

# Simulación de la Hidrodinámica Marina en la Región de Cartagena con Aplicaciones al Transporte de Sedimentos

Diego Alejandro Uribe Suárez

Grupo de Mecánica Aplicada  
Departamento de Ingeniería Civil  
Escuela de Ingeniería  
Universidad EAFIT  
Medellín, Colombia  
2015

Simulación de la Hidrodinámica Marina en la Región de  
Cartagena con Aplicaciones al Transporte de Sedimentos

Diego Alejandro Uribe Suárez

*Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título  
de MSc en Ingeniería*

Asesor

Carlos Alejandro Escobar Sierra, PhD

Profesor Titular

Departamento de Ingeniería Civil

Grupo de Mecánica Aplicada

Departamento de Ingeniería Civil

Escuela de Ingeniería

Universidad EAFIT

Medellín, Colombia

2015

Nota de Aceptación

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

---

---

Ciudad y Fecha

# Agradecimientos

Quiero agradecer a Dios por haberme brindado la oportunidad de cursar esta maestría. A mis padres Jorge Uribe y Yolanda Suárez, quienes siempre han estado ahí, con su aliento para mí. A mi compañero de maestría David Ruiz, por su gran apoyo durante la realización de este proyecto. A Maria Teresa por todo su amor, compañía y comprensión.

Deseo agradecer a Juan David Pineda Cardenas y demás miembros del centro de Computación Científica APOLO. Quiero agradecer muy especialmente a mis amigos estudiantes de doctorado José David Garcés y Juan Camilo Múnera, así como al profesor Manuel Julio Garcia por su valiosa ayuda en la revisión de este escrito.

Ofrezco mi más sinceros agradecimientos al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación Colciencias, al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), a la Dirección General Marítima (DIMAR), a la Universidad del Norte y a la Universidad EAFIT por la financiación del proyecto “Erosión Costera en la Región de Cartagena (Galerazamba-Bocachica), Costa Caribe Colombiana, Módulo Oceanografía”, proyecto de investigación dentro del cual se encuentra inmersa esta tesis de maestría.

Por último, y no por ello menos importante, gracias a mis amigos: Pineda, Marlon, David, Gómaz, Mario; quienes me han apoyado durante todo el desarrollo de mi vida personal, académica y profesional.

# Resumen

Se realizaron simulaciones numéricas de la dinámica marina en la región de Cartagena entre los sectores conocidos como Galerazamba (Norte) y Bocachica (Sur) aplicadas al estudio del transporte de sedimentos. El fenómeno de la erosión costera afecta negativamente el desarrollo de esta región tanto a nivel económico como social, debido a problemáticas relacionadas con la pérdida de tierras de importante utilidad para actividades de turismo y habitación humana, así como el deterioro de diferentes infraestructuras físicas. Sin embargo, no se cuenta con muchos estudios realizados en esta zona que permitan un total entendimiento del fenómeno, y existe poca información y pocas estaciones de monitoreo de la dinámica marina de la zona (generador principal del transporte de sedimentos). Lo anterior motivó la realización de simulaciones numéricas de la dinámica marina aplicadas al estudio del transporte de sedimentos. Las simulaciones se realizaron en la plataforma Delft3D desarrollada por WL|Delft Hydraulics, en la que se acoplan simultáneamente la hidrodinámica, el oleaje y el transporte de sedimentos. Las simulaciones realizadas consideran además forzamientos externos debidos a la marea, el oleaje y la atmósfera, para los cuales se realizó un análisis detallado de distintas fuentes de información batimétrica, topográfica y meteorológica disponibles, determinando la precisión de cada una de éstas para diferentes zonas y épocas climáticas.

El desempeño de las simulaciones se evaluó al confrontar el ajuste entre el oleaje direccional y las corrientes modeladas y medidas en las dos épocas climáticas características de la región (seca y lluviosa). En ambas campañas de medición se combinaron estaciones de medición fijas y móviles, permitiendo así ampliar la resolución temporal y espacial de las observaciones. Los parámetros estadísticos utilizados en la evaluación de las simulaciones indicaron que éstas lograron una representación entre razonable y buena de la dinámica marina en la región de Cartagena.

Una vez verificado el buen desempeño de las simulaciones, se procedió en primera

instancia a determinar el patrón característico de las corrientes y del oleaje en cada una de las épocas climáticas de la región, encontrándose que para ambas temporadas las corrientes en la mayoría del dominio se dirigen hacia el sur, y el oleaje viene predominantemente del noreste (NE). Se encontró que los cambios en la magnitud de las corrientes de una temporada a otra fueron mínimos con una velocidad media de las corrientes de  $0.12 \text{ m/s}$  en temporada húmeda, y una época seca que se caracterizó por presentar regímenes de oleaje de mayor intensidad con una altura de ola media de  $0.83 \text{ m}$ .

Posteriormente se realizó el acoplamiento entre las simulaciones numéricas realizadas y el módulo de transporte de sedimentos presente en Delft3D. Para la implementación de este módulo se utilizó la información recolectada en la campaña de medición llevada a cabo en Octubre de 2013, se compararon concentraciones de sedimentos en suspensión medidas y modeladas, donde se encontró que la simulación construida logró reproducirlas de forma acertada en la mayoría de la región. Luego de determinar un aceptable comportamiento de las simulaciones, se realizaron balances de sedimentos a lo largo de la línea de costa a partir de los datos modelados, con el fin de determinar zonas de erosión y sedimentación para las épocas climáticas seca y húmeda, así como para el caso de un evento extremo. Los resultados mostraron que las simulaciones lograron reproducir, para una escala temporal de días, tendencias erosivas al norte del corregimiento de Galerazamba, en los alrededores de Bocacanoas, en el norte de Punta Canoas, Bocagrande y sectores del norte de Tierrabomba, mientras que la acumulación de sedimentos se presentó en los alrededores de la parte sur de Lomarena, sur de Punta Canoas y el Laguito, lo cual concuerda con lo reportado en la literatura, corroborando que las simulaciones llevadas a cabo representan una alternativa de gran utilidad para el estudio del transporte de sedimentos en la región de Cartagena.

# Abstract

Numerical simulations of the marine dynamics was developed in the region of Cartagena between the sectors known as Galerazamba (North) and Bocachica (South) applied to the study of sediment transport. The phenomena of coastal erosion negatively affects the development of the region both economically and socially, due to the damage of coastal infrastructure and the loss of important utility land to tourism and habitational purposes, however the lack of studies difficult the development of solutions. This motivated the development of a model for the marine dynamic applied to study sediment transport, simulations were performed on the platform Delft3D developed by WL|Delft Hydraulics, the platform simultaneously couples the hydrodynamics, wave and sediment transport processes and considers external forcings due to tides, surf and atmosphere conditions. In the first part a detailed analysis of different data sources for bathymetry, topography and meteorology which are essential for the construction of the model was made. The available information accuracy was determined for different climatic zones and times (Meteorological data).

The simulation's performance was evaluated by the confrontation of the fitting between measured and modeled data of directional surf and currents on the two characteristics seasons of the region (dry and rainy seasons). The measured data included fixed and mobile stations in order to extend the temporal and spacial resolution. For the evaluation were used statistical parameters, that according to the literature indicate a representation between reasonable and good of the marine dynamics in the region of Cartagena. Once verified the good performance of the simulations, the characteristic patterns of currents and waves were determined for each of the climatic seasons. It was found that in both climatic seasons the currents flow south, and the waves are predominantly from northeastern (NE), also the data showed that changes in the magnitude of currents from one season to another were minimal with a main speed of  $0.12\text{ m/s}$  in rainy season and that the dry season presents more intense wave regimes with a main

wave height of 0.83 *m*.

In the next stage the coupling between the hydrodynamics and sediment transport models was implemented. For this purpose the information collected in a measurement campaign performed in October 2013 was used. Measured and modeled data of suspended sediment concentrations were compared, the results showed a correct representation of the sediment transport in the region. After determining an acceptable behavior of the simulations, sediment balances along the coastline were conducted from the modeled data, in order to determine areas of erosion and sedimentation during the dry and rainy seasons and for the case of an extreme event. The results showed that the simulations were able to reproduce in a time scale of days erosive trends in the north of Galerazamba, around of Bocacanoas, north of Punta Canoas, Bocagrande and northern sectors of Tierrabomba, while the accumulation of sediments occurred around the southern part of Lomarena, south of Punta Canoas and El Laguito, which is consistent with that reported in the literature, confirming that the simulations represents an useful alternative for the study of sediments transport in the Cartagena region.

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>4</b>
<b>Resumen</b>	<b>5</b>
<b>Abstract</b>	<b>7</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>16</b>
1.1. Planteamiento del Problema . . . . .	17
1.2. Objetivos . . . . .	20
1.3. Descripción Área de Estudio . . . . .	20
<b>2. Materiales y Datos</b>	<b>23</b>
2.1. Campañas de Mediciones . . . . .	23
2.2. Morfología . . . . .	24
2.3. Información Oceanográfica . . . . .	26
2.4. Información de Sedimentos . . . . .	26
2.5. Meteorología . . . . .	27
<b>3. Marco Teórico</b>	<b>44</b>
3.1. Modelo Matemático . . . . .	44
3.2. Descripción del Modelo Numérico . . . . .	47
3.3. Análisis de Sensibilidad . . . . .	55
<b>4. Desempeño y Evaluación de las Simulaciones Numéricas</b>	<b>69</b>
4.1. Calibración . . . . .	72
4.2. Validación . . . . .	77

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	10
<b>5. Aplicaciones</b>	<b>83</b>
5.1. Concentración de Sedimentos en Suspensión . . . . .	84
5.2. Zonas de Erosión y Acreción a lo largo de la línea costera . . . . .	86
<b>6. Conclusiones</b>	<b>90</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>94</b>

# Índice de figuras

1.1. Localización sectores de acreción y sedimentación identificados por Molina et al. (1996) y Correa (1990) (Elaboración propia). . . . .	18
1.2. A: Erosión costera en Tierrabomba (Modificada de Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias, 2012). B: Retrocesos de las playas en el sector de la Boquilla (Tomada de Posada y Henao (2008)) . . . . .	19
1.3. Ubicación Región de Estudio (Elaboración propia) . . . . .	22
2.1. Batimetría 3D de la Región de Cartagena . . . . .	25
2.2. Aeropuertos y boyas meteorológicas seleccionadas para análisis de modelos meteorológicos. En Colaboración con Ruiz Sarrazola (2015) . . . .	29
2.3. Trayectoria de huracanes por el Caribe seleccionados para realizar el análisis de desempeño de los modelos meteorológicos. En Colaboración con Ruiz Sarrazola (2015) . . . . .	31
2.4. Velocidad del viento en la Boya 42056 para la temporada seca del año 2010. En Colaboración con Ruiz Sarrazola (2015) . . . . .	33
2.5. Diagrama de Taylor para la velocidad del viento en la temporada seca Boya 42056. En Colaboración con Ruiz Sarrazola (2015) . . . . .	34
2.6. Diagrama de Taylor para la dirección del viento años 2010-2011 en la Boya 42056. En Colaboración con Ruiz Sarrazola (2015) . . . . .	34
2.7. Presión atmosférica en la Boya 42057 para la temporada seca del año 2011. En Colaboración con Ruiz Sarrazola (2015) . . . . .	35
2.8. Diagrama de Taylor para la presión atmosférica en la temporada seca Boya 42057. En Colaboración con Ruiz Sarrazola (2015) . . . . .	36
2.9. Gráfica de la velocidad del viento en la temporada lluviosa del año 2010 en el aeropuerto de Cartagena . . . . .	37

2.10. Diagrama de Taylor para la velocidad del viento en la temporada lluviosa del año 2010 en el aeropuerto de Cartagena. En colaboración con Ruiz Sarrazola (2015) . . . . .	38
2.11. Diagrama de Taylor para la dirección del viento en la temporada lluviosa del año 2010 en el aeropuerto de Cartagena. En colaboración con Ruiz Sarrazola (2015) . . . . .	38
2.12. Presión atmosférica en el aeropuerto de Cartagena para la temporada lluviosa . . . . .	39
2.13. Diagrama de Taylor para la presión atmosférica en el aeropuerto de Cartagena para la temporada lluviosa (N = NCAR, R = NARR, E = ERA)	40
2.14. Velocidad del viento durante el paso del huracán Paula. En colaboración con Ruiz Sarrazola (2015) . . . . .	41
2.15. Diagrama de Taylor para la velocidad del viento en las boyas 42056 y 42059 . . . . .	42
2.16. Resumen desempeño CCMP en la reproducción de la velocidad del viento	43
3.1. Malla de cálculo . . . . .	48
3.2. Segmentos iniciales escogidos para análisis de marea y Discrepancias de Niveles de Mar. . . . .	50
3.3. Puntos Seleccionados para Cálculos de Marea . . . . .	50
3.4. Nueva Distribución Tipo de Frontera . . . . .	51
3.5. Malla Modelo Cartagena anidada en Malla Modelo Caribe . . . . .	53
3.6. Segmentos iniciales escogidos para análisis de oleaje y Discrepancias Hs del Oleaje en la Temporada Lluviosa . . . . .	54
3.7. Puntos Seleccionados para Cálculos de Oleaje . . . . .	54
3.8. Variación espacial del efecto del intervalo de cálculo en el nivel de mar .	57
3.9. Variación espacial del efecto del intervalo de cálculo en la velocidad promediada . . . . .	58
3.10. Variación espacial del efecto del intervalo temporal de cálculo hidrodinámico en la altura significativa del oleaje . . . . .	59
3.11. Variación espacial del efecto del intervalo temporal de cálculo de oleaje en el nivel de marea y en la velocidad promediada . . . . .	61
3.12. Variación espacial del efecto del intervalo temporal de cálculo de oleaje en la altura significativa del oleaje . . . . .	62

3.13. Variación espacial del efecto de la no inclusión del oleaje en el nivel de mar y en la velocidad promediada . . . . .	65
3.14. Variación espacial del efecto de la simulación en 3D . . . . .	67
4.1. Ubicación Fuentes de Información Para Calibración y Validación . . . . .	70
4.2. Ubicación Transectos Corrientes Calibración y Validación . . . . .	71
4.3. Rosa de Dirección Corrientes Galerazamba . . . . .	75
4.4. Rosa de Dirección Corrientes Punta Canoas . . . . .	76
4.5. Rosa de Dirección Oleaje Galerazamba . . . . .	77
4.6. Rosa de Dirección Corrientes Galerazamba . . . . .	78
4.7. Rosa de Dirección Corrientes Punta Canoas . . . . .	79
4.8. Rosa de Dirección Transectos de Corrientes . . . . .	79
4.9. Nivel de mar medido y simulado (Punta Canoas) . . . . .	80
4.10. Rosa de Dirección Oleaje Galerazamba . . . . .	81
4.11. Rosa de Dirección Oleaje Punta Canoas . . . . .	82
5.1. Estaciones de Muestreo Concentración de Sedimentos en suspensión año 2013 . . . . .	84
5.2. Variación Espacial del Error Relativo (RMAE) . . . . .	85
5.3. Secciones para el cálculo de balance de sedimento . . . . .	87
5.4. Zonas de erosión y sedimentación de acuerdo a condiciones climáticas . . . . .	89

# Índice de tablas

2.1. Desempeño de algunos modelos de reanálisis reportado en la literatura	28
2.2. Huracanes Seleccionados . . . . .	30
3.1. Valores de los parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad . . . .	55
3.2. Intervalo temporal de cálculo hidrodinámico y su efecto en la modelación numérica (Nivel de mar) . . . . .	60
3.3. Intervalo temporal de cálculo hidrodinámico y su efecto en la modelación numérica (Velocidad promediada) . . . . .	60
3.4. Intervalo temporal de cálculo hidrodinámico y su efecto en la modelación numérica (Altura significativa) . . . . .	60
3.5. Intervalo temporal de cálculo de oleaje y su efecto en la modelación numérica (Nivel de mar) . . . . .	62
3.6. Intervalo temporal de cálculo de oleaje y su efecto en la modelación numérica (Velocidad promediada) . . . . .	63
3.7. Intervalo temporal de cálculo de oleaje y su efecto en la modelación numérica (Altura significativa) . . . . .	63
3.8. Número de Celdas y su efecto en la modelación numérica (Nivel de Mar)	63
3.9. Número de Celdas y su efecto en la modelación numérica (Velocidad Promediada) . . . . .	64
3.10. Número de Celdas y su efecto en la modelación numérica (Altura significativa) . . . . .	64
3.11. Efecto de la inclusión y no inclusión del oleaje en la modelación numérica	66
3.12. Efecto de realizar la simulación 3D y 2D . . . . .	67
3.13. Parámetros Numéricos Modelo de Cartagena . . . . .	68
4.1. Forzamientos Atmosféricos sometidos a variación durante la calibración	72
4.2. Forzamientos de oleaje sometidos a variación durante la calibración . .	72

4.3. Procesos del oleaje sometidos a variación durante la calibración . . . .	73
4.4. Parámetros numéricos sometidos a variación durante la calibración . . .	73
4.5. Parámetros numéricos y procesos calibrados . . . . .	74
4.6. Errores Corrientes Puntuales . . . . .	74
4.7. Errores Transectos de Corrientes . . . . .	75
4.8. Errores Oleaje . . . . .	76
4.9. Errores Corrientes Puntuales Validación . . . . .	78
4.10. Errores Transectos de Corrientes Validación . . . . .	78
4.11. Errores de Marea Puntuales Validación . . . . .	80
4.12. Errores Oleaje Validación . . . . .	81
5.1. Tamaño y parámetros característicos asumidos para los sedimentos pre- sentes en Cartagena . . . . .	83

# Capítulo 1

## Introducción

La Región de Cartagena comprendida entre Galerazamba y Bocachica está situada al norte del departamento de Bolívar, en el Caribe Colombiano. Es una región de gran importancia no sólo para el departamento sino también para el país, ya que participa activamente de las industrias turística, pesquera y minera; esta última reflejada en las salinas ubicadas en el corregimiento de Galerazamba. Esta franja litoral goza de una posición geográfica estratégica, promoviendo así el comercio exterior a través del Mar Caribe (Aguilera Díaz et al., 2013).

Como otras regiones del país no está exenta de la presencia de problemáticas de índole social y económicas, como cambios en el uso de las tierras y el establecimiento de comunidades humanas en territorios de poca altura sobre el nivel del mar. Una de las problemáticas más serias que aqueja dicha región es la relacionada con la pérdida de territorios costeros a lo largo del litoral Caribe, aunque es un problema de considerable importancia no se cuenta con un número grande de proyectos o investigaciones que busquen mitigarlo a través de su entendimiento y control.

Entre los estudios ejecutados cabe resaltar en primera instancia el realizado por Correa (1990), en donde haciendo uso de materiales cartográficos y aerofotográficos, se determinaron los cambios de posición y configuración de la línea de costa entre Los Morros y Galerazamba. También cabe mencionar el trabajo llevado a cabo por Molina et al. (1996) en el cual se presentan los resultados obtenidos del estudio de oceanografía costera realizado por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), este estudio fue realizado mediante el monitoreo de condiciones oceanográficas y el uso de imágenes satelitales, y determinó la circulación de aguas superficiales, la dinámica del oleaje así como su incidencia y efectos en la morfología costera entre

Galerazamba y Cartagena. Otro de los estudios que se tiene sobre erosión costera fue el presentado por Posada y Henao (2008), donde se recoge información cuya finalidad es orientar la toma de decisiones relacionadas con el manejo, la prevención y la mitigación de los fenómenos erosivos en el litoral Caribe Colombiano.

El estudio que será descrito a continuación presenta la realización de simulaciones numéricas de hidrodinámica marina aplicadas al transporte de sedimentos llevadas a cabo en la plataforma Delft3D, utilizando como información de entrada datos batimétricos, topográficos y meteorológicos de la región de Cartagena. La realización de simulaciones numéricas permite una mayor cobertura en espacio y tiempo de los citados fenómenos que la ofrecida por otras metodologías ya mencionadas, además ayudan a superar el problema generado por la falta de estaciones de monitoreo de la hidrodinámica (Generador principal del transporte de sedimentos) en la región. El presente estudio está enmarcado en el proyecto cofinanciado entre Colciencias, la Universidad EAFIT y los Centros de Investigaciones Oceanográficas de la Dirección General Marítima, bajo el nombre “Erosión Costera en la Región de Cartagena (Galerazamba-Bocachica), Costa Caribe Colombiana, Módulo Oceanografía”. Proyecto en cuya primera fase de trabajos de campo se obtuvieron conjuntos de series de tiempo continuas de corrientes, oleaje, niveles de mar e información de sedimentos que serán utilizados para la calibración y validación del modelo numérico que aquí es descrito.

