extremos Norte y Sur de Colombia se ven afectados una sola vez al año por el paso de la ZCIT, lo cual se configura en un comportamiento unimodal de las variables climáticas, diferenciándose solo 2 épocas climáticas intra-anales (Poveda, 2004). Para isla Gorgona se distingue un período lluvioso entre abril y noviembre, seguido de un período de menores precipitaciones entre diciembre y marzo (Blanco 2009). Además de la influencia sobre las variables meteorológicas locales, la ZCIT tiene una influencia directa sobre la circulación en la Ensenada de Panamá, dado que su migración latitudinal genera cambios estacionales el campo de vientos de la zona, lo que controla las propiedades del agua marina y la circulación superficial del mar en esta región. (Wyrтки, 1966, Forsbergh, 1969, Amador et al 2006).



**Figura 2.-** Variación intra-anual de la velocidad y la dirección del viento en Isla Gorgona, la cual está ligada a la oscilación latitudinal de la ZCIT. Datos: NCEP/NCAR

Durante el invierno boreal (diciembre – febrero), cuando la ZCIT está situada al sur, los vientos alisios del noreste son dominantes. Al entrar estos vientos alisios en el Istmo de Panamá, se genera el chorro de viento de Panamá, que entra hasta el Pacífico Oriental Ecuatorial y domina el campo de vientos durante esta época. En el caso del verano boreal (junio - agosto), cuando la ZCIT está situada hacia el norte, los vientos del sureste son los dominantes. Estos vientos alrededor de los  $3^{\circ}\text{N}$  de latitud sufren un recurvamiento, pasando a ser vientos provenientes del suroeste (Poveda y Mesa, 1999; Amador et al, 2006). Estos vientos al llegar al occidente Colombiano, se configuran como un

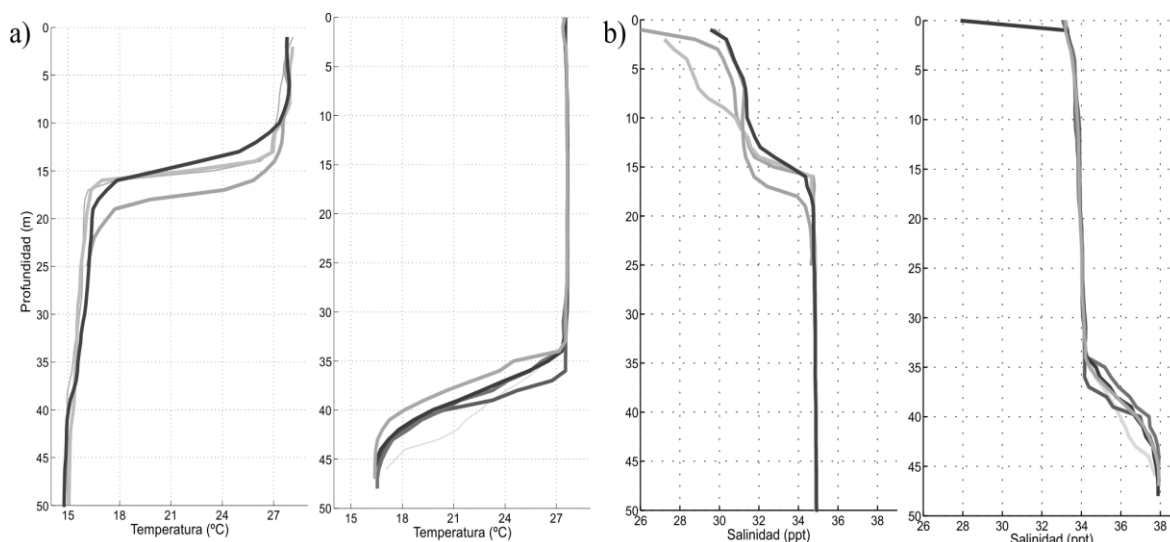
chorro de viento superficial, el Chorro del Chocó, el cual es el forzador dominante para el campo de vientos para esta estación. Estos chorros son los forzadores responsables de la configuración estacional de la estructura termohalina y de los patrones de circulación de la zona de la Ensenada de Panamá (Devis-Morales et al, 2008; Rodriguez-Rubio et al, 2003).