## 1.1. Planteamiento del Problema

La erosión costera en Colombia no es un proceso que tenga sus orígenes en los tiempos modernos. Por el contrario siempre ha estado presente, y a partir de los años 1970-1980 ha presentado una aceleración en su acontecer a la par del aumento de las ciudades ubicadas tanto en las zonas costeras como en el interior del país. La erosión costera es causante de diversos problemas en las zonas que la padecen, por ejemplo, es la responsable de la pérdida de kilómetros cuadrados de terreno de gran utilidad para actividades de turismo y habitación humana; también cuando a causa de ella se presenta sedimentación en sectores dedicados a la acuicultura, se obstaculiza el intercambio y la renovación de las aguas, afectando así estas industrias (Rangel Buitrago et al., 2012).

De acuerdo con los estudios realizados por Molina et al. (1996), la línea de costa comprendida entre Galerazamba y Punta Canoas ubicada al norte de la región de estudio, presenta acumulación de sedimentos, mientras en el sur, la franja costera comprendida

entre Punta Canoas y Bocagrande presenta un fuerte transporte de estos, deposición de arenas y erosión en varias puntas o accidentes geográficos. De acuerdo con la autora son sitios de erosión activa Los Morros, Punta Canoas, Punta Santo Domingo y lugares localizados frente a Bocagrande, mientras que Isla Cascajo presenta procesos de acumulación de sedimentos. En estudios realizados por Correa (1990) se señalan como sectores “críticos”, debido a su gran variabilidad, a los sectores de Punta Canoas (Acreción), Isla Cascajo (Acreción) y Galerezamba-Pueblo Nuevo-Lomarena (Erosión) (Figura 1.1).

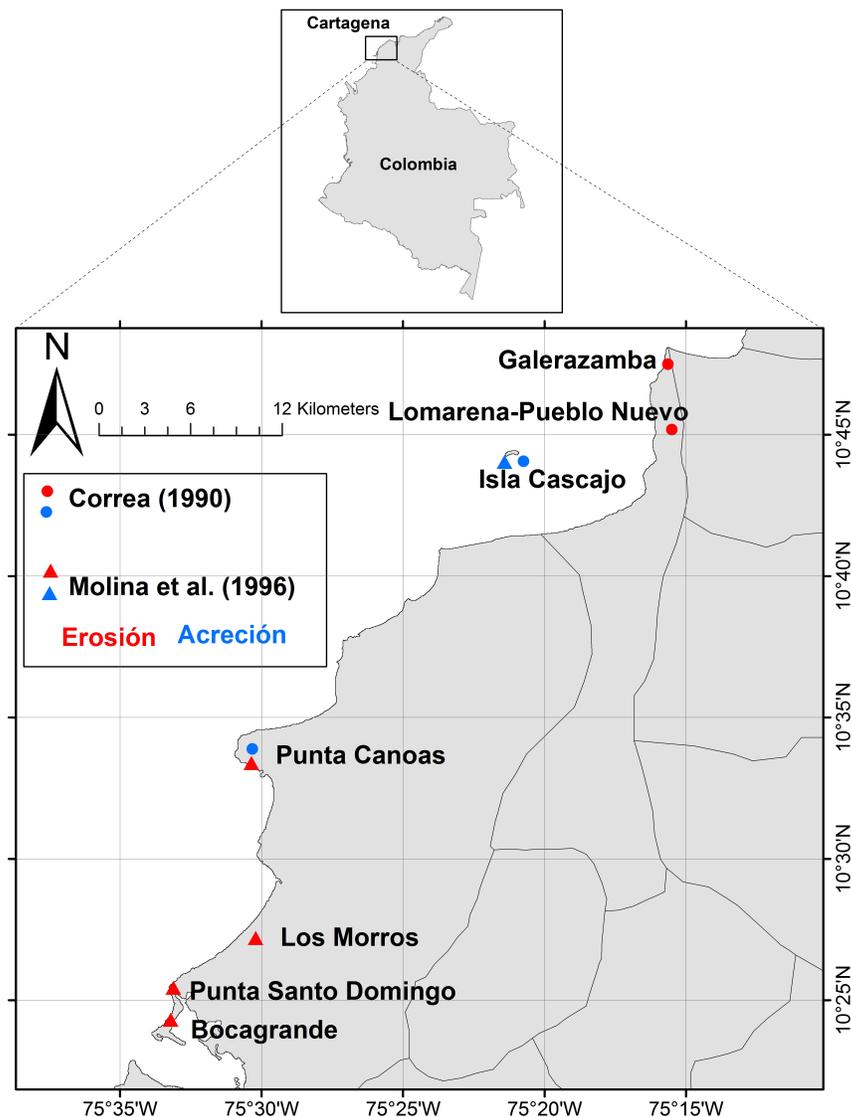


Figura 1.1: Localización sectores de acreción y sedimentación identificados por Molina et al. (1996) y Correa (1990) (Elaboración propia).

Los estudios que han sido realizados en la región han mostrado evidencia clara de que a lo largo de casi toda la franja litoral la erosión costera ha sido continua a través del tiempo. Como se observa en la Figura 1.2 en algunas zonas del área de estudio es posible notar un claro retroceso de la línea de costa.

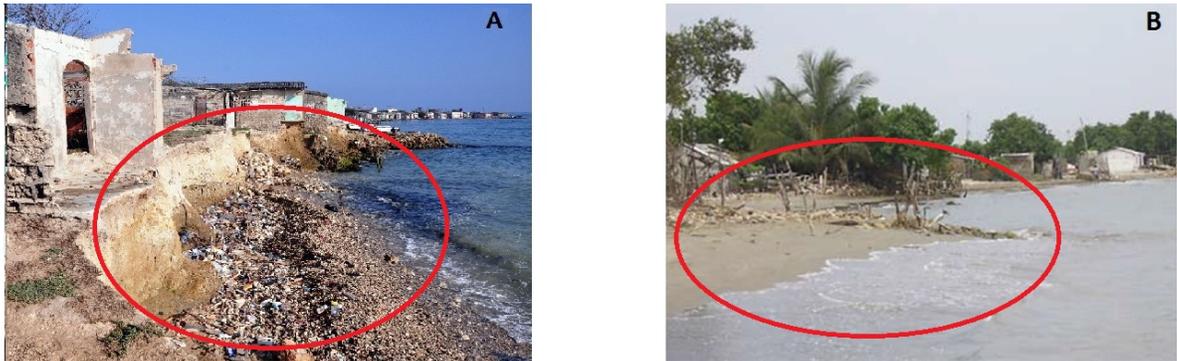


Figura 1.2: A: Erosión costera en Tierrabomba (Modificada de Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias, 2012). B: Retrocesos de las playas en el sector de la Boquilla (Tomada de Posada y Henao (2008))

La infraestructura física de importantes asentamientos litorales ha sido fuertemente afectada por la erosión de las playas y de los terrenos aledaños a la región caribe Colombiana. Muestra clara de lo anterior es lo acontecido las pasadas elecciones legislativas (Marzo de 2014) en el corregimiento de Tierrabomba, Distrito de Cartagena; donde sus habitantes, según diferentes medios de comunicación como el Tiempo, El Espectador, El Universal de Cartagena y RCN La Radio se negaron a sufragar, esto debido a los incumplimientos de la administración en la instalación de espolones para la protección de las costas, ya que según versiones de habitantes citadas por los medios, en los últimos 30 años el fenómeno de la erosión costera ha sido artífice de la desaparición de calles, centros de salud y de alrededor de 250 casas de pobladores. De acuerdo con lo anterior es claro que no se debe escatimar en la inversión de esfuerzos y recursos cuya finalidad sea ampliar el entendimiento y comprensión de la morfodinámica costera, ya que antes de buscar solución alguna se debe tener un claro y total entendimiento del problema para así canalizar esfuerzos en la búsqueda de soluciones. Es una problemática que se debe ubicar entre las prioridades de las entidades que representan el gobierno para evitar que este proceso llegue a volverse irreversible.

En respuesta a los inconvenientes planteados y tratando de generar aportes adicionales a los proporcionados en los estudios realizados por Correa (1990) y Molina et al. (1996), se propone la implementación de simulaciones numéricas de la hidrodinámica

marina con aplicaciones al transporte de sedimentos que faciliten la identificación del comportamiento de éstos en la región de cartagena (Galerazamba-Bocachica), para diferentes temporadas que se presentan allí (Seca, lluviosa). Con lo anterior se pretende desde la hidrodinámica identificar los fenómenos asociados al transporte de sedimentos (erosión-sedimentación) que afectan la región, generando una herramienta que a largo plazo pueda ser de gran utilidad para la toma de decisiones en pro del bienestar de la región.

## 1.2. Objetivos

Desarrollar a través de la herramienta computacional Delft3D simulaciones numéricas de la hidrodinámica marina aplicadas al transporte de sedimentos en la región de Cartagena.

### 1.2.1. Objetivos Específicos

- Analizar de forma detallada diversas fuentes de información batimétrica, topográfica y meteorológica disponibles.
- Calibrar y validar la hidrodinámica usando información proveniente de misiones satelitales, así como datos de corrientes, niveles de mar y oleaje recolectados en campañas.
- Acoplar la hidrodinámica calibrada y validada con el módulo de transporte de sedimentos.
- Identificar zonas de erosión y sedimentación en la Región para época seca y húmeda, así como para un evento extremo.

## 1.3. Descripción Área de Estudio

La región que se enmarca como área de estudio está localizada en la franja litoral del departamento de Bolívar, comprendida entre los sectores conocidos como Galerazamba en el norte y Bocachica localizado hacia el sur. En cercanías a la franja litoral, desde el norte hacia el sur se ubican diferentes corregimientos como Lomarena, Arroyo Grande, Arroyo de Piedra y Cartagena de Indias (Capital del departamento), de igual manera

se tienen accidentes geográficos como Punta Canoas. La batimetría en el área tiende a ser variable: hacia el norte se encuentran las zonas de menor profundidad, con valores medios de 20 *m*, mientras en el sur se aprecian las zonas de mayores profundidades con valores medios de 180 *m* (Figura 1.3).

La migración estacional de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), es decir la convergencia de aire cálido y húmedo de latitudes al norte y al sur del ecuador, es la causante de las tres temporadas marcadas en la región, por lo que entre los meses de Noviembre y Marzo se experimenta una temporada seca, entre Abril y Agosto se presenta una temporada de transición y finalmente entre los meses de Septiembre y Noviembre se experimenta una temporada de lluvias. Los valores medios anuales de humedad relativa, velocidad del viento y temperatura son 80 %, 2.9 *m/s* y 27.7 °C respectivamente (IDEAM, 2005).

Las corrientes así como el oleaje en la región se caracterizan por presentar mayor intensidad en la época seca. Cartagena presenta un régimen micromareal de tipo mixto, principalmente diurno, con amplitudes generalmente menores a 50 cm (CIOH, 1993; Morales B., 2004). El oleaje se encuentra influenciado por los vientos dominantes que soplan del norte-noreste en la época seca, mientras en la temporada lluviosa se encuentra influenciado por los vientos de calma (Díaz Gonzáles, 1999). De acuerdo con el CIOH (2007) en la temporada seca la altura del oleaje puede superar los 3 *m*, mientras en la temporada lluviosa no supera los 2.5 *m*.

En la temporada seca, cuando la deriva litoral es de mayor intensidad y el frente de ola golpea la costa de manera oblicua, los Vientos Alisios del noreste presentan mayor fuerza, produciendo así una corriente litoral hacia el sudoeste y arrastre de sedimentos; en cambio durante la temporada lluviosa se presenta una reducción en el arrastre de sedimentos, debido a que la contracorriente del Darién es más fuerte (Molina et al., 1996). Las playas de Bolívar corresponden a una acumulación de material arenoso no consolidado, depositado en la franja litoral. Las playas comprendidas desde Galerazamba hasta Bocagrande están constituidas por sedimentos de origen continental, de tamaño fino a grueso, de color gris (DIMAR, 2009).

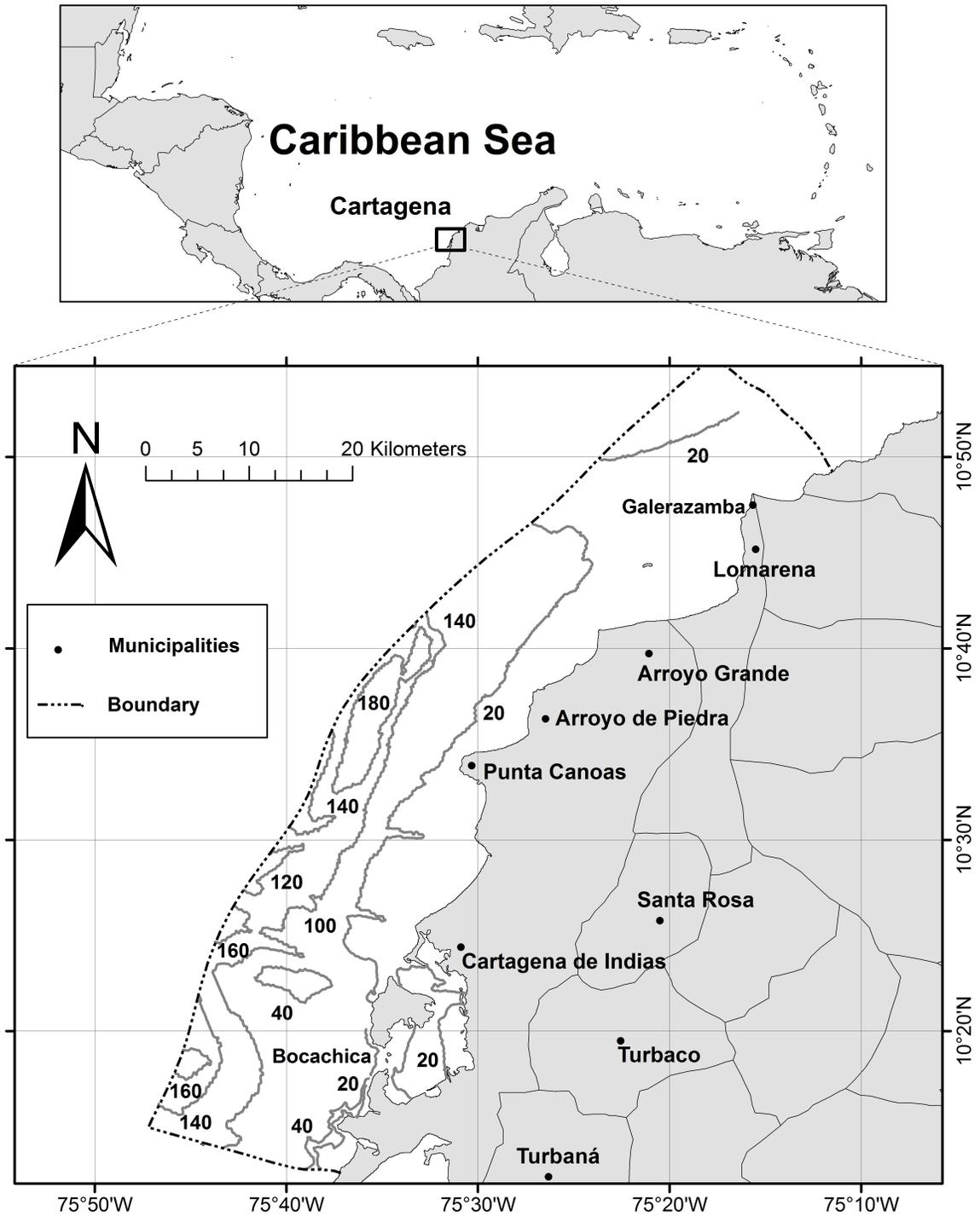


Figura 1.3: Ubicación Región de Estudio (Elaboración propia)

# Capítulo 2

## Materiales y Datos

Los datos utilizados para alimentar las simulaciones numéricas fueron adquiridos de diferentes fuentes de información tales como campañas de medición, bases de datos y modelos de cobertura global. En este capítulo se presenta una breve descripción de la información adquirida según su tipo.

### 2.1. Campañas de Mediciones

En un primer momento del proyecto cofinanciado entre Colciencias, la Universidad EAFIT y los Centros de Investigaciones Oceanográficas de la Dirección General Marítima, titulado “Erosión Costera en la Región de Cartagena (Galerazamba-Bocachica), Costa Caribe Colombiana, Módulo Oceanografía” se realizaron dos campañas de mediciones en la región de Cartagena. La primera de ellas se realizó entre el 25 de Abril y el 2 de Mayo de 2012, y la segunda entre el 16 y el 23 de Noviembre del 2012. Como resultado de las mencionadas campañas se obtuvieron series de tiempo continuas de corrientes, oleaje y niveles de mar que serán utilizadas en los procesos de calibración y validación.

Adicionalmente se recolectaron alrededor de 30 muestras de sedimentos mediante la metodología conocida como muestreo mecánico, en la cual se toman muestras de agua instantáneas. Las muestras recolectadas posteriormente son llevadas al laboratorio donde las concentraciones de sedimentos son determinadas por medio de filtración. El proceso consiste en la medición del volumen de agua recolectada y del peso de los sedimentos presentes en ella, lo que conduce al cálculo de la concentración de estos. El proceso de filtrado de las muestras se realizó siguiendo la norma estándar 2450 (Clesceri, 1998) con

papeles de filtro de fibra de vidrio marca ADVANTEC referencia GC50, cuyo tamaño de poro es de  $0.5 \mu m$

## 2.2. Morfología

La línea de costa utilizada fue trazada a partir de las cartas náuticas No. 408 y No. 409, editadas respectivamente en los años 1999 y 2004 por el CIOH. La información batimétrica para la región de Cartagena se obtuvo de la digitalización de las cartas náuticas No. 408, No. 409 y No. 261, cada una de ellas editada respectivamente en los años 1999, 2004 y 2011 por el CIOH.

Adicional a la información batimétrica obtenida se utilizó información topográfica en cercanías a la línea de costa. La información de topografía fue consultada de las siguientes fuentes:

**ASTER** (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer): Misión satelital que suministra información de la elevación de la superficie terrestre por medio de imágenes de alta resolución en 14 bandas del espectro electromagnético, su resolución varía entre los 15 y 90 *m* (ASTER, 2014).

**SRTM** (Shuttle Radar Topography Mission): Misión satelital previa al lanzamiento del ASTER, brinda un DEM (Digital Elevation Models) prácticamente a escala global, presenta una resolución de 90 *m*, disponible para el uso público (SRTM, 2014).

**GEBCO** (General Bathymetric Chart of the Oceans): La información se presenta en una malla global de resolución de arco de 30 segundos, la información es obtenida mediante recopilación controlada de sondeos batimétricos e interpolación entre puntos de sondeo basada en gravimetría satelital (GEBCO, 2014).

### 2.2.1. Análisis Fuentes de Información Topográfica

La información topográfica proveniente del GEBCO fue descartada porque presenta una baja resolución espacial. La escogencia de la fuente de información topográfica entre el SRTM y el ASTER se realizó después de analizar detalladamente la información arrojada por éstos. Para el anterior fin se hizo uso de algunos puntos donde se contaba con el dato de elevación proveniente de mediciones realizadas por el IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi-<http://www.igac.gov.co/igac>). Con ayuda de éstos se determinó que el ASTER presenta un desfase aproximado de alrededor de 6 *m* en el dato de altura que arroja, por lo que se decidió utilizar información topográfica proveniente

del SRTM, cuyo desfase no supera los 2 metros. En la Figura 2.1 se observa la imagen 3D de la batimetría y de la topografía utilizada en el dominio de cálculo.

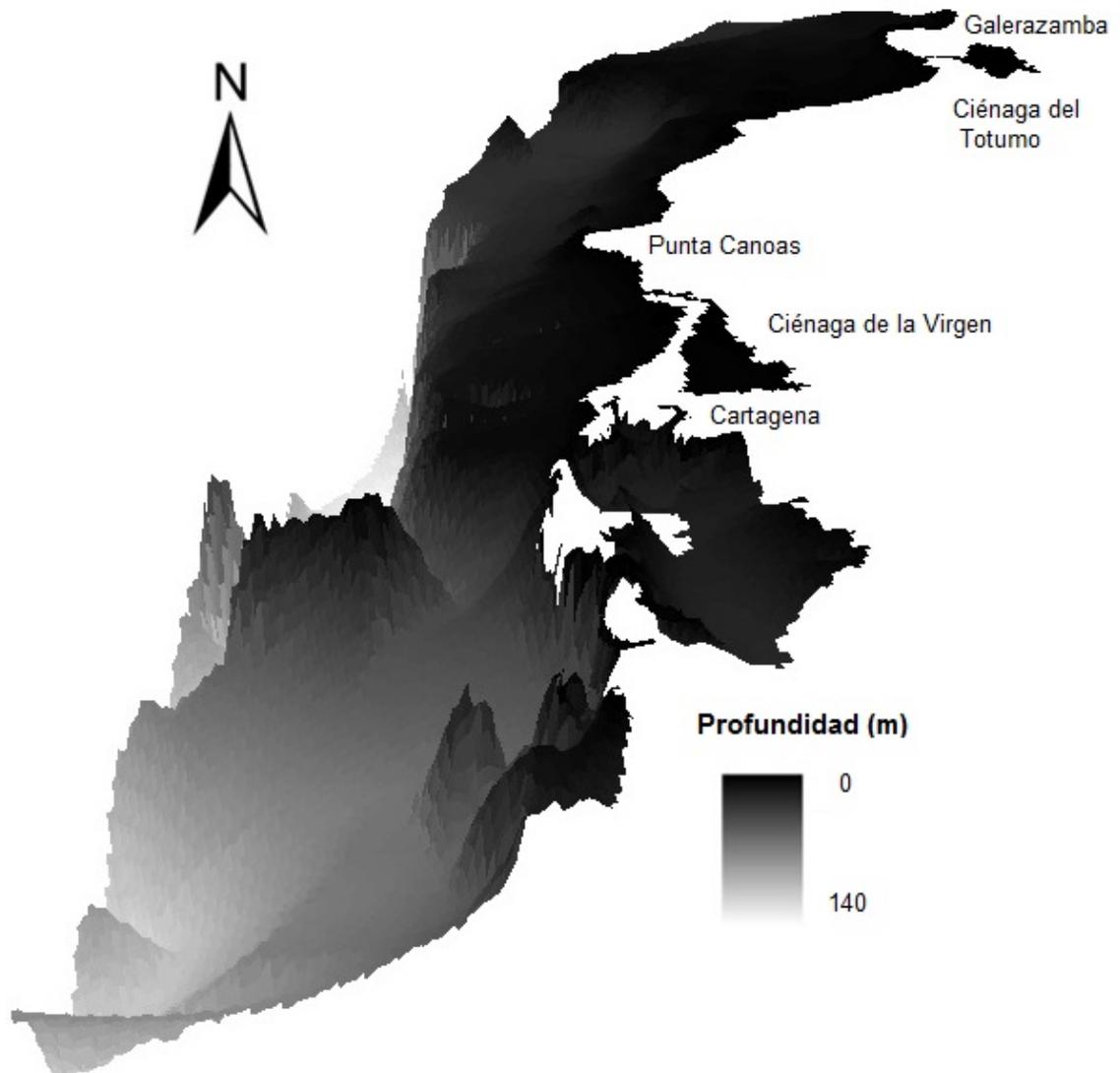


Figura 2.1: Batimetría 3D de la Región de Cartagena

## 2.3. Información Oceanográfica

### 2.3.1. Mediciones

Para la realización de las simulaciones numéricas se consultó información del **mareógrafo del UHSLC** (University of Hawaii Sea Level Center) (UHSLC, 2014) localizado en Cartagena, el cual provee información de niveles de mar con una resolución temporal de 1 hora. También se utilizó información proveniente del **satélite JASON-2** (JASON, 2011) para el caso de alturas de ola.

### 2.3.2. Mareas

La información relacionada con series de tiempo de niveles de mar fue obtenida de diversas fuentes. Se utilizó el **Tide Model Driver (TMD)** (Padman y Erofeeva, 2005), que es un modelo de marea global con una resolución de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , el modelo tiene como principal fuente de información el satélite TOPEX/Poseidon. De igual manera se obtuvo información proveniente del modelo del Caribe desarrollado por Ruiz Sarrazola (2015). La información anterior fue obtenida mediante la implementación de un NESTHD en Delft3D (Deltares, a), metodología que consiste en la construcción de un modelo global (Caribe) del cual se obtienen condiciones de frontera para otro modelo de menor escala, llamado anidado (Cartagena).

### 2.3.3. Oleaje

Para el cálculo de las características del oleaje se utilizó el modelo **WAVEWATCH III** <sup>®</sup> (Tolman, 1997), que es un modelo de oleaje de tercera generación desarrollado por NOAA/NCEP, brinda una resolución espacial de  $0.1667^\circ \times 0.1667^\circ$  y temporal de 3 horas.

## 2.4. Información de Sedimentos

La información referente a las características de sedimentos en la región se tomó de diferentes publicaciones del CIOH (DIMAR, 2009; Molina M. et al., 2001), así como de los resultados del procesamiento de información recolectada en campañas.

## 2.5. Meteorología

El modelamiento hidrodinámico requiere la utilización de forzamientos atmosféricos que representen de una forma adecuada la correcta interacción de la atmósfera con el océano. A pesar de esto no se cuenta con gran cantidad de información espacial ni temporal que lo permita, por lo que se hace importante y necesario la utilización de información proveniente de modelos numéricos de reanálisis.

Las variables climáticas consultadas para la implementación del modelo fueron viento a 10 m sobre la superficie y presión atmosférica. Dichas variables fueron obtenidas de 4 fuentes distintas:

**NCAR** (National Center for Atmospheric Research Reanalysis Project): Modelo de análisis y predicción climatológico que realiza asimilación de datos históricos (1957-Presente) para proveer bases de datos de alta calidad para investigación, su resolución temporal es de 6 horas mientras la espacial es de  $2.5^\circ$ , posee cobertura global. Asimila información proveniente de mediciones así como de satélite (Kalnay et al., 1996).

**NARR** (North America Regional Reanalysis): Base de datos de meteorología e hidrología que posee una resolución temporal de 3 horas y espacial de aproximadamente  $0.25^\circ$ , posee información desde el año 1979 hasta el 2014, y cubre esencialmente Norte América. El NARR fue desarrollado como una importante mejora sobre el NCAR, tanto en resolución como en precisión. Asimila información proveniente tanto de mediciones como de satélite (Mesinger et al., 2004).

**CCMP** (Cross-Calibrated Multi-Platform Ocean Surface Wind Vector Analyses): Base de datos que contiene información de velocidad y dirección de viento con una resolución temporal de 6 horas y espacial de  $0.25^\circ$ , esta base de datos no suministra datos referentes a presión atmosférica. El CCMP asimila información de diferentes satélites, entre los que se pueden mencionar: TRMM TMI, QuikSCAT, WindSat, SSM/I, SSMIS, AMSR-E y otros. Utiliza un método de análisis variacional para combinar extensos conjuntos de datos satelitales con datos de mediciones in situ y análisis del ECMWF (The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Actualmente sólo se encuentran datos disponibles entre el 2 de julio de 1987 y el 31 de diciembre de 2011 (Atlas et al., 2011).

**ERA-Interim**: Es uno de los modelos de reanálisis meteorológico desarrollados más recientemente producto de las investigaciones llevadas a cabo por el ECMWF (The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) (Dee y Coauthors, 2011; Simmons et al., 2006). El modelo ERA-Interim posee información desde el año 1979

hasta el presente, su resolución horizontal es de alrededor de 70 km ( $1.5^\circ$ ), mientras en la vertical posee 60 capas. Es una versión mejorada del proyecto ERA-40 (Uppala et al., 2005). Hace uso de una técnica de asimilación de datos variacional de 4 dimensiones (4D-Var) para adquirir datos de mediciones in-situ así como fuentes derivadas de satélite.

Debido a la escasez de mediciones y a la complejidad de los procesos involucrados en la asimilación y procesamiento de la información que hacen los modelos de reanálisis, se puede incurrir en la propagación de errores en las simulaciones. Siguiendo lo expuesto anteriormente, se hace necesario conocer la precisión de los distintos modelos de información meteorológica ya mencionados, con el objetivo de determinar cuál de ellos presenta una mejor reproducción de las condiciones reales, por lo que se realiza una comparación entre los datos arrojados por los distintos modelos y datos provenientes de mediciones.

En la literatura es posible encontrar diferentes estudios donde se realizan evaluaciones de desempeño de algunos modelos, así como comparaciones entre éstos (Ayan H et al., 2013; Bourras, 2006; Carvalho et al., 2013; Kalnay et al., 1996; Mesinger et al., 2004). En la tabla 2.1 se puede observar la precisión de algunos modelos reportada en la literatura, se aprecia que el modelo CCMP reporta la mejor precisión. Sin embargo en los estudios realizados se deja en evidencia que dicha precisión puede variar de acuerdo a la ubicación y a las condiciones climáticas (temporadas) de la región de interés, por lo que se hace necesario la realización de un análisis detallado que permita encontrar el modelo que mejor reproduzca el comportamiento de las variables de interés, en este caso para aguas profundas y someras del Caribe.

Modelo	RMS Velocidad Viento ( $m/s$ )
CCMP	0.967
NCAR	2.733
NARR	3.500

Tabla 2.1: Desempeño de algunos modelos de reanálisis reportado en la literatura

### 2.5.1. Evaluación de Fuentes de Información Atmosférica en el Caribe

Para determinar la precisión con la cual los distintos modelos de información meteorológica (CCMP, NCAR, NARR y ERA) entregan información, se llevó a cabo una comparación entre datos entregados por éstos y datos provenientes de medicio-

nes in-situ; para éstos últimos se utilizó información suministrada por 5 boyas pertenecientes al NDBC (National Data Buoy Center) e información proveniente de 4 estaciones meteorológicas ubicadas en distintos aeropuertos a lo largo de la costa Caribe (la información correspondiente a los aeropuertos se obtuvo de la página de internet <http://www.wunderground.com>). Como variables de interés para el análisis deseado se tomaron la velocidad y dirección del viento, así como la presión atmosférica. La ubicación geográfica de los aeropuertos y las boyas seleccionadas para la realización del análisis se presentan en la Figura 2.2.

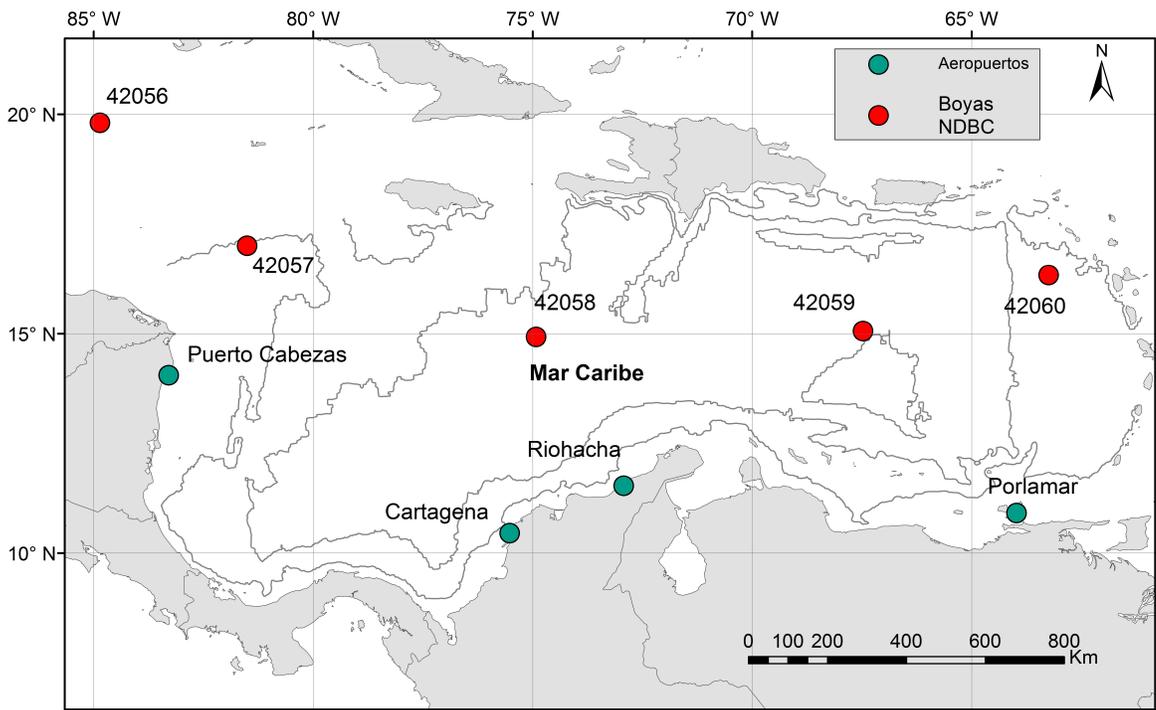


Figura 2.2: Aeropuertos y boyas meteorológicas seleccionadas para análisis de modelos meteorológicos. En Colaboración con Ruiz Sarrazola (2015)

La información proveniente de los modelos meteorológicos (CCMP, NCAR, NARR, ERA) es suministrada en posiciones fijas determinadas por mallas de cálculo y en intervalos de tiempo que varían de acuerdo a la resolución de cada modelo. A causa de lo anterior fue necesario interpolar espacial y temporalmente esta información para ajustarla con la ubicación y tiempo de las boyas y estaciones, para lo que se utilizó un esquema de interpolación bilineal para la posición y lineal para el tiempo. En la primera parte el análisis fue realizado para las 5 boyas del NDBC para un periodo entre los años 2010 y 2011 (Teniendo en cuenta disponibilidad de información), resultando este

análisis similar a lo reportado en la literatura. Sin embargo debido a que puede presentarse amortiguamiento de los errores para periodos de tiempo tan largos, se procedió a discretizar cada año en periodos de tiempo más cortos que fueran representativos de las épocas climáticas presentes en la región (seca y lluviosa); adicional a lo anterior se diferenció el comportamiento entre zonas de aguas profundas (Boyas NDBC) y zonas costeras (Estaciones climáticas aeropuertos). Por último se analizó el comportamiento de los modelos bajo condiciones extremas (Paso de huracanes y/o tormentas tropicales).

Para llevar a cabo el análisis bajo condiciones extremas, se seleccionaron periodos de tiempo en los cuales se hubiera presentado paso de tormentas tropicales por el Caribe, en cercanías de las estaciones de monitoreo disponibles (Figura 2.3). Los huracanes seleccionados se muestran en la Tabla 2.2. La información fue obtenida del National Hurricane Center (<http://www.nhc.noaa.gov/>).

Huracán	Boya Cercana	Fecha
Paula	42056	Oct 12-13 de 2010
Tomás	42059	Oct 31 - Nov 2 de 2010
Rina	42057	Oct 24 de 2011

Tabla 2.2: Huracanes Seleccionados

Al tener los valores provenientes de los diferentes modelos meteorológicos interpolados en las posiciones y tiempos correspondientes a las boyas y estaciones climáticas se procedió a calcular los siguientes estadísticos: el MAE (Mean Absolute Error), el RMAE (Relative Mean Absolute Error), el RMSE (Root Mean Square Error), la media aritmética ( $\bar{x}$ ) y la desviación estándar ( $\sigma$ ) de acuerdo a las ecuaciones 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5 respectivamente.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |p_i - t_i| \quad (2.1)$$

donde  $p_i$  es el valor modelado,  $t_i$  es el valor medido y  $n$  es el número de datos

$$RMAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|p_i - t_i|}{|\langle t_i \rangle|} \quad (2.2)$$

donde  $p_i$  es el valor modelado,  $t_i$  es el valor medido,  $|\langle t_i \rangle|$  es el promedio de los valores absolutos de las mediciones y  $n$  es el número de datos.

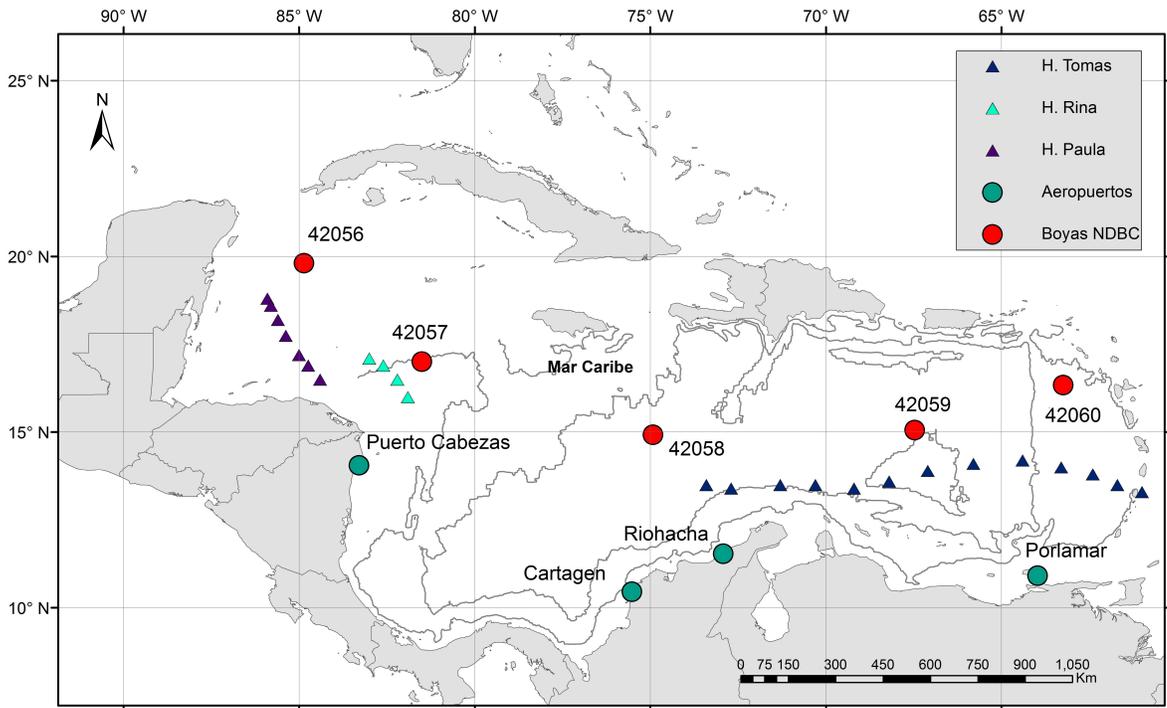


Figura 2.3: Trayectoria de huracanes por el Caribe seleccionados para realizar el análisis de desempeño de los modelos meteorológicos. En Colaboración con Ruiz Sarrazola (2015)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - t_i)^2} \quad (2.3)$$

donde  $p_i$  es el valor modelado,  $t_i$  es el valor medido y  $n$  es el número de datos.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.4)$$

donde  $x_i$  es el dato  $i$  de cada una de las series de interés y  $n$  es el número de datos.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.5)$$

donde  $x_i$  es el dato  $i$  de cada una de las series de interés,  $\bar{x}$  es la media aritmética de cada una de las series de interés y  $n$  es el número de datos de cada serie.

Los estadísticos ya mencionados se calcularon para las variables velocidad de viento,

dirección de viento y presión atmosférica para cada uno de los 4 modelos (El CCMP no proporciona información referente a presión atmosférica) con respecto a las mediciones de boyas y estaciones. Adicional a lo anterior, para cada una de las series de datos provenientes tanto de las boyas y de los aeropuertos, así como de los diferentes modelos se les calculó el coeficiente de correlación ( $R$ ) según la ecuación 2.6, para observar el grado de relación de las variables. También se calcularon las Pruebas F y T con un intervalo de confiabilidad del 95 %, con el fin de conocer si las series de datos presentaban varianzas y medias iguales.

$$R = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})(t_i - \bar{t})}{\sigma_p \sigma_t} \quad (2.6)$$

donde  $p_i$  es el valor modelado,  $\bar{p}$  es la media de la serie modelada,  $t_i$  es el valor medido,  $\bar{t}$  es la media de la serie medida,  $\sigma_p$  y  $\sigma_t$  son las desviaciones estándar de las series modelada y medida respectivamente y  $n$  es el número de datos.