Este forzamiento climático hace que se distingan dos épocas oceanográficas opuestas en la zona de la Ensenada de Panamá. Una primera época, comprendida entre enero y abril, caracterizada por condiciones medias de aguas superficiales frías y con una alta salinidad, con la termoclina y la haloclina primordialmente superficial, y una segunda época, comprendida entre mayo y diciembre, caracterizada por condiciones medias de aguas superficiales calidas y de baja salinidad y con profundidades de la termoclina y haloclina mayores que en el caso de la primera época del año. (Giraldo et al, 2008, Giraldo et al 2010. A pesar de ser una zona de una pluviosidad considerable, presentándose rangos de precipitaciones anuales entre 4000 y 8000 mm (Giraldo et al, 2008), los efectos de la precipitación sobre la circulación y la estructura termohalina se consideran poco relevantes. Adicionalmente, en ambientes someros la marea como forzador físico es responsable de alrededor de un 80% de la variabilidad de la superficie del mar, además de generar dinámicas tales como corrientes (Le Provost, 2001). El efecto de este forzador en isla Gorgona es importante, dado que esta zona está sometida al efecto de mareas semidiurnas y con rangos de variación que pueden sobrepasar los 4m de altura. Debido a la escala considerada, no solo deben tenerse en cuenta los fenómenos de mesoescala que dominan la circulación en la Ensenada de Panamá, sino también los que se dan a escala local en el dominio de estudio.

## **METODOLOGÍA**

Serealizaron dos campañas de campo para caracterizar las variables locales que influyen los patrones de circulación y la estructura termohalina en la zona adyacente a Isla Gorgona. Debido al comportamiento unimodal de la climatología, se escogió un mes para caracterizar cada época del año, en este caso fueron los meses de febrero (para la primera época oceanográfica) y agosto (para la segunda época oceanográfica) de 2011. La importancia de realizar mediciones in situ es se puede ver desde dos perspectivas. Desde la información que da sobre los forzadores del sistema, permitiendo conocer cuales son las características de estos y pensar en los efectos que pueden tener, y desde la perspectiva de la respuesta misma del sistema ante los forzadores, dado que da un panorama de los efectos que tienen los forzadores para el período de medición, lo que sirve como insumo para la calibración y validación del modelo.

Las variables meteorológicas registradas en campo fueron la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad y dirección del viento, las cuales fueron registradas usando una estación meteorológica DAVIS Vantage Pro, instalada en un faro ubicado en el Islote Gorgonilla con el fin de asegurar que los registros (especialmente de magnitud y dirección del viento) no fueran alterados por posibles obstáculos. Las variables oceanográficas medidas en campo fueron la variación del nivel del mar, perfiles verticales de corrientes y de variación de la temperatura y la salinidad en varios puntos en la zona de estudio (Figura 1). Para las mediciones de marea y corrientes se usaron tres sensores: un AWAC1000 (Acoustic Wave And Current Profiler), de Nortek, con una frecuencia acústica de 1 MHz, un AWAC600 de Nortek con frecuencia acústica de 600kHz y finalmente un Aquadopp 3D Current Meter, con una frecuencia acústica de 2MHz. (Figura 1). Los perfiles de salinidad y temperatura fueron medidos en la primera época del año usando un CTD Seabird-19 y en la segunda época del año se usó una sonda multiparamétrica HYDROLAB MS5. (Figura 3). Para la modelación se escogió un perfil de referencia para cada época del año como condición estandar, tanto inicial como de frontera, el cual es el perfil con mayor alcance en la vertical de los perfiles medidos para cada época, para tener mejor caracterización de la estructura termohalina en todos los casos de simulación.



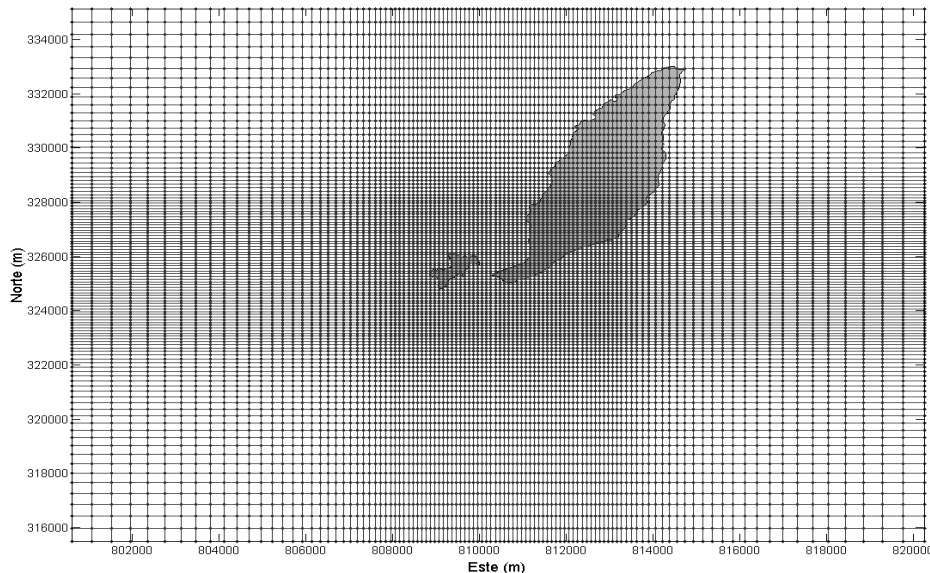
**Figura 3.-** Perfiles de Temperatura y Salinidad medidos para las dos épocas del año. a) Perfiles de Temperatura. Izquierda: primera época, derecha: segunda época. b) Perfiles de Salinidad. Izquierda: primera época, derecha: segunda época

Además de la información obtenida en campo, fue necesario hacer uso de información secundaria debido a que no fue posible medir todas las variables necesarias para la modelación. La información meteorológica faltante (índice de nubosidad para ambas épocas del año y la radiación solar para la segunda época del año), se obtuvo del proyecto de reanálisis climático NCEP/NCAR (Kalnay et al, 1996). Las corrientes geostroficadas de ambas épocas se obtuvieron de mediciones diarias de altimetría satelital realizadas por Ssalto/Duacs y distribuidos por Aviso, con el apoyo del *Centre National d'Etudes Spatiales* (Cnes; <http://www.aviso.oceanobs.com/duacs/>). Estas corrientes son usadas como condiciones iniciales y de frontera para el modelo, dado que estas sirven como una aproximación para las corrientes oceánicas que pueden ser observadas en esta zona. Para la batimetría se usaron datos de las cartas náuticas proporcionadas por la DIMAR (Dirección General Marítima), del Ministerio de Defensa Nacional de Colombia.

Para las actividades de modelación hidrodinámica se utilizó el modelo ELCOM (*Estuary, Lake Coastal Model*) desarrollado por el *Centre of Water Research* (CWR) de la *University of Western Australia*. Este modelo hidrodinámico resuelve las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes para un flujo no permanente, viscoso e incompresible, usando la aproximación hidrostática para la presión y la técnica de descomposición de Reynolds. Para la solución numérica de las ecuaciones usa el esquema semi-implícito de diferencias finitas desarrollado por Casulli y Cheng (1992). Este modelo simula los procesos hidrodinámicos y termodinámicos que se desarrollan en cuerpos de agua estratificados, sometidos a la acción de forzadores ambientales y físicos, dando una representación del comportamiento espacial y temporal de variables como la velocidad, la temperatura y la salinidad en estos cuerpos de agua. (Hodges y Dallimore, 2006). Antes de obtener resultados que permitan estimar las condiciones hidrodinámicas de la zona de estudio, se realizaron análisis de sensibilidad a los parámetros físicos y numéricos del modelo para garantizar que los resultados describan de forma adecuada los procesos hidrodinámicos y termodinámicos que se desarrollan en la zona. Estos análisis se hicieron para determinar el tamaño del dominio de cálculo, el tamaño de las celdas de cálculo en sentido vertical y horizontal y el intervalo de cálculo adecuado para que los resultados obtenidos sean numericamente estables y coherentes y físicamente representativos.