#### 2.5.1.1. Resultados Evaluación Fuentes de Información Meteorológica

Luego de la realización del análisis en aguas profundas para escalas temporales largas y cortas se determinó que no existe una diferencia significativa en el desempeño de los modelos. Las diferencias de un mismo modelo en escala temporal larga y corta no son mayores al 2-3 %. De acuerdo al análisis realizado se observó que las variables velocidad y dirección del viento presentaron los errores relativos más grandes, rondando el 11 %, así como los coeficientes de correlación de mayor valor, casi siempre mayores a 0.6. En términos generales se observó que la variable velocidad del viento es la que presenta una mayor variabilidad, sin embargo es la que presenta los mayores coeficientes de correlación, lo que indica que los modelos generalmente son capaces de seguir adecuadamente la tendencia de variación de ésta, mas no son capaces de reproducir su valor medio. En el caso de la presión se evidenció lo contrario, los modelos tienden a reproducir de forma muy acertada el valor medio de ésta, pero no son buenos a la hora de representar sus variaciones.

Se observa que el modelo CCMP es el que presenta el mejor comportamiento a la hora de reproducir la velocidad y la dirección del viento, mientras que para la presión atmosférica el modelo que entrega los resultados con mejor rendimiento es el NCAR. La Figura 2.4 presenta la velocidad del viento contra el tiempo en la posición de la boya 42056, se presentan las series correspondientes a la medición y a los 4 modelos, en ésta es apreciable que el modelo ERA es el menos preciso a la hora de seguir la información

medida, lo que se evidencia en una línea de tendencia media de éste muy distante de la presentada por las mediciones.

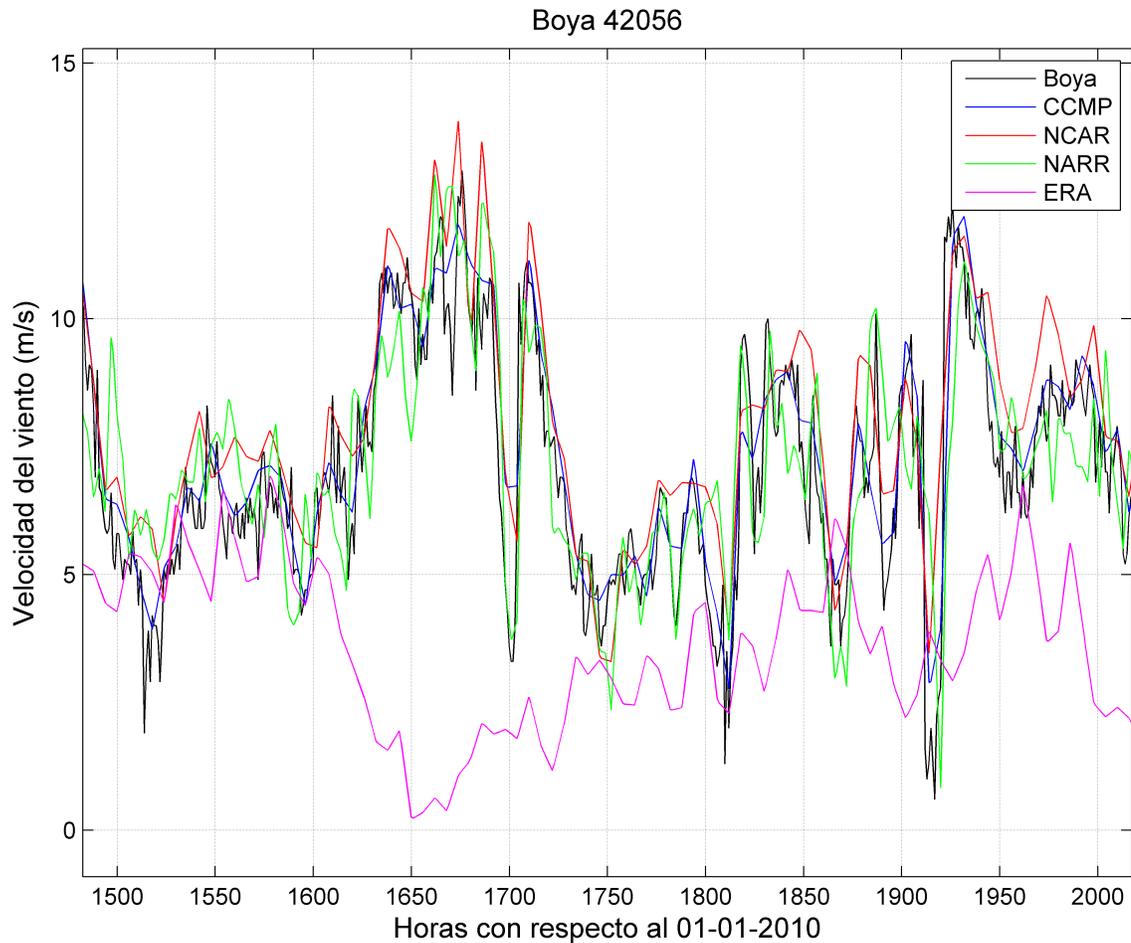


Figura 2.4: Velocidad del viento en la Boya 42056 para la temporada seca del año 2010. En Colaboración con Ruiz Sarrazola (2015)

Las Figuras 2.5 y 2.6 presentan los diagramas de Taylor para la posición de la boya 42056 para la velocidad y la dirección del viento respectivamente (Taylor, 2001). En éstos se presenta gráficamente la relación entre los estadísticos desviación estándar, coeficiente de correlación y diferencia cuadrática media, adicionalmente como referencia se muestra la posición de la boya, en términos simples el modelo de mejor desempeño es el que se encuentra más cerca de ésta.

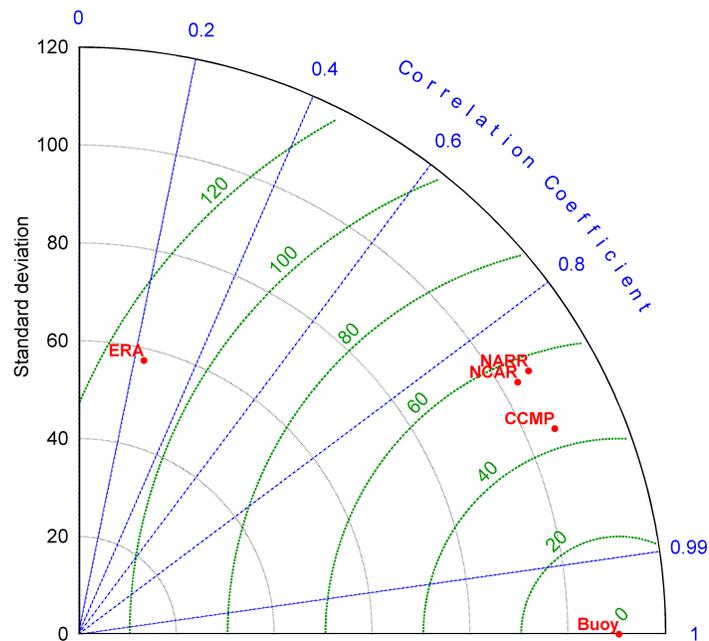


Figura 2.5: Diagrama de Taylor para la velocidad del viento en la temporada seca Boya 42056. En Colaboración con Ruiz Sarrazola (2015)

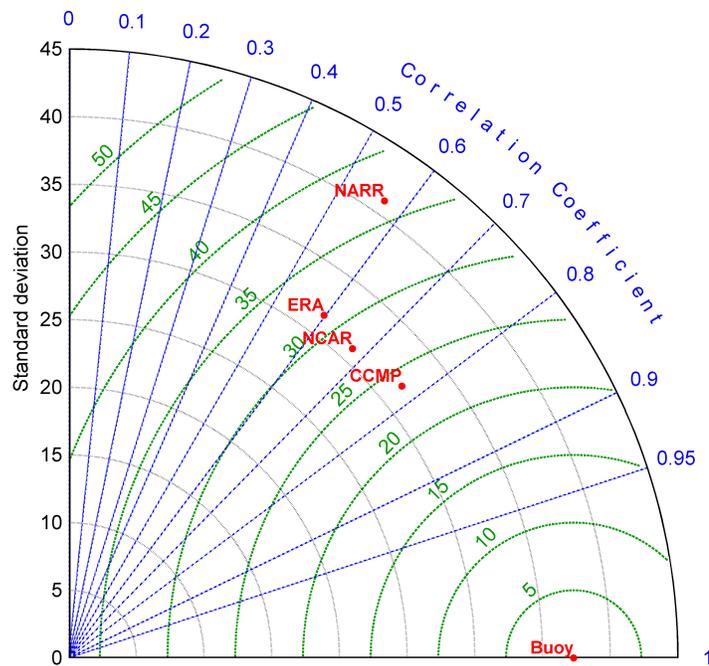


Figura 2.6: Diagrama de Taylor para la dirección del viento años 2010-2011 en la Boya 42056. En Colaboración con Ruiz Sarrazola (2015)

Para ilustrar el comportamiento de los modelos frente a la reproducción de la presión atmosférica en aguas profundas durante periodos de tiempo cortos y largos se muestran las Figuras 2.7 y 2.8. La Figura 2.7 presenta la presión atmosférica contra el tiempo en la posición de la boya 42057, se presentan las series correspondientes a la medición y a los 3 modelos, en ésta es apreciable que el modelo ERA es el que presenta la línea de tendencia media más distante de la presentada por las mediciones, mientras que los modelos NCAR y NARR presentan similar comportamiento.

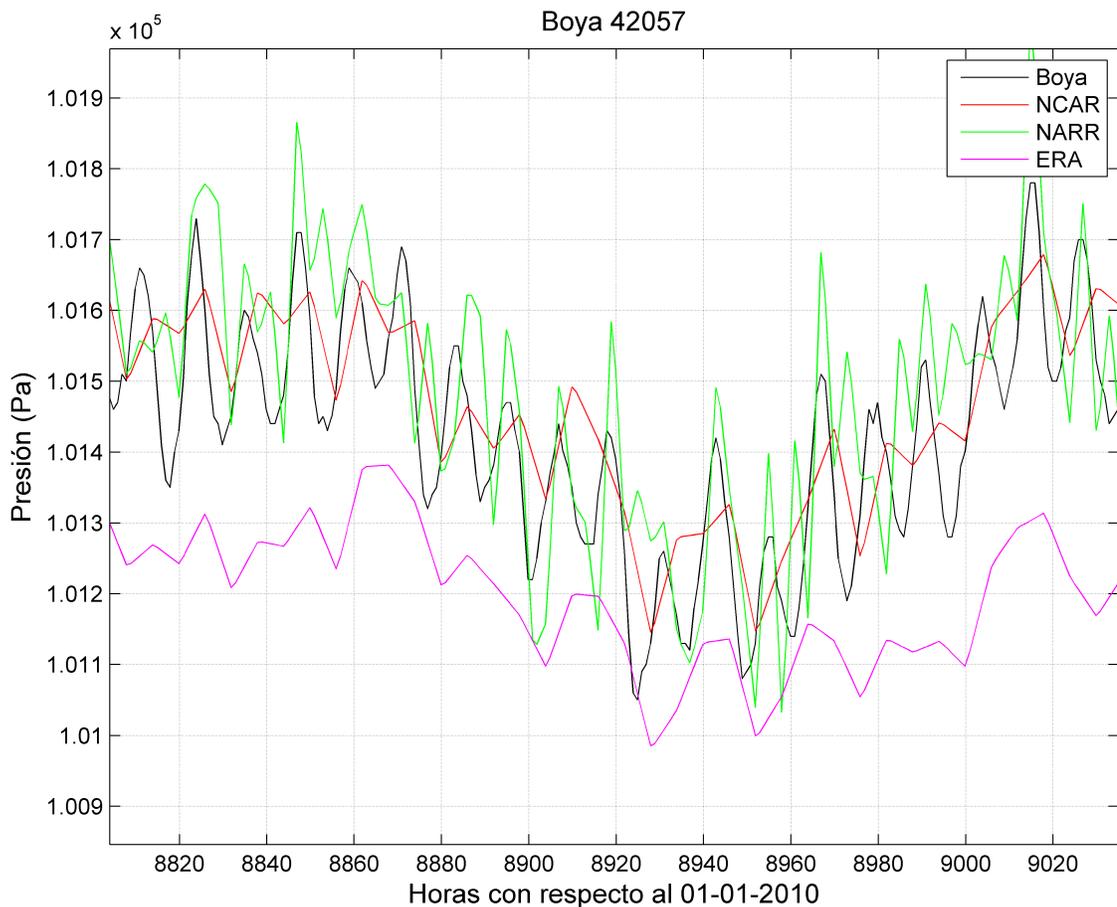


Figura 2.7: Presión atmosférica en la Boya 42057 para la temporada seca del año 2011. En Colaboración con Ruiz Sarrazola (2015)

La Figura 2.8 presenta el diagrama de Taylor (Taylor, 2001) para la posición de la boya 42057 para la variable presión atmosférica, de acuerdo con lo explicado anteriormente se observa que el modelo que presenta mejor desempeño es el NCAR.

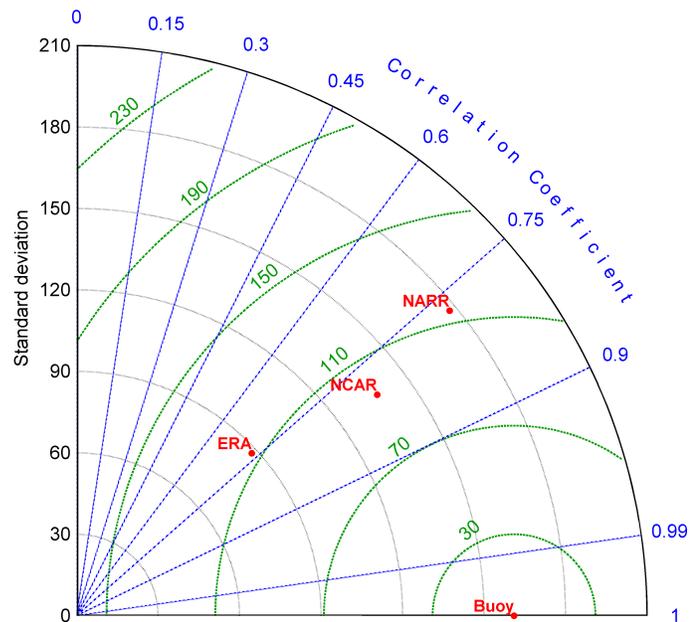


Figura 2.8: Diagrama de Taylor para la presión atmosférica en la temporada seca Boya 42057. En Colaboración con Ruiz Sarrazola (2015)

Del análisis realizado en aguas profundas para períodos largos y cortos se tiene que el modelo que mejor reproduce la velocidad y dirección del viento es el CCMP, mientras que para la variable presión atmosférica se tiene que el modelo NCAR es el de mejor desempeño.

Para el caso de aguas someras, en cada una de las 4 estaciones localizadas en los aeropuertos a lo largo de la costa caribe (Figura 2.2) se llevó a cabo un análisis similar al realizado con las boyas localizadas en aguas profundas, para este caso se tomaron períodos de tiempo de aproximadamente 15 días de duración donde se evidenciaran altas velocidades del viento. En zona costera resultó difícil determinar cual de los modelos evaluados presentó un mejor desempeño, ya que para todos los casos analizados se observaron comportamientos muy diferentes. De acuerdo con el análisis se determinó que ninguno de los modelos fue capaz de reproducir de forma acertada ni la velocidad ni la dirección del viento en ninguna de las estaciones analizadas, lo que se vió reflejado en errores de más del 50 % en todos los modelos.

La Figura 2.9 presenta la velocidad del viento contra el tiempo en zona costera (Aeropuerto Cartagena), se presentan las series correspondientes a la medición y a los 4 modelos. Es evidente que ninguno de los modelos logra representar los picos de velocidad del viento que se presentan allí, lo que genera errores cercanos al 70 % (RMAE).

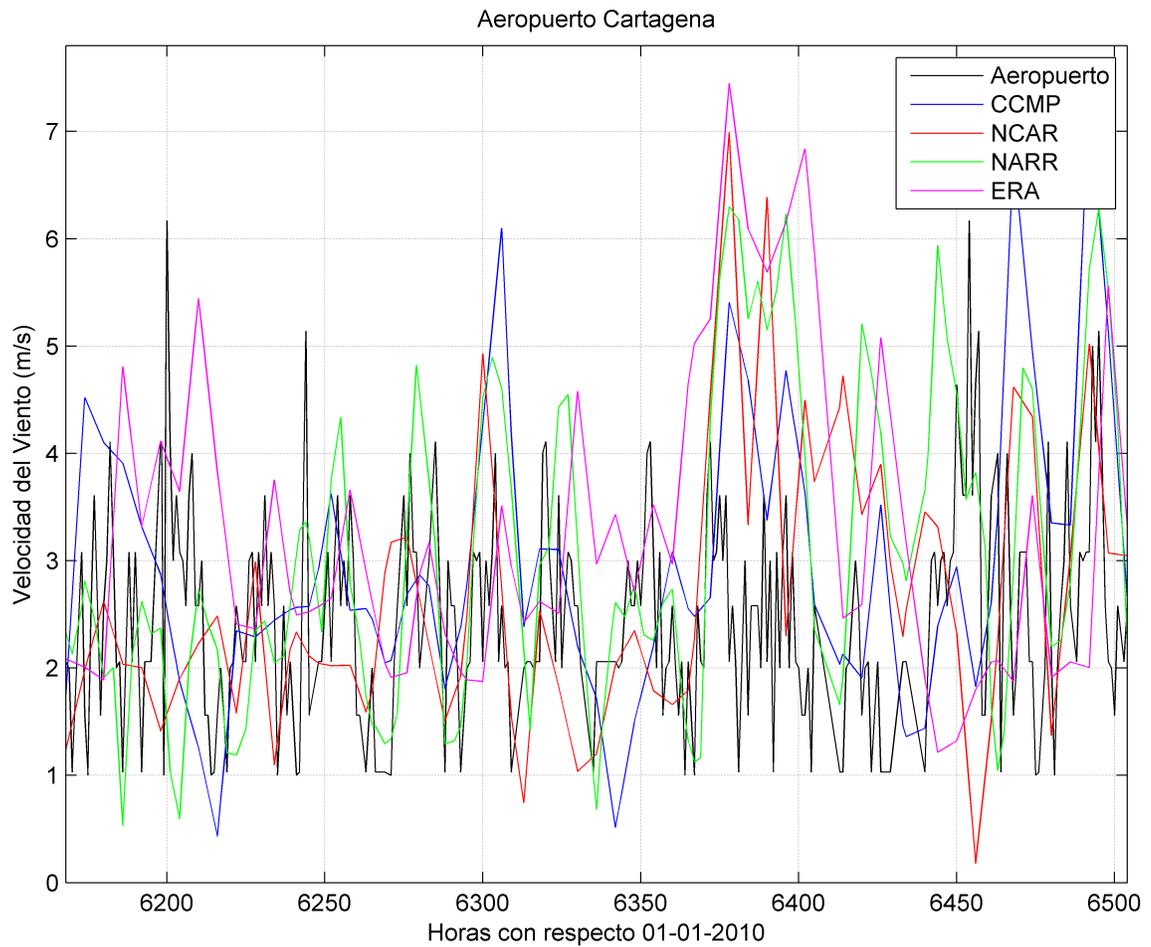


Figura 2.9: Gráfica de la velocidad del viento en la temporada lluviosa del año 2010 en el aeropuerto de Cartagena

Las Figuras 2.10 y 2.11 presentan respectivamente los diagramas de Taylor para zona costera (Aeropuerto Cartagena) para la velocidad y la dirección del viento (Taylor, 2001). De acuerdo con lo expuesto anteriormente, es evidente que ninguno de los modelos presenta un desempeño bueno, lo cual es notorio en los bajos coeficientes de correlación presentados por éstos, los cuales oscilan entre 0.1 y 0.6, siendo el CCMP el único modelo que mantiene valores por encima de 0.3 en la mayoría de los casos.