ELCOM es un modelo en diferencias finitas que discretiza el espacio por medio de una malla de celdas rectangulares tanto en sentido horizontal como en sentido vertical. La malla horizontal se orienta con el eje vertical en sentido Norte-Sur con centro en el estrecho de Tasca, el cual separa a Isla Gorgona del islote Gorgonilla (Figura 4). De los análisis de sensibilidad se definió un dominio de 20km x 20km de tamaño, el cual permite evitar problemas en puntos cerca a la isla por la forma

en que se definan las condiciones de frontera. Se seleccionó una malla con tamaño de celda variable, con el objetivo de tener resultados con mayor precisión en las zonas cercanas a isla Gorgona y resultados más gruesos en las zonas distantes donde se tiene menor interés. Hacia el exterior del dominio se tienen celdas de 500m x 500m y varían progresivamente hasta llegar celdas de celdas de 100m x 100m en la zona de detalle cerca a la Isla. El esquema usado para la discretización vertical fue de 44 celdas de espesor variable, con celdas de mayor detalle en las zonas de cambios notorios en los perfiles de temperatura y salinidad medidos en campo (Figura 3) y en profundidades de menor relevancia se usaron celdas de mayor espesor.



**Figura 4.-** Discretización del dominio de Cálculo. Se muestra la variación espacial del tamaño de celda. Sistema de coordenadas UTM, zona 17N

El análisis de sensibilidad se realizó principalmente en función del intervalo de cálculo requerido conservar la estabilidad numérica del modelo y la precisión de los resultados de las simulaciones. Como resultado de estos análisis, se pudo establecer intervalos de simulación de 45s para ambos casos de simulación. Adicionalmente las corrientes, las mareas y la velocidad del viento se le ingresaron al modelo con una modificación, un crecimiento progresivo para los primeros 4 días de simulación (durante el periodo de calentamiento) hasta alcanzar las magnitudes de los datos para el cuarto día. Esto se hizo para garantizar la estabilidad numérica del modelo de forma más rápida.

El modelo se calibró y se validó con información obtenida en las dos campañas de campo realizadas en las dos diferentes épocas climáticas que se presentan en la zona, para garantizar que este representa de forma adecuada los procesos hidrodinámicos que en la realidad se desarrollan en la zona. Para la calibración del modelo se utilizaron los datos obtenidos de las mediciones en campo, realizadas durante la primera época del año. Tras la fase de calibración se procedió a la validación, cual se hace utilizando las mediciones de los forzadores externos y las características del agua realizadas durante la segunda época del año. Para definir el patrón de circulación de la primera época se parte de que las simulaciones definitivas de la calibración son representativas de las condiciones que caracterizan esta época. De igual forma, para definir el patrón de circulación de la segunda época del año se asume que las simulaciones definitivas en la etapa de validación representan las condiciones medias que prevalecen en la zona de estudio en la segunda época.

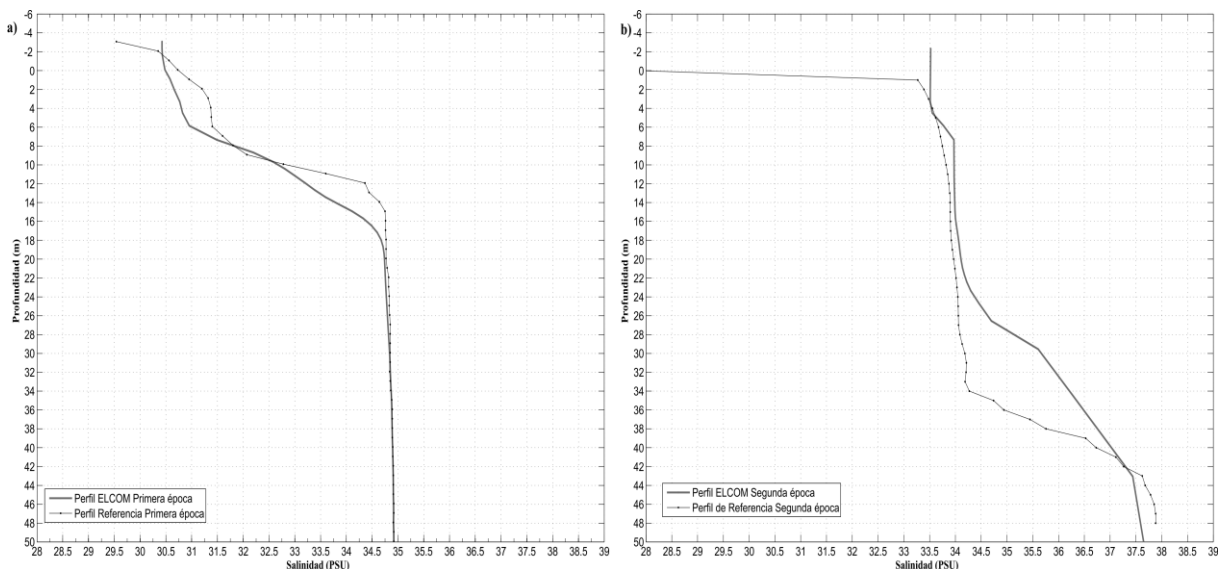
Para calibrar el modelo ELCOM se simuló un período de 23 días, comprendidos entre el 1 y el 23 de febrero de 2011, durante el cual se realizó la campaña de campo para caracterizar la primera época. Durante este período no se tomaron perfiles de temperatura y salinidad, la medición de estas variables se realizó entre el 4 y el 6 de marzo de 2011. Dado que estas fechas corresponden a la misma época climática y oceanográfica, se espera que no haya variación significativa de la estructura termohalina. Durante la calibración se observó gran sensibilidad del modelo a las