Para el caso de la variable presión atmosférica se tiene que ésta presenta los errores relativos (RMAE) más bajos de todas las variables, errores que permanecen por debajo del 2% tanto en temporada seca como lluviosa. Sin embargo los modelos sí presentan comportamientos muy diferenciados entre sí. El modelo NCAR subestima la presión media en todos los aeropuertos, y presenta los errores relativos más grandes, con va-

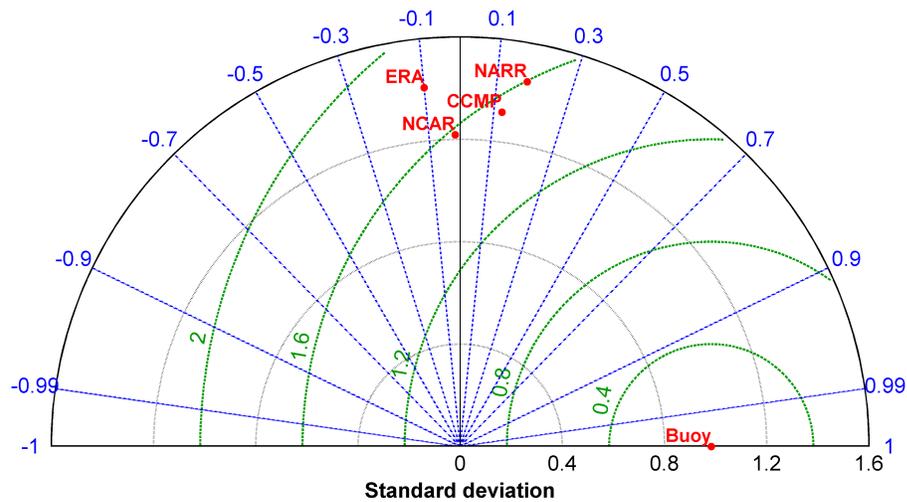


Figura 2.10: Diagrama de Taylor para la velocidad del viento en la temporada lluviosa del año 2010 en el aeropuerto de Cartagena. En colaboración con Ruiz Sarrazola (2015)

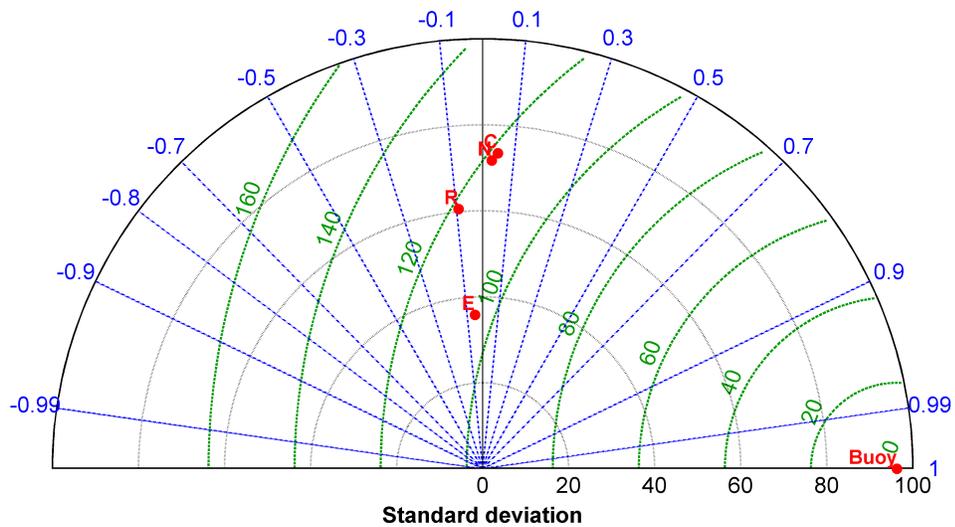


Figura 2.11: Diagrama de Taylor para la dirección del viento en la temporada lluviosa del año 2010 en el aeropuerto de Cartagena. En colaboración con Ruiz Sarrazola (2015)

lores que rondan el 1%, aunque es el modelo que presenta los mejores coeficientes de correlación en gran parte de los aeropuertos, con valores cercanos a 0.5. Los coeficientes de correlación presentan una variación de caso a caso, por lo que no indican una tendencia clara de la capacidad de los modelos para seguir las variaciones de la variable.

En la figura 2.12, donde se presenta la presión atmosférica contra el tiempo en zona costera (Aeropuerto Cartagena), se observan las series correspondientes a la medición

y a los 3 modelos. Se aprecia que todos los modelos subestiman la presión medida.

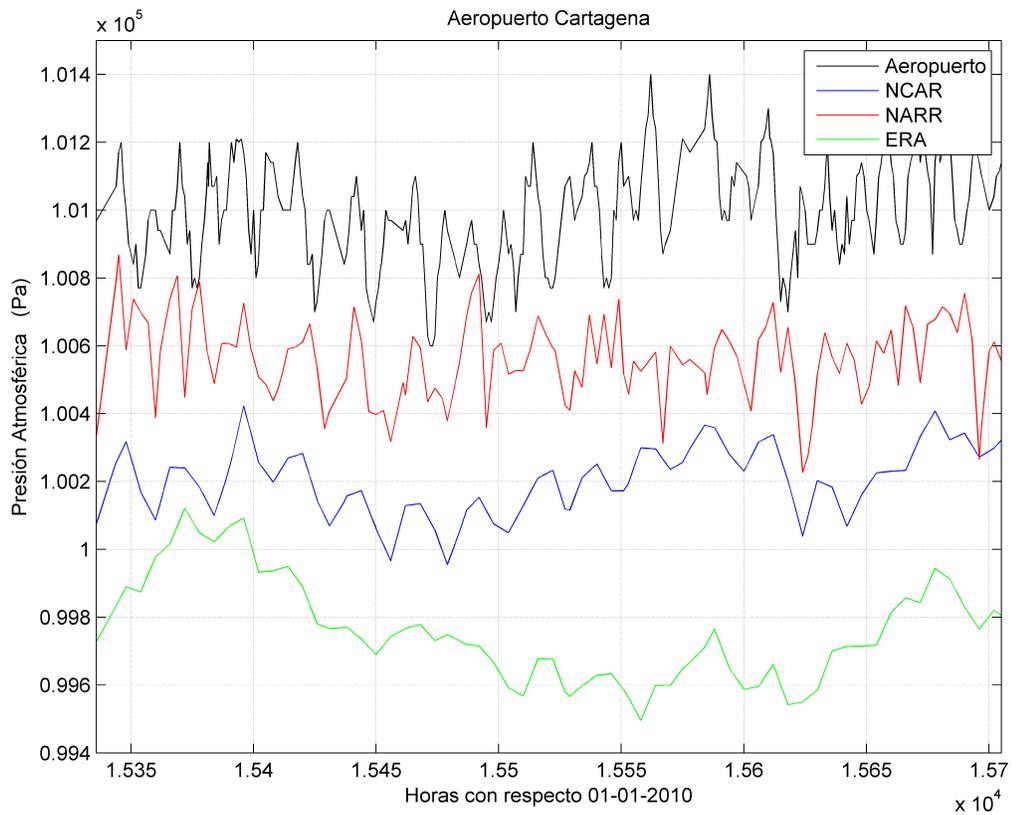


Figura 2.12: Presión atmosférica en el aeropuerto de Cartagena para la temporada lluviosa

En la Figura 2.13 se presenta el diagrama de Taylor (Taylor, 2001) para zona costera (Aeropuerto Cartagena) para la variable presión atmosférica, de acuerdo con lo explicado anteriormente se observa que el modelo que presenta mejor desempeño es el NCAR.

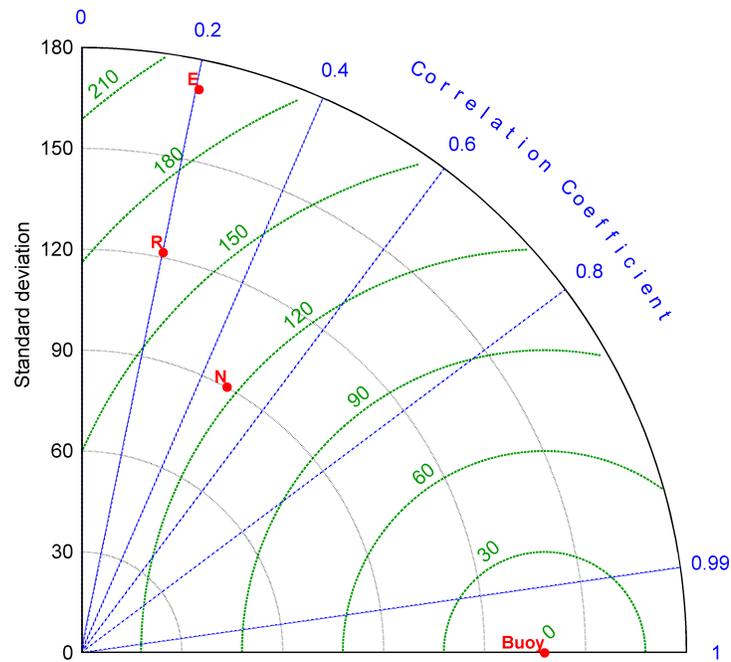


Figura 2.13: Diagrama de Taylor para la presión atmosférica en el aeropuerto de Cartagena para la temporada lluviosa (N = NCAR, R = NARR, E = ERA)

Para el caso en el cual se analizó el comportamiento de los modelos bajo condiciones extremas se observó que la variable más afectada fue la velocidad del viento, variable que presentó aumentos significativos. Para el caso de los huracanes Rina y Paula, cuyo paso por el Caribe fue corto, sólo el CCMP logró reproducir de forma acertada el aumento observado en la velocidad, lo anterior se evidenció en un aumento de los errores relativos con valores cercanos a 50 % para los modelos NCAR, NARR y ERA. Para el caso de Tomás, huracán con paso más largo por el Caribe, se observó que los aumentos en la velocidad fueron menos bruscos que los casos anteriores, lo que permitió que los modelos lograran reproducir de forma más acertada la variación observada en la velocidad, por lo que no se presentaron cambios significativos en el desempeño de estos. La Figura 2.14 presenta la velocidad del viento contra el tiempo en la posición de la boya 42056, se presentan las series correspondientes a la medición y a los 4 modelos. En ésta se observa que el modelo que más se acerca a los cambios generados por el paso cercano de un huracán a la boya es el CCMP.

Los resultados obtenidos a partir del análisis llevado a cabo permiten rechazar la hipótesis que se tenía, en la cual se pensaba que al utilizar periodos de tiempo largos para la realización del análisis se podría presentar amortiguamiento de los errores, pues

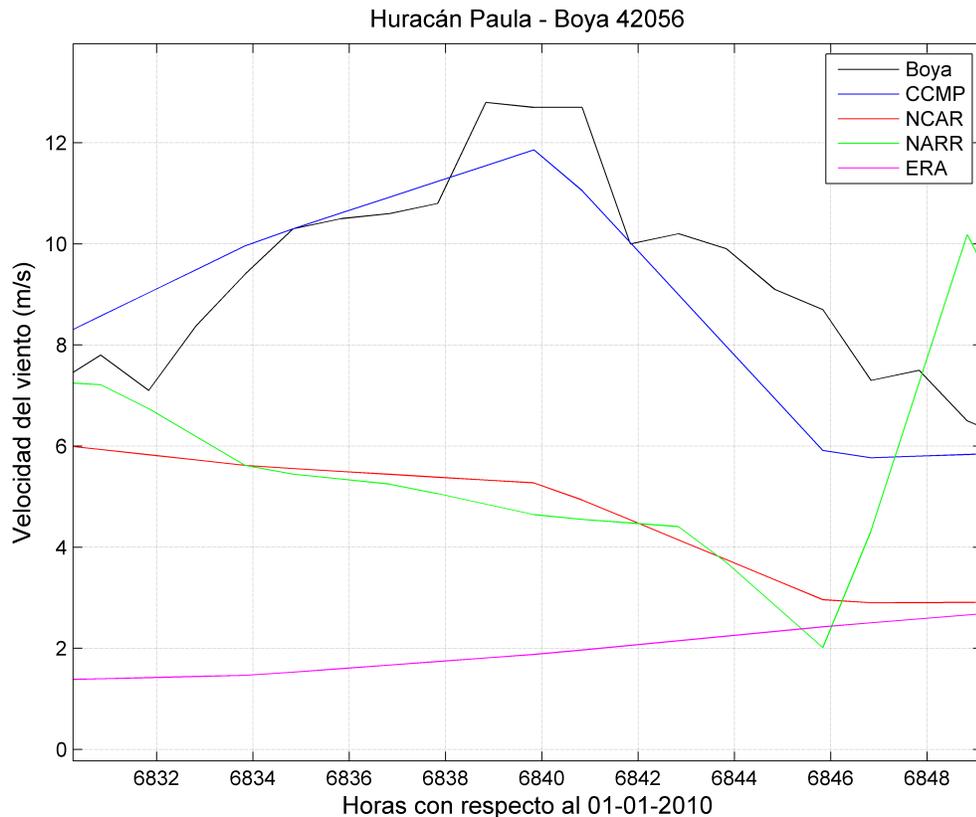


Figura 2.14: Velocidad del viento durante el paso del huracán Paula. En colaboración con Ruiz Sarrazola (2015)

tal como se apreció en los resultados ya mostrados, los errores en aguas profundas para periodos de tiempo largos y cortos no presentan mayores diferencias, siendo para la velocidad de viento de alrededor del 12-13 %, para la dirección del viento entre el 11 % y el 14 %, mientras que para la variable presión atmosférica los errores no superan el 0.5 %. De acuerdo con lo anterior es evidente que los análisis para escalas temporales cortas son representativos del comportamiento general de los modelos.

Al analizar los resultados obtenidos en aguas profundas para todas las variables analizadas, tanto en temporada seca como en temporada lluviosa no se encontraron diferencias significativas en el desempeño de los modelos, lo que implica que los modelos logran presentar un comportamiento homogéneo durante las épocas climáticas que tienen lugar en la región. Adicionalmente es de destacar que el modelo ERA presenta una variación espacial importante en la calidad de los resultados que entrega, ya que la calidad de éstos mejora en gran medida al desplazarse del oeste hacia el este (Caso

contrario al NARR, que mejora sus resultados al desplazarse hacia el oeste), como ejemplo se muestran en la Figura 2.15 los diagramas de Taylor para la variable velocidad de viento para las boyas 42056 y 42059, ubicadas en lados opuestos de la región. De acuerdo con lo explicado anteriormente se observa que el desempeño del modelo ERA mejora en el este (Ver ubicación Boyas en la Figura 2.2).

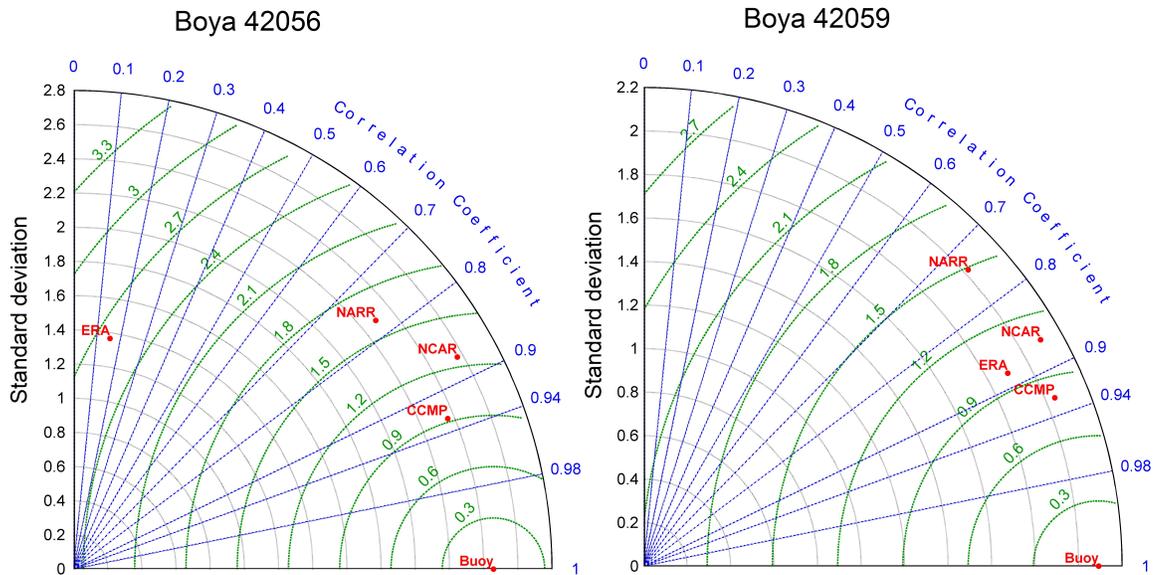


Figura 2.15: Diagrama de Taylor para la velocidad del viento en las boyas 42056 y 42059

En aguas profundas se observa que el modelo NARR siendo el de mayor resolución temporal (3 horas) no es el que presenta el mejor desempeño, lo que conlleva a sustentar que una resolución como la presentada por los modelos NCAR, CCMP y ERA (6 horas) es suficiente para describir de forma adecuada el comportamiento de las variables de interés. En aguas profundas el RMSE para la velocidad del viento del modelo CCMP se encuentra entre 0.8 y 0.92  $[m/s]$ , cercano al valor reportado en la literatura (0.967  $[m/s]$ ), el RMSE del NCAR calculado ronda el 0.9-1  $[m/s]$ , muy por debajo de lo reportado en la literatura (2.733  $[m/s]$ ) y el del NARR ronda el valor de 1.2  $[m/s]$ , también muy por debajo de lo reportado en la literatura (3.500  $[m/s]$ ). Además cabe remarcar que al realizar las pruebas F y T a las diferentes series de datos provenientes de mediciones y de modelos, se observó que en la mayoría de casos estas indican que ni las varianzas ni las medias de dichas series son iguales.

En agua someras no se observa un comportamiento homogéneo en los modelos, no hay una clara diferencia en el desempeño de éstos. Se tiene que en forma general

ninguno de los modelos es capaz de reproducir con adecuada precisión las condiciones atmosféricas en aguas someras, esto se evidencia en errores de más del 50 % en velocidad y dirección del viento; para la presión atmosférica los modelos se acercan a la media de la variable, pero si ser capaces de reproducir sus variaciones, presentado errores menores al 1 %. En agua someras el RMSE del CCMP oscila entre 2.8 y 3.5 [ $m/s$ ], valor ya muy alejado del reportado en la literatura (0.967 [ $m/s$ ]), mientras los RMSE del NARR y del NCAR se ubican en el rango de 2.5-3.5 [ $m/s$ ]. En la Figura 2.16 se presenta un cuadro resumen donde se aprecia el comportamiento del modelo de mejor desempeño, en este caso el CCMP, para aguas profundas y someras, durante escalas temporales largas y cortas, así como para el caso de un evento extremo.

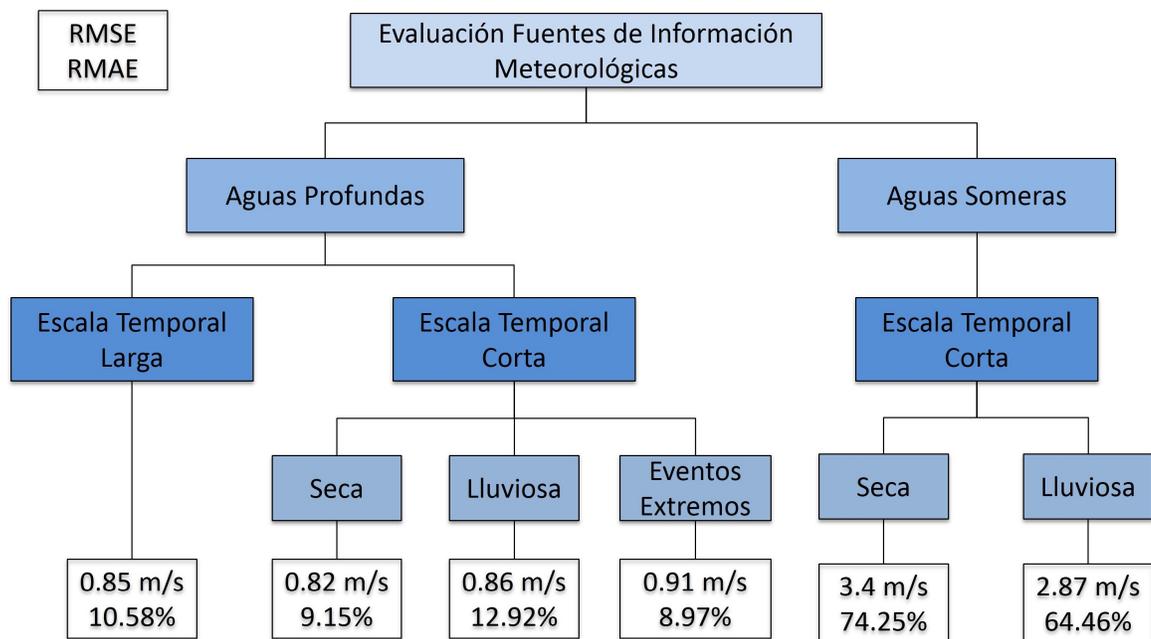


Figura 2.16: Resumen desempeño CCMP en la reproducción de la velocidad del viento

Para el caso de eventos extremos no se puede decir nada concluyente del desempeño de los modelos ya que los huracanes en su máxima expresión no pasaron exactamente por la ubicación de los puntos de control (boyas) o no se contaba con información disponible, pero aún así se tiene que el modelo CCMP es el que presenta el mejor rendimiento en la reproducción de vientos bajo condiciones extremas (Figura 2.16).

Teniendo en cuenta el análisis realizado se tiene que para este estudio se utilizará información proveniente del modelo NCAR, dado que para los años que se simularán el CCMP no presenta información (Ver Capítulo 4).

# Capítulo 3

## Marco Teórico

En la primera parte de este capítulo se realiza la descripción matemática del modelo numérico que soluciona la plataforma Delft3D, la cual es desarrollada por WL|Delft Hydraulics (Roelvink y Van Banning, 1994), en dicha plataforma se acoplan simultáneamente la hidrodinámica, el oleaje y el transporte de sedimentos. Delft3D es un software ampliamente utilizado en la modelación de hidrodinámica marina, así como en el transporte de sedimentos. Lo anterior se evidencia en los trabajos de Cha (2012); Gar (2015); Rah (2015); Elh (2015); Pop (2015); Velásquez M. (2013). Posteriormente se presenta una descripción de la información de entrada utilizada para realizar las simulaciones hidrodinámicas para la región de Cartagena (Galerazamba-Bocachica), y finalmente se presenta el análisis de sensibilidad realizado a las simulaciones, cuyo objetivo no fue otro que encontrar la relevancia de diferentes parámetros numéricos en el comportamiento de algunas variables inmersas en las simulaciones.

### 3.1. Modelo Matemático

#### 3.1.1. Hidrodinámica

El modelo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para el caso de un fluido incompresible (densidad constante) bajo los supuestos de aguas poco profundas y de Boussinesq, en el cual en la ecuación de momentum las aceleraciones verticales son despreciadas, lo cual conduce a la ecuación de presión hidrostática. Para la integración temporal de las ecuaciones de aguas someras, el modelo emplea un esquema de diferencias finitas a través del método de la dirección alterna implícita (ADI) (Leendertse,

1967; Leendertse et al., 1973; Leendertse y Gritton, 1971; Stelling, 1984) en una malla curvilínea.

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento del fluido son presentadas a continuación en coordenadas curvilíneas ((Deltares, a)). La primera en ser descrita será la ecuación de continuidad (3.1):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d+\zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}})}{\partial \eta} = (d+\zeta)Q \quad (3.1)$$

donde  $\zeta$  es el nivel de agua por encima de un plano horizontal de referencia,  $\sqrt{G_{\xi\xi}}$  y  $\sqrt{G_{\eta\eta}}$  son los coeficientes utilizados para transformar coordenadas curvilíneas a rectangulares,  $d$  es la profundidad por debajo de un plano de referencia,  $\zeta$  es la elevación de la superficie libre sobre el plano de referencia horizontal,  $\xi, \eta$  son las coordenadas horizontales curvilíneas,  $U$  y  $V$  están definidas como las velocidades de profundidad promediadas en las direcciones  $\xi$  y  $\eta$  respectivamente, y por último  $Q$  representa las contribuciones por unidad de área debidas a la descarga o captación de agua, precipitación y evaporación.

La ecuación de conservación de momentum en las direcciones  $\xi$  y  $\eta$  también es presentada en las ecuaciones 3.2 y 3.3.

En  $\xi$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{(d+\zeta)} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - f_v = \\ - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \nu_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \quad (3.2) \end{aligned}$$

En  $\eta$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{(d+\zeta)} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - f_u = \\ - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \nu_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \quad (3.3) \end{aligned}$$

donde  $P_\xi$  y  $P_\eta$  son los gradientes de presión en las direcciones  $\xi$  y  $\eta$ ,  $F_\xi$  y  $F_\eta$  representan los desequilibrios de los esfuerzos horizontales de Reynolds en las direcciones  $\xi$  y  $\eta$ ,  $M_\xi$  y  $M_\eta$  representan las fuerzas externas en las direcciones  $\xi$  y  $\eta$ ,  $\rho_0$  es la densidad

de referencia del agua,  $f_u$  y  $f_v$  son las componentes de la fuerza de Coriolis en  $u$  y  $v$ ,  $\sigma$  es la coordenada vertical escalada según el sistema coordenado tipo  $\sigma$  introducido por Philips (1957),  $\nu_v$  es la viscosidad de remolino vertical (coeficiente de viscosidad en la dirección vertical o vorticidad vertical),  $w$  es la velocidad vertical definida en las iso superficies  $\sigma$  como la velocidad relativa al movimiento del plano  $\sigma$ .

### 3.1.2. Oleaje

En Delft3D el oleaje y la hidrodinámica son procesos acoplados, donde el primero de ellos se encuentra descrito por el espectro de acción de densidad de oleaje en dos dimensiones, la evolución de éste está descrita de acuerdo con el modelo de tercera generación SWAN (Booij et al., 1999), es decir por la ecuación de balance de acción espectral (Ecuación 3.4) (Deltares, b; Hasselmann et al., 1973).

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}C_xN + \frac{\partial}{\partial y}C_yN + \frac{\partial}{\partial \sigma}C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta}C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (3.4)$$

Donde el primer término representa el cambio en el espectro en el tiempo, el segundo y tercer término la propagación en el espacio, el cuarto término el cambio en la frecuencia debido a los cambios en la profundidad y corrientes, el quinto término representa la refracción inducida por el terreno y las corrientes, y el término de la derecha representa las fuentes en términos de densidad de energía debidas a los efectos de generación, disipación e interacciones no lineales (Dingemans, 1997; Mei, 1989; Whitham, 1974).

### 3.1.3. Sedimentos

Los sedimentos son material fragmentado a causa de la erosión física y química de las rocas de la corteza terrestre, son movidos por agentes físicos como el viento, las olas, las corrientes y la gravedad. De acuerdo a su origen pueden ser clasificados como autóctonos (Provenientes de la degradación de rocas locales) o alóctonos (derivados de la meteorización física y química de rocas continentales) (Masselink y Hughes, 2003; Velásquez M., 2013). Desde un punto de vista hidráulico las propiedades más importantes de los sedimentos estas relacionadas con el tamaño, la forma y la gravedad específica (Densidad-Peso específico) (Fredse y Deigaard, 1994). Estas propiedades en gran medida determinan la respuesta de los granos o partículas ante las fuerzas que tienden a moverlos, bien sea en el aire o en el agua. Las arenas, materiales no cohesivos o friccionantes, están compuestos por partículas sueltas cuyo tamaño varía entre 62 y

2000  $\mu m$ .

### 3.1.4. Transporte en suspensión

El módulo de transporte de sedimentos de la plataforma Delft3D soporta transporte de carga de fondo de sedimentos cohesivos y no cohesivos, así como transporte de carga en suspensión de sedimentos no cohesivos. El transporte de sedimentos en suspensión es calculado resolviendo la ecuación de advección-difusión (3.5) ((Deltares, a)):

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s) c}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_{s,x} \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_{s,y} \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon_{s,z} \frac{\partial c}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.5)$$

donde  $c$  es la concentración de sedimentos en suspensión,  $w_s$  es la velocidad de sedimentación de las partículas,  $\varepsilon_{s,x}$ ,  $\varepsilon_{s,y}$  y  $\varepsilon_{s,z}$  son las difusividades de remolino en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$  respectivamente y por último  $u$ ,  $v$ , y  $w$  son las componentes de la velocidad del flujo en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$  respectivamente. Las velocidades locales del flujo y las difusividades de remolino son obtenidas de los cálculos hidrodinámicos. El sedimento en suspensión comúnmente es expresado a través de una concentración, es decir la cantidad de gramos contenidos en un litro de la mezcla fluido-sedimento (masa de los sedimentos con respecto al volumen del fluido).

## 3.2. Descripción del Modelo Numérico

En esta sección se presenta una descripción de la información de entrada utilizada para realizar las simulaciones hidrodinámicas, pasando por el dominio de cálculo y por la definición e imposición de las condiciones de frontera.

### 3.2.1. Dominio de cálculo

Para llevar a cabo la modelación matemática deseada es necesario delimitar el dominio de cálculo tanto en el plano x-y como en la profundidad. Para el primer caso se hace uso de la línea de costa, mientras en el segundo se toma información de batimetría y de topografía. El área de estudio fue discretizada en una malla curvilínea conformada

por 34717 celdas en el plano horizontal. La resolución de la malla varía entre aproximadamente 100 *m* en cercanías a la línea de costa hasta aproximadamente los 300 *m* en aguas profundas. El contorno de la malla sigue la línea de costa trazada a partir de las cartas náuticas No. 408 y No. 409, editadas respectivamente en los años 1999 y 2004 por el CIOH. En la Figura 3.1 se presenta el dominio de cálculo.

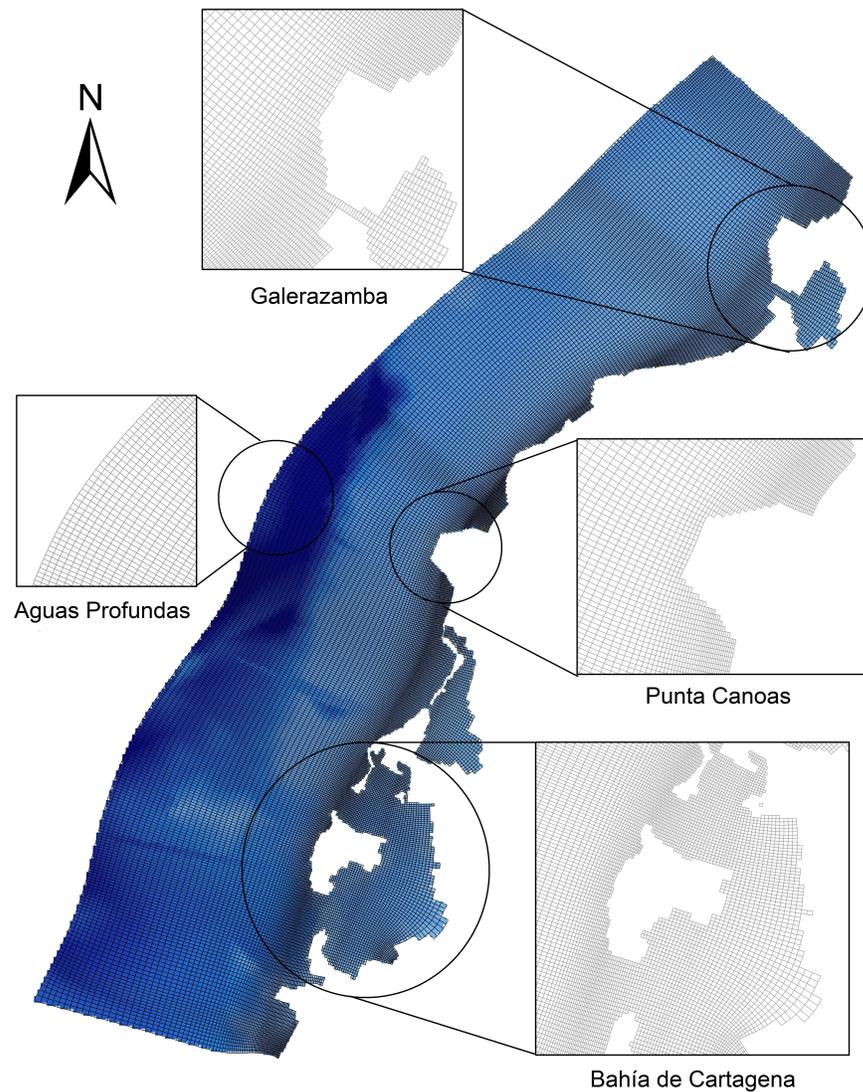


Figura 3.1: Malla de cálculo

### 3.2.2. Condiciones de Frontera

Las simulaciones realizadas cuentan con tres tipos de condiciones de frontera, las cuales representan los límites del modelo y su interacción con el resto del océano, corresponden con los procesos que se incluyen: hidrodinámicas (corrientes, mareas) y oleaje. En el caso de las mareas se ingresaron niveles de mar con una frecuencia horaria, para el caso de corrientes se ingresó la componente perpendicular de éstas a la frontera de interés cada hora, mientras que para el oleaje se ingresaron series de tiempo de altura significativa, período pico y dirección de oleaje con una resolución temporal de 3 horas. Las fronteras del modelo son introducidas a éste mediante puntos de control que las delimitan y en los cuales se asignan valores a las respectivas variables, los valores en los puntos intermedios se calculan mediante interpolación. Para determinar los puntos de control necesarios para cada uno de los tipos de frontera se procedió a analizar el comportamiento de las respectivas variables a lo largo de las fronteras.

#### 3.2.2.1. Mareas y Corrientes

Inicialmente en la construcción del modelo, las condiciones de frontera consistían únicamente en niveles de mar (obtenidos a partir del modelo TMD, mareas astronómicas) como se aprecia en la Figura 3.2. Los niveles de marea se ingresan en puntos en los cuales se dividen las fronteras del modelo, para un periodo de tiempo determinado. Para determinar el número de puntos adecuado para dividir las fronteras del modelo, se observó la variación media de la marea entre los distintos puntos definidos para un periodo correspondiente a un ciclo mareal. La Figura 3.2 muestra los puntos iniciales (10) entre los cuales se realizaron las comparaciones, se seleccionaron puntos entre los cuales se observaron variaciones suaves, las cuales pueden reproducirse correctamente mediante interpolación lineal, la Figura 3.3 muestra los puntos finales seleccionados para cálculos relativos a mareas (niveles de mar) en la frontera abierta del modelo de la región de Cartagena.

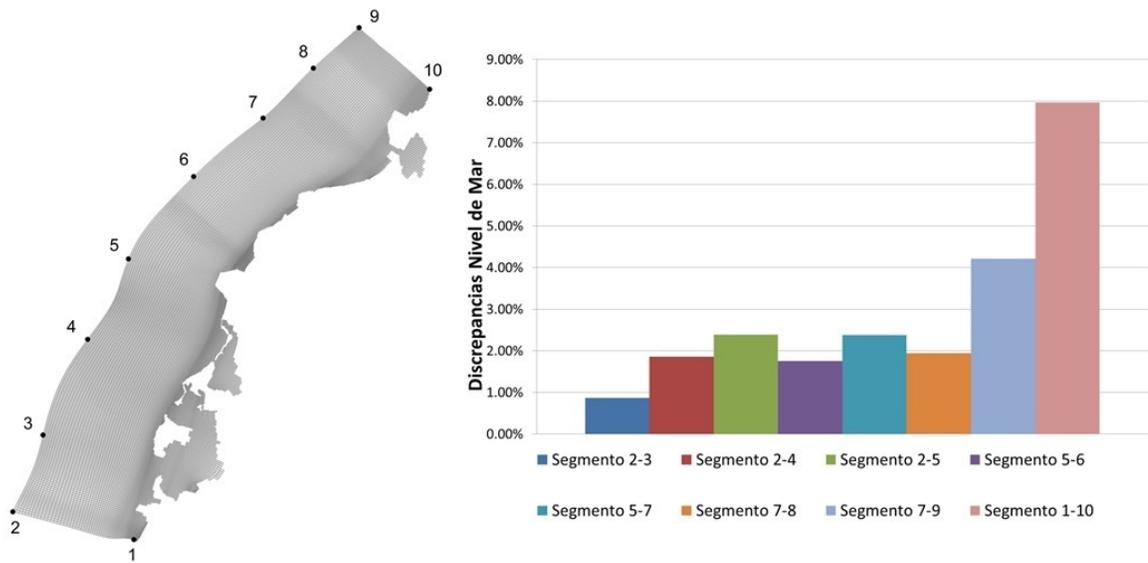


Figura 3.2: Segmentos iniciales escogidos para análisis de marea y Discrepancias de Niveles de Mar.

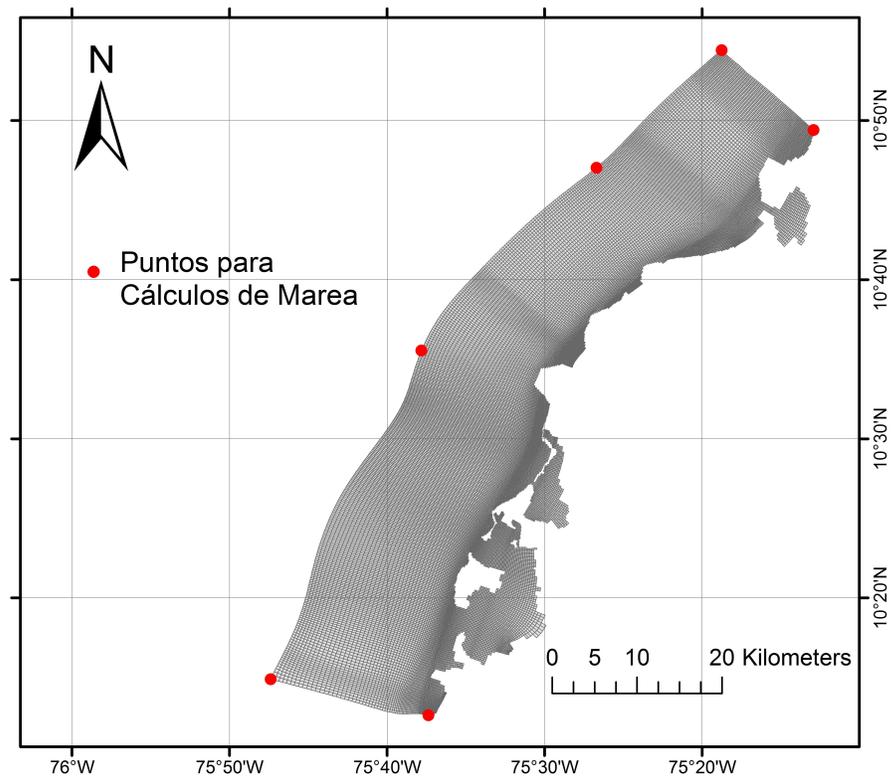


Figura 3.3: Puntos Seleccionados para Cálculos de Marea

Posteriormente, luego de la realización de algunas corridas de verificación con el modelo para diferentes temporadas climáticas características de la región de estudio (Seca y lluviosa), se determinó que al ingresar únicamente condiciones de frontera de tipo marea, el modelo construido, de acuerdo a lo observado en otros modelos y a la experiencia de los modeladores, presentaba inconsistencias en los patrones de corrientes, por lo que se optó por una nueva configuración de las condiciones de frontera, optándose por una mezcla de series de tiempo de mareas y corrientes. La configuración seleccionada es presentada en la Figura 3.4, donde se aprecia que para lograr una correcta reproducción de patrones de corrientes se necesitó imponer condiciones de frontera de éste tipo en algunas fronteras externas del modelo.

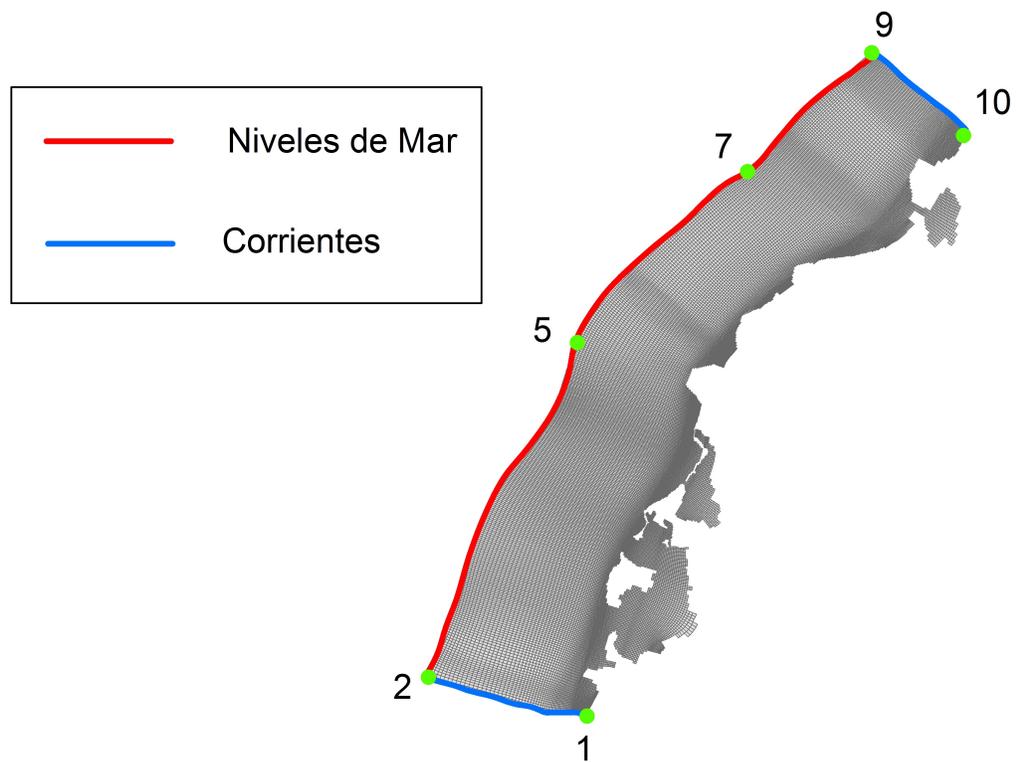


Figura 3.4: Nueva Distribución Tipo de Frontera

Para el fin anterior se realizó un anidamiento con el modelo del Caribe desarrollado por Ruiz Sarrazola (2015), haciendo uso de la funcionalidad NESTHD proporcionada por la plataforma Delft3D. Para tal fin se realizaron primero simulaciones con el modelo global del Caribe, para así obtener condiciones de frontera tipo corriente para el modelo anidado de Cartagena, dichas condiciones fueron impuestas en los segmentos 1-2 y 9-10

mostrados en la Figura 3.4. En la Figura 3.5 se observan las mallas de ambos modelos (Global y anidado). Mayores detalles de dicha funcionalidad se pueden encontrar en Deltares (a).