condiciones de frontera de salinidad, temperatura y corrientes. Para la etapa de validación se simuló el período de 22 días comprendidos entre el 1 y el 22 de agosto de 2011, durante los cuales se llevó a cabo la campaña de campo para la caracterización de la segunda época.

El modelo ELCOM está diseñado especialmente para zonas estuarinas, lacustres y costeras, por lo que este estudio se puede considerar como una actividad de validación del modelo para escenarios de aguas oceánicas someras. Una limitación importante de este modelo es que las condiciones de frontera de mareas y de corrientes no son compatibles, por lo que solo puede haber una de estas condiciones en cada frontera. Se verificó cual componente de las corrientes es la dominante para cada período de simulación, para determinar en cuales fronteras del dominio de cálculo incluir corrientes y en cuales mareas. Sin embargo a pesar de las restricciones para aplicaciones oceánicas se eligió este modelo por que tiene un esquema numérico bien desarrollado, y formulaciones para la turbulencia y el transporte que representan de forma satisfactoria estas dinámicas, además que el modelo ya se ha usado en varias aplicaciones de carácter costero en el país

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por la diferencias notorias que se dan en las condiciones meteorológicas y oceánicas entre las dos épocas del año, es de esperarse que los patrones de circulación se diferencien igualmente. Para la calibración y validación del modelo, las variables evaluadas fueron la salinidad y la temperatura. En la Figura 5 se puede observar la comparación de perfiles de salinidad para cada época del año medidos contra modelados. Se observa que si bien el modelo tiende a reproducir la tendencia de la estructura halina, siempre hay una diferencia, sobretodo para la segunda época del año. Este comportamiento se puede observar a lo largo de ambos periodos de simulación y tambien para el caso de la temperatura.



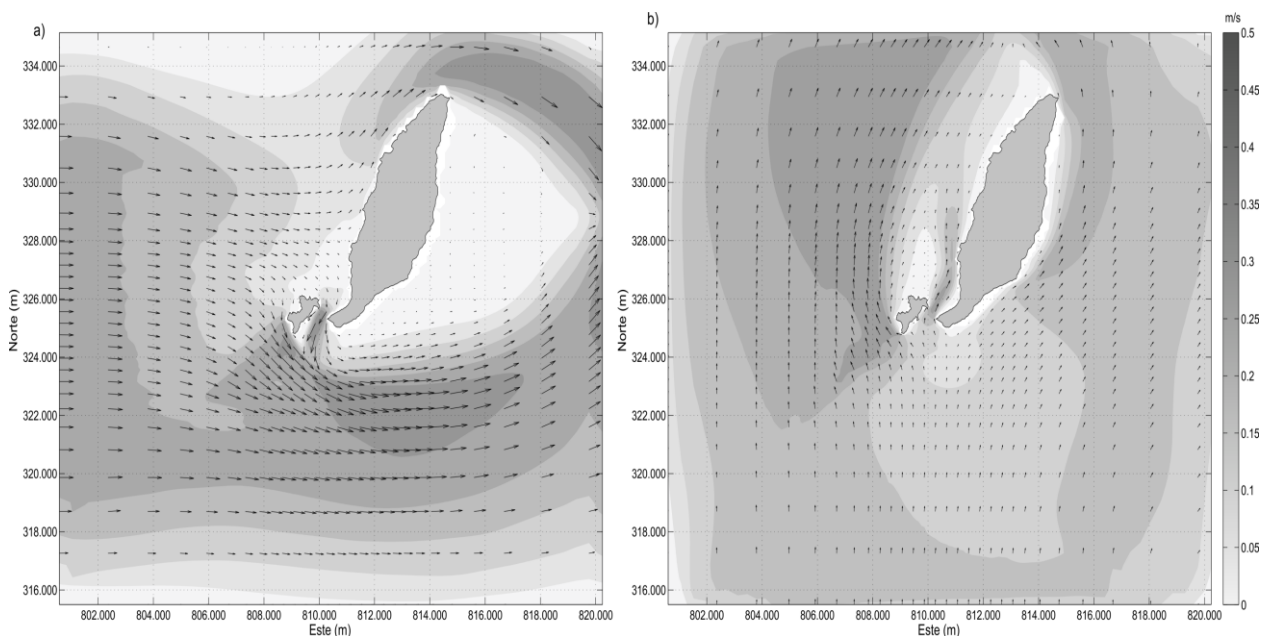
**Figura 5.-** Comparación de un caso representativo de perfiles de salinidad, medido vs. modelado. a). Periodo de calibración. b). Periodo de validación

En la Figura 6a. se observa la situación promedio de la circulación oceánica para los días del periodo de simulación que representa a la primera época. Se observa que para las condiciones medias se da el predominio de las corrientes hacia el Este. Se nota además un efecto muy marcado de la batimetría generando refracción y difracción de las corrientes en aguas someras proximas a Isla Gorgona y el islote Gorgonilla. Este efecto, combinado con el del viento, que es generador de condiciones locales como cambios de dirección localizados, como se puede notar en el estrecho de Tasca. En esta situación media no se observa el efecto que tiene la marea en la circulación, sin embargo este pudo ser observado en los resultados horarios que se obtenidos de la modelación. Este efecto se puede ver como un efecto modulador a lo largo del día de las magnitudes de las corrientes, sobretodo en zonas muy someras, como es el caso del estrecho de Tasca.



En la Figura 6b se puede ver la condición media para la circulación durante el período de simulación correspondiente a la segunda época del año. Se muestra que las corrientes que ingresan por la frontera sur son dominantes durante todo el período de simulación, obteniéndose que las corrientes resultantes por la superposición de efectos de las variables meteorológicas, las mareas, las corrientes oceánicas y los procesos termohalinos tiene una dirección predominante hacia el norte. Se nota también el efecto de la batimetría generando procesos de refracción y difracción de las corrientes en aguas muy someras. Para este caso también se puede observar en los resultados horarios de las modelaciones que la marea también tiene en este caso un papel modulador de las magnitudes de las corrientes, sobretodo en zonas más someras, próximas a Isla Gorgona y al islote Gorgonilla.

A nivel de procesos de mesoescala para el caso de la Ensenada de Panamá, varios autores (e.g. Rodriguez-Rubio et al, 2003 y Devis-Morales et al, 2008) han sugerido que para esta zona la circulación puede cambiar de dirección de acuerdo a la época del año, pasando ser de una circulación ciclónica para la primera época del año (correspondiente al invierno boreal) a ser anticiclónica en la segunda época del año (para los meses correspondientes al verano boreal). Para el caso de la primera época del año se puede observar para la condición promedio (Figura 5a) que las corrientes tienden a girar hacia el norte, sobretodo hacia el sur de isla Gorgona, pudiendo esto indicar coherencia con el patrón de circulación para esta época del año. Sin embargo esto no puede concluirse de forma certera al ser un dominio comparativamente pequeño con el tamaño de la Ensenada de Panamá. Sería necesario revisar el sentido de las corrientes para un dominio más grande para poder concluir que realmente se cumple que el patrón de corrientes para esta época del año 2011 tenga una dirección ciclónica en esta zona particular de la Ensenada de Panamá y que esto no es un efecto de las condiciones de frontera del modelo. Para el caso de la segunda época del año en el caso promedio y al observar los resultados a lo largo del tiempo, la tendencia de las corrientes a fluir hacia el norte podría dar indicios de una dirección de las corrientes en zonas adyacentes a Isla Gorgona de carácter ciclónico, sin embargo, como en el caso de la primera época, no se puede afirmar fehacientemente este hecho sin comparar con un dominio mucho más grande.