Para el caso de las condiciones de frontera conformadas por series de tiempo de niveles de mar, se recurrió a información proveniente del mareógrafo situado en la ciudad de Cartagena y administrado por el UHSLC (University of Hawaii Sea Level Center) (UHSLC, 2014). De él se obtuvieron series de tiempo de resolución horaria que fueron impuestas en la frontera del modelo comprendida entre los puntos 2 y 9 mostrados en la Figura 3.4.

#### 3.2.2.2. Oleaje

Para el análisis de oleaje se realizó un procedimiento similar al realizado en el análisis de mareas, inicialmente fueron seleccionados 7 puntos con los que se formaron segmentos y en los cuales se calculó la altura significativa promedio del oleaje para 2 temporadas marcadas de la región, una seca (Febrero) y otra lluviosa (Octubre). Con los promedios obtenidos para cada segmento en cada temporada se comparó la discrepancia de dicho segmento con respecto al siguiente en cada una de las temporadas. En el análisis se identificó que en ambas temporadas las discrepancias más grandes y más pequeñas se presentaban en los mismos segmentos. En la Figura 3.6 se presentan los segmentos iniciales así como la gráfica de discrepancias de la altura significativa ( $H_s$ ) del oleaje para la temporada lluviosa para cada segmento.

Las mayores discrepancias de la altura significativa ( $H_s$ ) del oleaje se presentaron en los segmentos 1-2 y 6-7, en dichos segmentos no se realizaron más divisiones porque cualquiera que se hiciese recaía dentro de la misma celda de la malla del WAVEWATCH III ® (Tolman, 1997). En la Figura 3.7 se observan los puntos finales seleccionados para cálculos relativos a oleaje en la frontera abierta del modelo de la región de Cartagena.



Figura 3.5: Malla Modelo Cartagena anidada en Malla Modelo Caribe

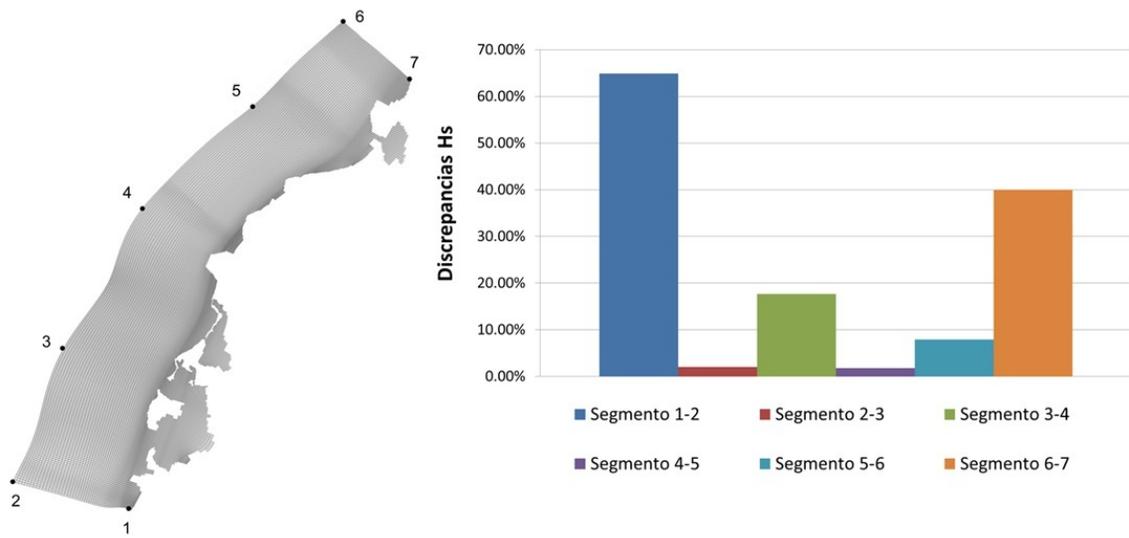


Figura 3.6: Segmentos iniciales escogidos para análisis de oleaje y Discrepancias Hs del Oleaje en la Temporada Lluviosa

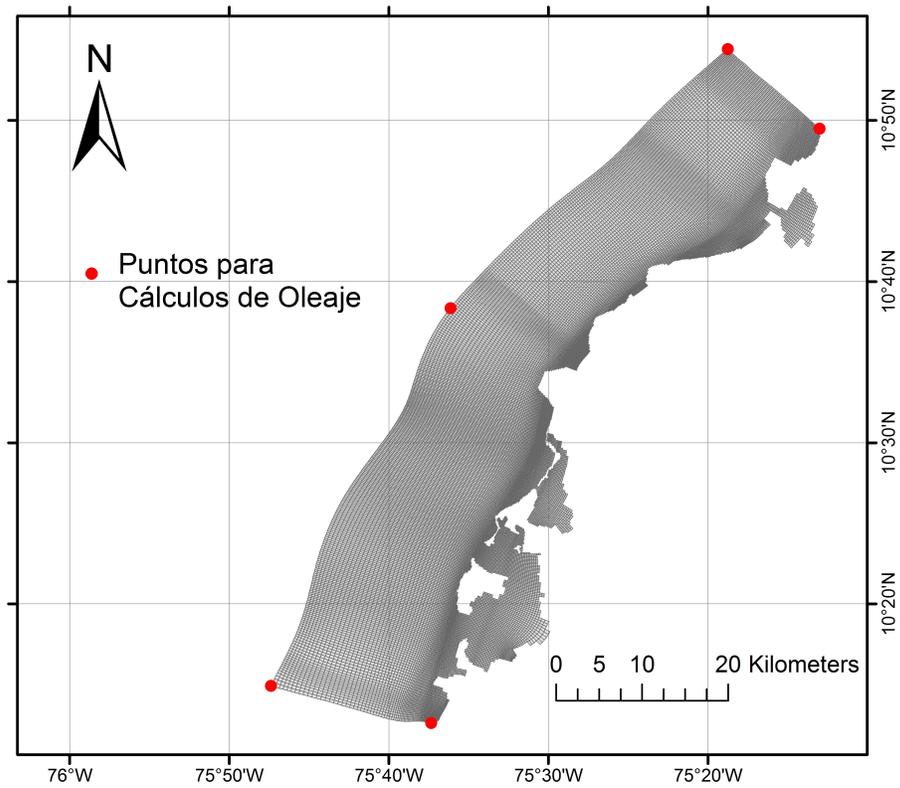


Figura 3.7: Puntos Seleccionados para Cálculos de Oleaje

### 3.3. Análisis de Sensibilidad

En la primera fase de la modelación numérica se realizó un análisis de sensibilidad espacial, con el cual se buscó encontrar en qué grado los resultados del modelo fueron afectados por la variación de los parámetros numéricos analizados. En el análisis de sensibilidad se siguió la metodología propuesta por Escobar (2010), en la cual se hacen comparaciones celda a celda entre una simulación denominada patrón, y simulaciones en las cuales se alteran los parámetros de interés. A través de la metodología anterior se determinó la afectación de los resultados del modelo causada por la variación de los parámetros numéricos sometidos a análisis, así como la influencia de éstos en el costo computacional que implican las distintas configuraciones..

El análisis de sensibilidad se realizó para el periodo de Febrero de 2010, fecha que recae dentro de la llamada temporada seca de la región, y que se caracteriza por presentar condiciones de viento y oleaje más fuertes que los acaecidos en la lluviosa. En la Tabla 3.1 se aprecian los rangos de variación de cada uno de los parámetros numéricos analizados. Los valores que se encuentran en negrilla corresponden a valores utilizados en la simulación considerada patrón. Las simulaciones modificadas o alteradas fueron iguales a la patrón, pero se les modificó el parámetro de interés con la intención de establecer el efecto de éste en el comportamiento de la variable que se estuviera analizando (Nivel de mar, velocidad promediada y altura significativa del oleaje).

Nombre del Parámetro	Valor en cada simulación
Intervalo de tiempo hidrodinámico (min)	<b>0.1</b> - 0.5 - 1 - 2
Intervalo de tiempo oleaje (min)	<b>60</b> - 180 - 360
Numero de celdas de la malla	<b>53081</b> - 43022 - 34717 - 8441

Tabla 3.1: Valores de los parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad

Adicional a los parámetros enumerados en la Tabla 3.1, se corrieron simulaciones incluyendo y excluyendo oleaje, esto con el objetivo de observar el efecto de éste en los resultados. De igual manera se corrió una simulación 2D y una 3D para apreciar diferencias debidas a esto en los resultados. Una vez corridas las simulaciones patrón y modificadas, se procedió a calcular las diferencias absolutas ( $MAE^*$ ) promedio así como las diferencias absolutas relativas ( $RMAE^*$ ) promedio en la variable que se deseaba analizar para cada par de simulaciones. Para lo anterior se calculó la diferencia absoluta entre la variable de interés obtenida de la simulación patrón y la obtenida de la simulación modificada en cada una de las celdas de la malla; luego estas diferencias absolutas

fueron promediadas en el tiempo. Para el anterior fin se utilizaron las ecuaciones 3.6 y 3.7.

$$MAE^* = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{t_f} |Vp_t - Vm_t| \quad (3.6)$$

$$RMAE^* = \frac{MAE^*}{\frac{1}{T} \sum_{t=t_0}^{t_f} |Vp_t|} \quad (3.7)$$

donde  $MAE^*$  y  $RMAE^*$  no representan otra cosa que los errores  $MAE$  y  $RMAE$  modificados, donde para el caso de las observaciones se tomó la información procedente del modelo tomado como patrón.  $Vp_t$  es el valor de la variable de interés en el tiempo  $t$  en la simulación patrón,  $Vm_t$  es el valor de la variable de interés en el tiempo  $t$  en la simulación modificada,  $t_0$  es el tiempo de inicio de la simulación,  $t_f$  es el tiempo de finalización de la simulación y  $T$  es el número total de tiempos de las simulaciones. Las diferencias de la variable de interés en cada una de las celdas se denominan como diferencias locales, mientras que el promedio de las diferencias de todas las celdas de la malla es denominado diferencia global.

### 3.3.1. Intervalo temporal de cálculo hidrodinámico

Se corrieron modelos con intervalos temporales de cálculo hidrodinámicos con valores de 0.1 (tomado como patrón), 0.5, 1 y 2 minutos. Para la variación de este parámetro se observó el comportamiento de las variables nivel de mar, velocidad promediada del flujo y altura significativa del oleaje. Para el caso de nivel de mar se observa en la Figura 3.8 que los mayores errores relativos se presentaron con el intervalo de 2 minutos en casi la totalidad del dominio, mientras que con los intervalos de 1 y 0.5 minutos estos son menores al 1% en la mayoría del dominio, presentando algunos valores entre el 1% y el 3% en cercanías a la línea de costa, pero definitivamente siendo menores con el valor de 0.5.

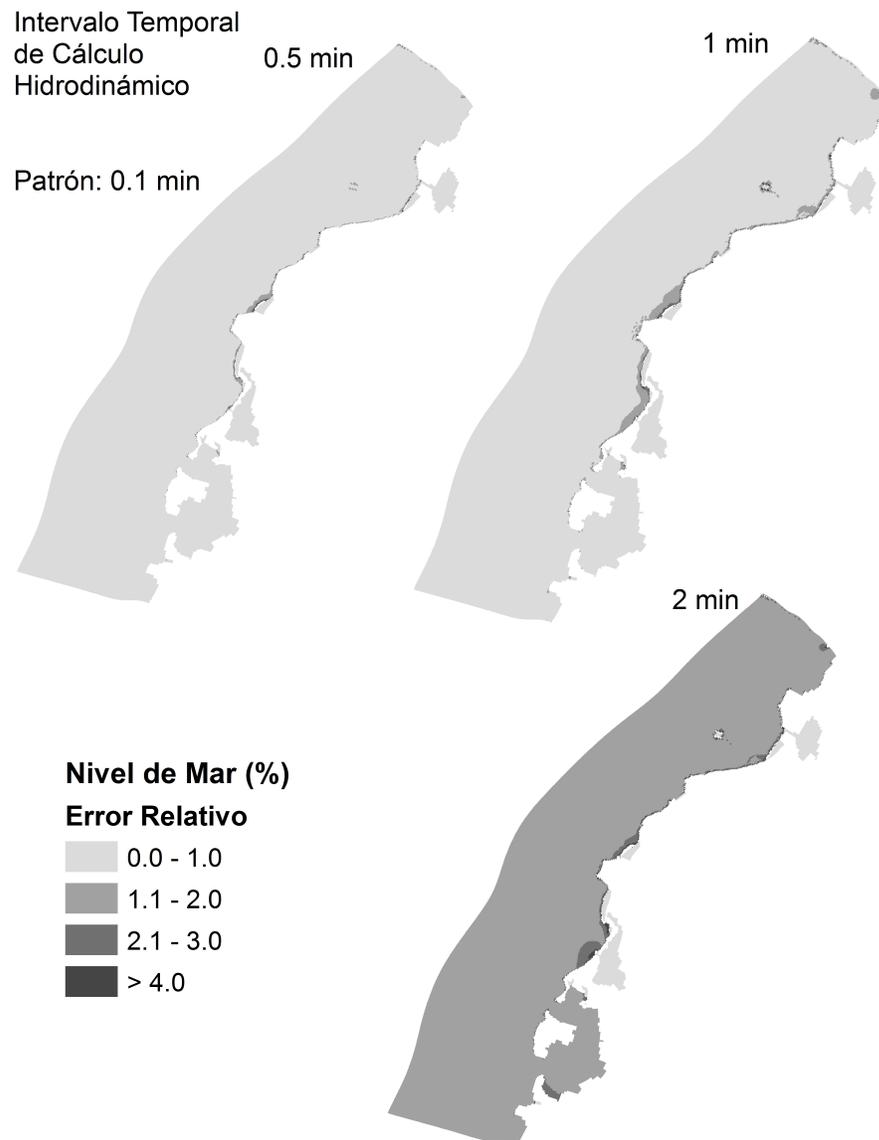


Figura 3.8: Variación espacial del efecto del intervalo de cálculo en el nivel de mar

En el caso de la velocidad promediada se observa en la Figura 3.9 que los mayores errores relativos se presentaron nuevamente con el intervalo de 2 minutos, siendo estos mayores a 4% en inmediaciones de la línea de costa, con el intervalo de 1 minuto estos se reducen un poco en aguas profundas, pero los errores cerca a la línea de costa se mantienen, mientras que con el intervalo de 0.5 se observa una mejora grande en todo el dominio, a la vez que se observa una reducción espacial de la franja cercana a la línea

costera que presentaba errores mayores al 4%.

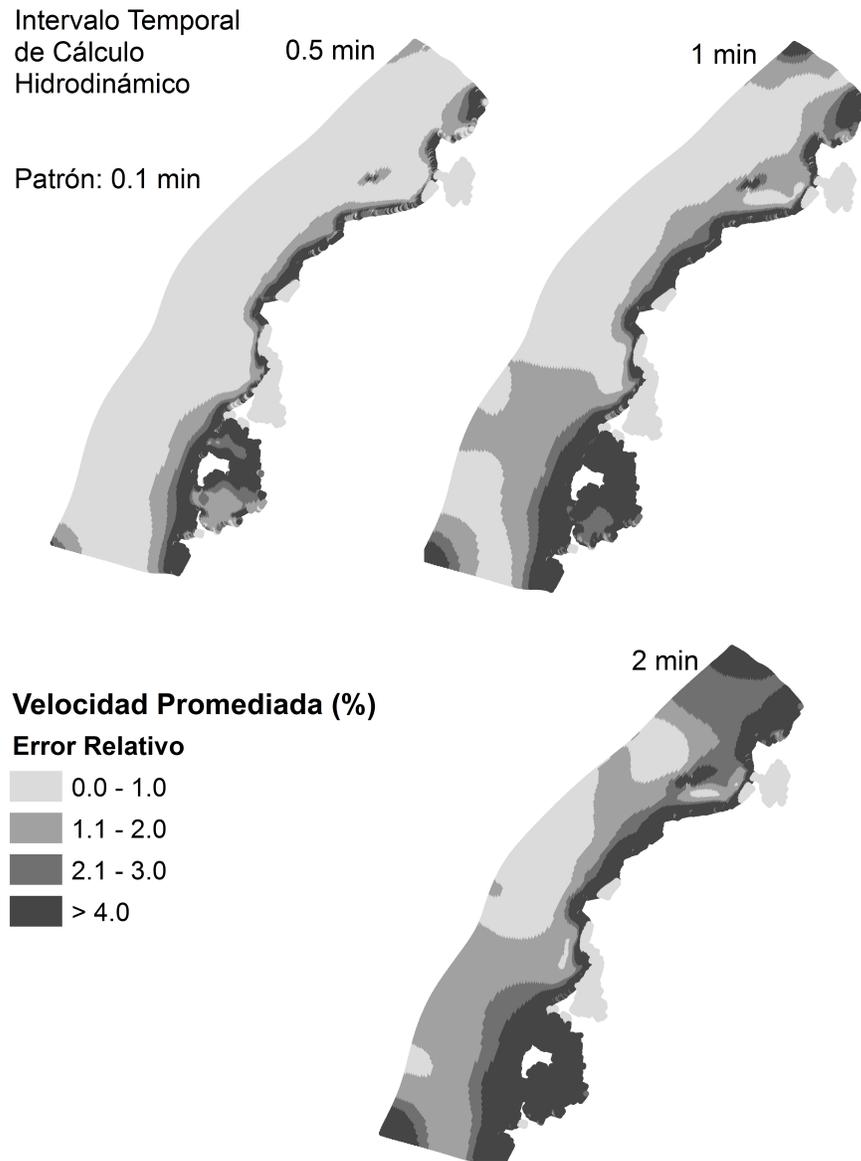


Figura 3.9: Variación espacial del efecto del intervalo de cálculo en la velocidad promediada

En el caso de la altura significativa del oleaje se observa en la Figura 3.10 que los errores relativos en todo el dominio son menores al 1% para todos los intervalos de cálculo hidrodinámico evaluados, lo cual indicó que el oleaje no sufrió mayores afectaciones por la variación de este parámetro numérico.