**Figura 6.-** Patrones de circulación promedio para las dos épocas del 2011. Sistema de coordenadas UTM, zona 17N. Se muestra la escala de colores para la magnitud de las corrientes para ambos mapas. Se muestra el campo vectorial de las velocidades para ambos casos. a). Primera época del año caracterizada por el mes de febrero b). Segunda época del año caracterizada por el mes de agosto.

Sin embargo revisando las condiciones climáticas y oceanográficas del año 2011, el cual está clasificado como un año con un evento La Niña fuerte, puede darse que por este efecto de el sistema ENSO haya modificaciones para los patrones de circulación con respecto a los normales. Esto se



puede observar en la Figura 3, sobretodo en los perfiles de salinidad, teniendo que para la primera época del año se esperan en la Ensenada de Panamá aguas superficiales frías y de alta salinidad, se nota en comparación con la segunda época del año que las aguas son en promedio menos salinas. Para el caso de la temperatura si se cumplen para este año las condiciones esperadas, aguas superficiales más frías en la primera época que en la segunda época. Estas diferencias en la estructura salina del océano con respecto a las condiciones esperadas, condiciones particulares de los forzadores físicos, como el patrón de vientos, y la escala a la que se está haciendo el estudio, pueden explicar los cambios en los patrones de circulación para el caso del año 2011, sobretodo en el caso de la segunda época del año, dado que pueden darse inestabilidades localizadas que lleven a que el patrón que se tiene a mesoescala mantenga para esta zona. Sin embargo es necesario plantear más escenarios de simulación, tener en cuenta periodos de tiempo más grandes y tener dominios de cálculo mayores para obtener un panorama más completo de las dinámicas que influyen la circulación oceánica alrededor de Isla Gorgona.

## **CONCLUSIONES**

Se planteó un estudio para conocer los patrones generales de circulación en cercanías de Isla Gorgona. Para ello se simularon escenarios característicos de las dos épocas climáticas que se presentan en la zona utilizando el modelo hidrodinámico tridimensional. ELCOM. Para alimentar los modelos se utilizó información obtenida en dos campañas de campo, desarrolladas en los meses de febrero y agosto del 2011. El modelo es capaz de reproducir aproximadamente la estructura termohalina presente en la zona adyacente a Isla Gorgona, por lo que los resultados con este modelo pueden servir de noción de las condiciones de corrientes para periodos cortos de tiempo, pero para análisis más detallados si se requerirá el uso de modelos netamente oceánicos.

Se encontró que los patrones de circulación para la primera época de 2011 tienen un comportamiento que apunta a una circulación en sentido ciclónico, con una dirección hacia el continente, pudiendo ser parte de la corriente Colombia, que fluye paralela a la costa. Sin embargo se observa que la batimetría y los forzadores locales tienen efecto en la forma del patrón de circulación, presentándose diferencias en la zona cercana a isla Gorgona. Para el caso de la segunda época de 2011, se encontraron patrones de circulación cuya tendencia aparenta no seguir la tendencia de mesoescala para la circulación en la zona de la Ensenada de Panamá reportada por autores tales como Rodríguez-Rubio et al (2003) y Devis-Morales et al (2008), dado que las corrientes tienen dirección predominante hacia el norte, lo que puede apuntar a una circulación de carácter ciclónico. Estos resultados pueden debidos a las condiciones particulares del año 2011, como el caso que fuese un año con un evento La Niña fuerte.

Si bien el modelo ELCOM en este escenario describió aproximadamente la física de la zona, se requieren más simulaciones en diferentes zonas para validar el uso de este modelo en aplicaciones en océano abierto. También es importante desarrollar más estudios de este en escalas locales, utilizando modelos hidrodinámicos tridimensionales que permitan una mejor caracterización de las zonas costeras del Pacífico Colombiano.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores desean agradecer al Fondo para la Acción Ambiental y la Niñez y a Conservación Internacional por la financiación para este proyecto. Se agradece al *Centre for Water Research* de la *University of Western Australia* por facilitar el uso del modelo ELCOM. Igualmente se agradece a los profesores Andrea Devis Morales y Andrés Gómez Giraldo de la Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín por sus valiosos aportes. Finalmente a los funcionarios del PNN Isla Gorgona por su apoyo en las labores de adquisición de datos en las campañas de campo llevadas a cabo para este proyecto.

## REFERENCIAS

- Álvarez-Silva, O., Gómez-Giraldo, A & Toro F.M.** (2010). “Calibración y Validación de un Modelo Hidrodinámico de la Desembocadura del Río León en el Golfo de Urabá, Colombia.” *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Punta del Este, Uruguay.
- Amador, J. A., E. J. Alfaro, O. G. Lizano, & V. O. Magaña** (2006). “Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review”, *Progress in Oceanography*, Vol. 69, pp. 101–142.
- Blanco, J. F.** (2009). “The hydroclimatology of Gorgona Island: seasonal and ENSO-related patterns”. *Actualidades Biológicas*, N°31 pp. 111-121.
- Casulli, V. & Cheng, R. T.** (1992). “Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow”. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. Vol. 15, pp 629-648.
- Devis-Morales, A., W. Schneider, R. A. Montoya-Sánchez, & E. Rodríguez-Rubio** (2008). “Monsoon-like winds reverse oceanic circulation in the Panama Bight”, *Geophysical Research Letters*. Vol 35, L20607
- DIMAR - CCCP.** (2002). *Compilación Oceanográfica de la Cuenca Pacífica Colombiana*.
- Forsbergh, E.D.** (1969). “On the climatology, oceanography and fisheries of the Panama Bight”. *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin*, 14(2): 1-385.
- Giraldo, A., Rodríguez-Rubio, E. & Zapata, F.,** (2008). “Condiciones oceanográficas en isla Gorgona, Pacífico oriental tropical de Colombia”. *Latin American Journal of Aquatic Research*. Vol. 36, pp. 121-128.
- Giraldo, A., Payán, L. & Chirimia, H.** (2010). “Variabilidad Térmica en el Ambiente Pelágico de Isla Gorgona entre Marzo 2009 - Febrero 2010”. *INVEMAR, XIV Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar*, Libro de Resúmenes Extendidos (págs. 75-80).
- Hodges, B. & C. Dallimore** (2006). *Estuary, Lake and Coastal ocean model: ELCOM, science manual*. Centre of Water Research: Univ. of Western Australia.
- Kalnay E et al.** (1996). “The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project”. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77: 3437–3471.
- Le Provost, C.** (2001). “Ocean Tides”. *International Geophysics*. Vol. 69, pp. 267-303). Academic Press.
- Montoya L.J. & Toro F.M.** (2006). “Calibración de un modelo hidrodinámico para el estudio de los patrones de circulación en el Golfo de Urabá”. *Revista Avances en Recursos Hidráulicos*. N. 13, pp. 37 – 54
- Otero, L.J.** (2005). “Aplicación de Modelo Bidimensional para describir las corrientes y la propagación de la onda de marea en la Bahía de Buenaventura”. *Boletín Científico CCCP*, No. 12 pp.9-21.
- Poveda, G y O.J. Mesa** (1999). “La corriente del Oeste (“Chocó”) y otras dos corrientes de chorro en Colombia: Climatología y variabilidad durante las fases del ENSO.” *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas*. 23(89): 517-529
- Poveda, G.** (2004). “La Hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria”. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas* (28) 107
- Rodríguez-Rubio, E., W. Schneider R. Abarca del Río,** (2003). “On the seasonal circulation within the Panama Bight derived from satellite observations of wind, altimetry and sea surface temperature.” *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, no. 7, pp. 1410.
- Stanev, E. V., & Beckers, J. M.** (1999). “Barotropic and baroclinic oscillations in strongly stratified ocean basins. Numerical study of the Black Sea”. *Journal of Marine Systems*, pp. 65-112.
- Wyrtki, K.** (1966). “Oceanography of the eastern equatorial Pacific Ocean *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 4, pp. 33– 68.