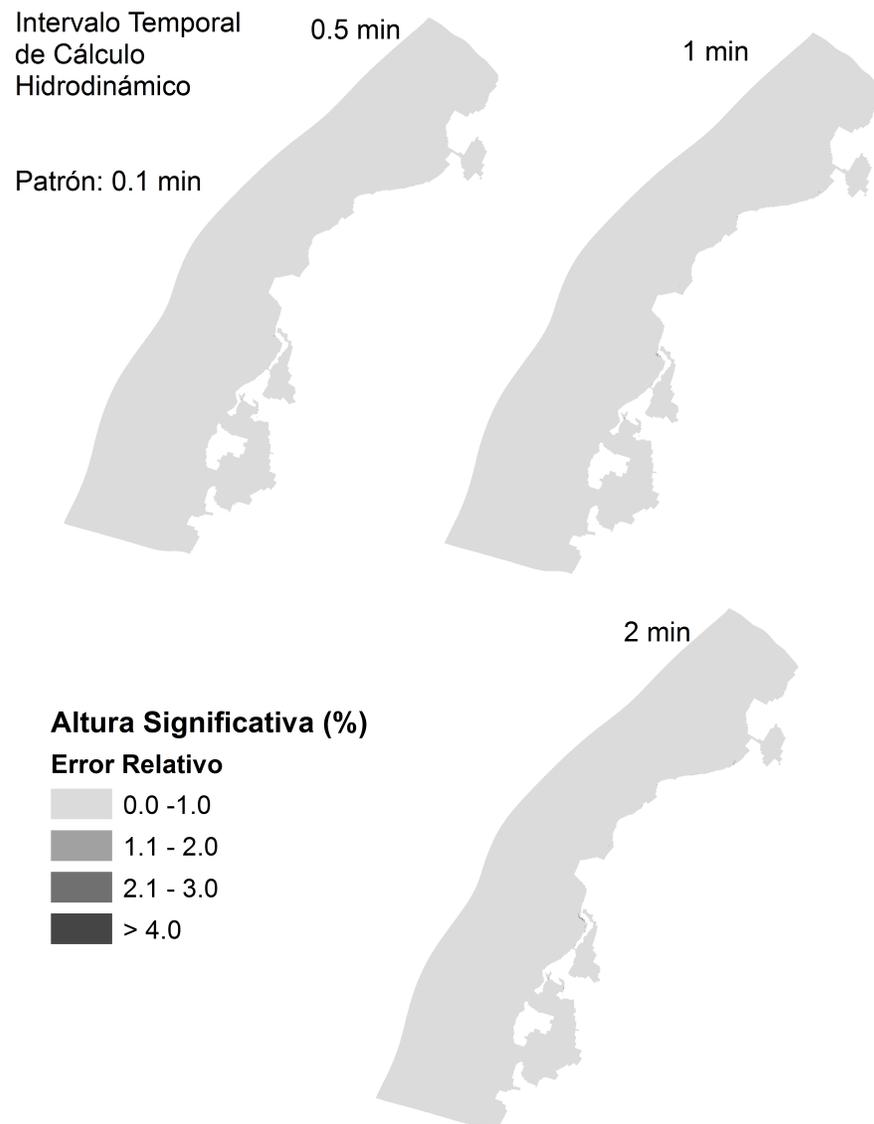


Figura 3.10: Variación espacial del efecto del intervalo temporal de cálculo hidrodinámico en la altura significativa del oleaje

En las Tablas 3.2 a 3.4 se presentan para cada una de las simulaciones realizadas los errores globales promedio tanto relativos como absolutos en la solución en términos de nivel de mar, velocidad promediada y altura significativa respecto a la encontrada con la simulación patrón. Se aprecia que con el intervalo de cálculo hidrodinámico de 0.5 minutos no se presentaron diferencias significativas en la solución para ninguna de las tres variables analizadas.

Caso	Intervalo temporal (min)	MAE* (mm)	RMAE* (%)
1	0.5	0.33	0.44
2	1	0.64	0.86
3	2	1.23	1.63

Tabla 3.2: Intervalo temporal de cálculo hidrodinámico y su efecto en la modelación numérica (Nivel de mar)

Caso	Intervalo temporal (min)	MAE* (cm/s)	RMAE* (%)
1	0.5	0.104	1.84
2	1	0.178	3.11
3	2	0.293	4.89

Tabla 3.3: Intervalo temporal de cálculo hidrodinámico y su efecto en la modelación numérica (Velocidad promediada)

Caso	Intervalo temporal (min)	MAE* (mm)	RMAE* (%)
1	0.5	0.43	0.05
2	1	0.68	0.08
3	2	0.99	0.11

Tabla 3.4: Intervalo temporal de cálculo hidrodinámico y su efecto en la modelación numérica (Altura significativa)

### 3.3.2. Intervalo temporal de cálculo de oleaje

Otro de los parámetros sometidos a análisis fue el intervalo temporal de cálculo de oleaje. Se corrieron modelos con intervalos temporales de cálculo de oleaje con valores de 60 (tomado como patrón), 180 y 360 minutos. Para analizar la variación de este parámetro se observó el comportamiento de las variables nivel de mar, velocidad promediada del flujo y altura significativa del oleaje. En la Figura 3.11 se observa que para la variable nivel de mar con ambos intervalos los errores relativos son menores al 1% en la mayor parte del dominio, a excepción de algunas zonas próximas a la línea de costa entre Bocagrande y Galerazamba donde éstos superan el 4%. Estos errores cercanos a la franja costera se minimizan en el intervalo de 180 minutos. Para la velocidad promediada se observa que al usar el intervalo de 180 minutos los errores relativos cercanos a línea de costa son menores a los presentados con el intervalo de 360, además se presenta una reducción general de los errores en el dominio.

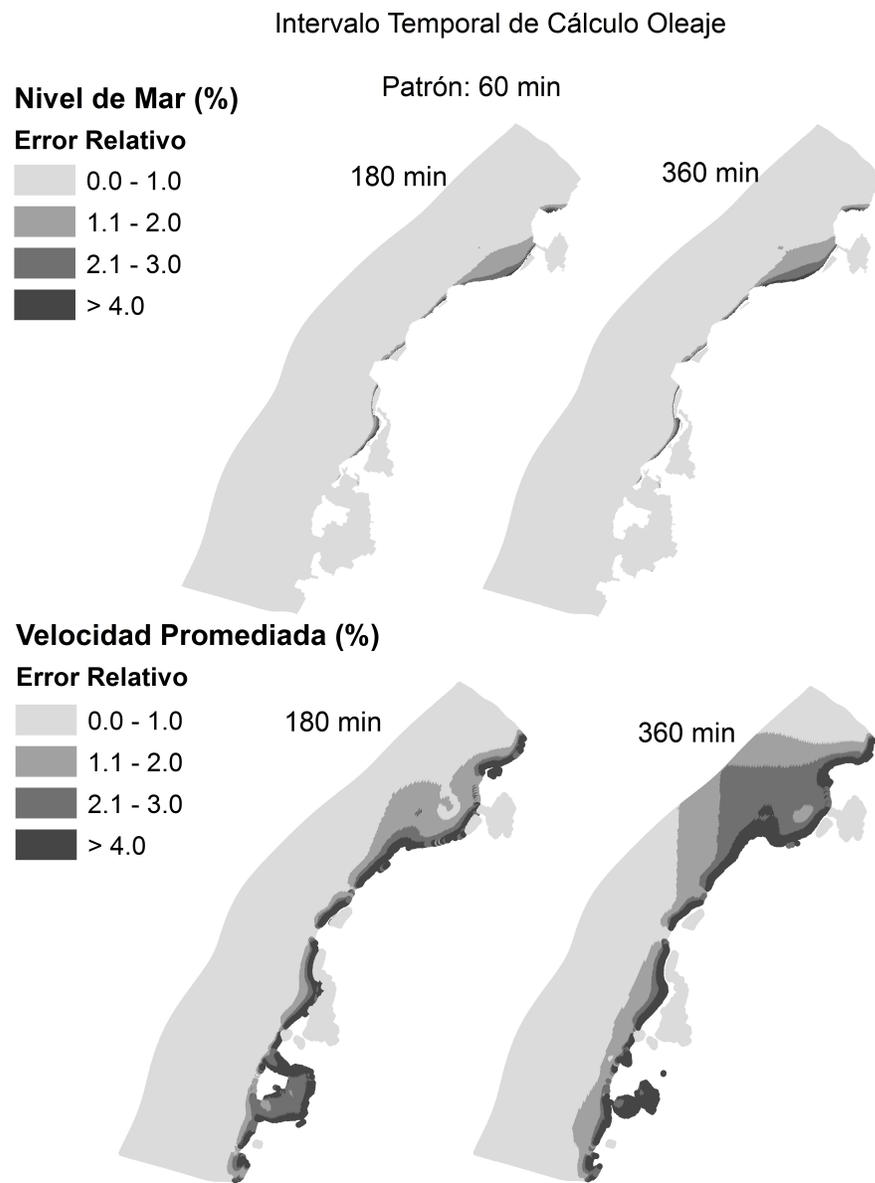


Figura 3.11: Variación espacial del efecto del intervalo temporal de cálculo de oleaje en el nivel de marea y en la velocidad promediada

En la Figura 3.12 se aprecia que para el caso de la altura significativa del oleaje los errores relativos en todo el dominio son menores al 1% para ambos intervalos (180-360).

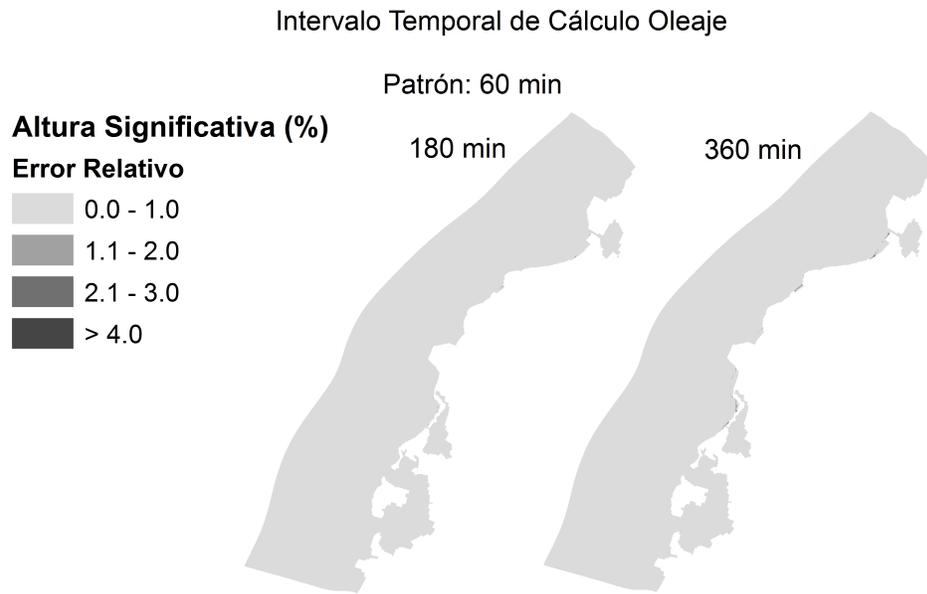


Figura 3.12: Variación espacial del efecto del intervalo temporal de cálculo de oleaje en la altura significativa del oleaje

En la Tablas 3.5 a 3.7 se presentan para cada una de las simulaciones realizadas los errores tanto absolutos como relativos promedio a nivel global en la solución en términos de nivel de mar, velocidad promediada y altura significativa respecto a la encontrada con la simulación patrón. Se aprecia que las menores diferencias a nivel local y global en la solución se obtuvieron al utilizar un intervalo de cálculo de oleaje de 180 minutos. En esta parte se optó por ser conservadores, buscando una reproducción más continua del oleaje, dada la importancia de este fenómeno en el transporte de sedimentos, por lo que se eligió el valor de 180.

Caso	Intervalo temporal (min)	$MAE^*$ (mm)	$RMAE^*$ (%)
1	180	0.24	0.32
2	360	0.31	0.42

Tabla 3.5: Intervalo temporal de cálculo de oleaje y su efecto en la modelación numérica (Nivel de mar)

Caso	Intervalo temporal (min)	MAE* (cm/s)	RMAE* (%)
1	180	0.090	2.11
2	360	0.169	3.35

Tabla 3.6: Intervalo temporal de cálculo de oleaje y su efecto en la modelación numérica (Velocidad promediada)

Caso	Intervalo temporal (min)	MAE* (mm)	RMAE* (%)
1	180	0.38	0.05
2	360	0.71	0.09

Tabla 3.7: Intervalo temporal de cálculo de oleaje y su efecto en la modelación numérica (Altura significativa)

### 3.3.3. Número de Celdas

El siguiente parámetro analizado fue el número de celdas en el que el dominio de cálculo fue discretizado. La malla con mayor refinamiento (considerada patrón) constaba de 53081 celdas, mientras los demás modelos tuvieron mallas con 43022, 34717 y 8441 celdas. Los resultados obtenidos de las diferentes mallas para las variables de interés nivel de mar, velocidad promediada y altura significativa del oleaje fueron interpolados a una misma superficie, de tal manera que los resultados de interés pudieran ser comparados mediante la metodología implementada hasta el momento, mediante la cual se calcularon la diferencias absolutas y relativas promedio tanto locales como globales. Los resultados de las comparaciones se aprecian en las tablas 3.8 a 3.10.

Caso	Número de Celdas	MAE* (mm)	RMAE* (%)
1	43022	0.5107	0.68
2	34717	1.2639	1.67
3	8441	3.4721	4.52

Tabla 3.8: Número de Celdas y su efecto en la modelación numérica (Nivel de Mar)

Caso	Número de Celdas	$MAE^*$ (cm/s)	$RMAE^*$ (%)
1	43022	0.7177	5.22
2	34717	1.500	11.40
3	8441	1.8799	21.95

Tabla 3.9: Número de Celdas y su efecto en la modelación numérica (Velocidad Promediada)

Caso	Número de Celdas	$MAE^*$ (cm)	$RMAE^*$ (%)
1	43022	1.2712	1.22
2	34717	6.2141	5.67
3	8441	10.6759	9.51

Tabla 3.10: Número de Celdas y su efecto en la modelación numérica (Altura significativa)

Entre los diferentes números de celdas utilizados en la simulaciones propuestas, se observa que los mínimos errores tanto absolutos como relativos promedio globales se presentan utilizando el número de celdas igual a 43022, pero al comparar la mejoría de estos resultados con los obtenidos al utilizar un dominio de cálculo de 34717 elementos, ésta no supera en el caso de todas las variables el 7%, pero si se incurriría en un alto costo computacional elevar el número de celdas del dominio en combinación con los intervalos temporales de cálculo de hidrodinámica y de oleaje escogidos, volviendo así el tiempo de cómputo de la simulaciones demasiado extenso. Por lo que al observar que los resultados provenientes de la malla de 34717 no difieren en más del 7% de los obtenidos de la de 43022 respecto a la patrón, se opta por elegir como número de celdas óptimo el valor de 34717.

### 3.3.4. Simulación excluyendo oleaje

Se corrieron 2 modelos de los cuales en uno se incluyó el oleaje, y en el otro se excluyó. Para estas 2 simulaciones se observó el comportamiento de las variables nivel de mar y velocidad promediada del flujo. Para el caso del nivel de mar se observa en la Figura 3.13 que en la mayor parte del dominio los errores relativos son menores al 2%, salvo algunos sectores en cercanías a la línea de costa entre Bocagrande y Galerazamba, donde en algunos tramos se observan errores mayores al 2%. Con relación a la velocidad promediada es notorio el efecto de la falta de oleaje en la parte norte del dominio (Punta Canoas-Galerazamba), sector del domino que presenta los mayores errores relativos,

superiores al 10 %.

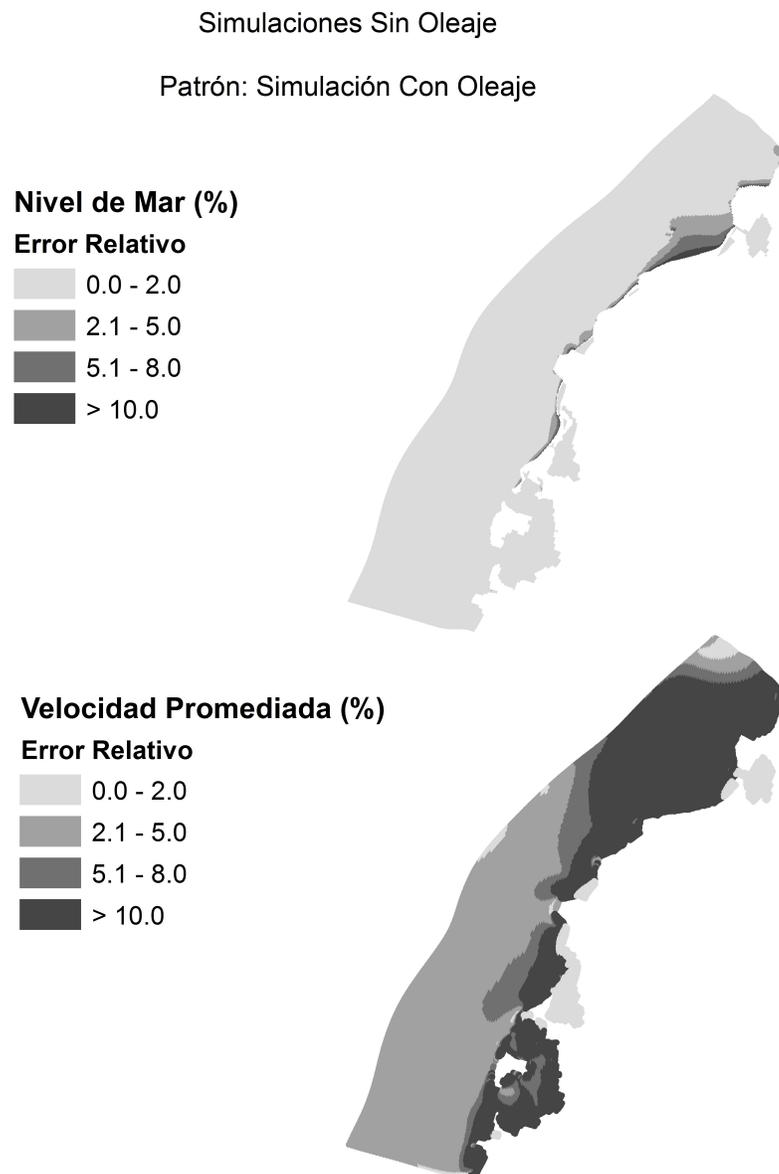


Figura 3.13: Variación espacial del efecto de la no inclusión del oleaje en el nivel de mar y en la velocidad promediada

En la Tabla 3.11 se presenta para la simulación sin oleaje realizada los errores tanto absolutos como relativos a nivel global en la solución en términos de nivel de mar y velocidad promediada respecto a la encontrada con la simulación patrón que incluyó oleaje. Es evidente la influencia del oleaje en la solución, aunque dicho efecto es más notorio en la variable velocidad promediada, pues fue esta la variable que presentó los mayores

errores relativos en gran parte del dominio. De acuerdo a lo anterior se optó por incluir el módulo de oleaje en la simulación numérica, ya que se logra una mejoría de alrededor del 12% en el 50% de las variables analizadas, y además su costo computacional todavía es aceptable, ya que la simulaciones para periodos largos de tiempo (3-4 meses) requieren a lo sumo de 5-6 días de cómputo.

Variable	$MAE^*$	$RMAE^*$ (%)
Nivel de Mar ( $mm$ )	1.13	1.53
Velocidad Promediada ( $cm/s$ )	0.968	12.65

Tabla 3.11: Efecto de la inclusión y no inclusión del oleaje en la modelación numérica

### 3.3.5. Simulación 3D comparada con 2D

Para observar el efecto sobre las variables de interés al modelar en 2 ó 3 dimensiones se corrieron 2 simulaciones, cuyo objetivo fue determinar si el costo computacional de una implementación 3D del modelo era justificada o no, basando esta elección en la mejoría de los resultados. En la Figura 3.14 se observa que en el caso de nivel de mar los errores relativos en la mayor parte del dominio se encuentran por debajo del 1%, además de acuerdo con la tabla 3.12 los errores absolutos y relativos promedio globales no superan los 1.5  $mm$  y el 1.9% respectivamente. Para el caso de la velocidad promediada se tuvo prácticamente el mismo comportamiento que con el nivel de mar, presentando un error relativo promedio global cercano al 2%. Mientras que para la variable altura significativa del oleaje, en la mayor parte del dominio los errores relativos se encuentran por debajo del 2%, mientras que el error absoluto promedio global fue de 8.86  $mm$ .

En la Tabla 3.12 se presenta el resumen con los errores absolutos y relativos promedio globales en la solución en términos de nivel de mar, velocidad promediada y altura significativa de la simulación 3D comparada con la simulación 2D. De acuerdo con lo mostrado en la Tabla es visible que el efecto que sufren las variables analizadas al simular en 2D o 3D (5 capas con espesor uniforme) es mínimo, hecho que se refleja en errores promedio globales menores todos al 2.1%. De acuerdo con lo anterior se optó por elegir la simulación numérica en dos dimensiones, ya que al implementar la simulación en 3 dimensiones no se presentó una mejoría significativa en ninguna de las variables analizadas, pero sí se incurrió en un muy alto costo computacional.

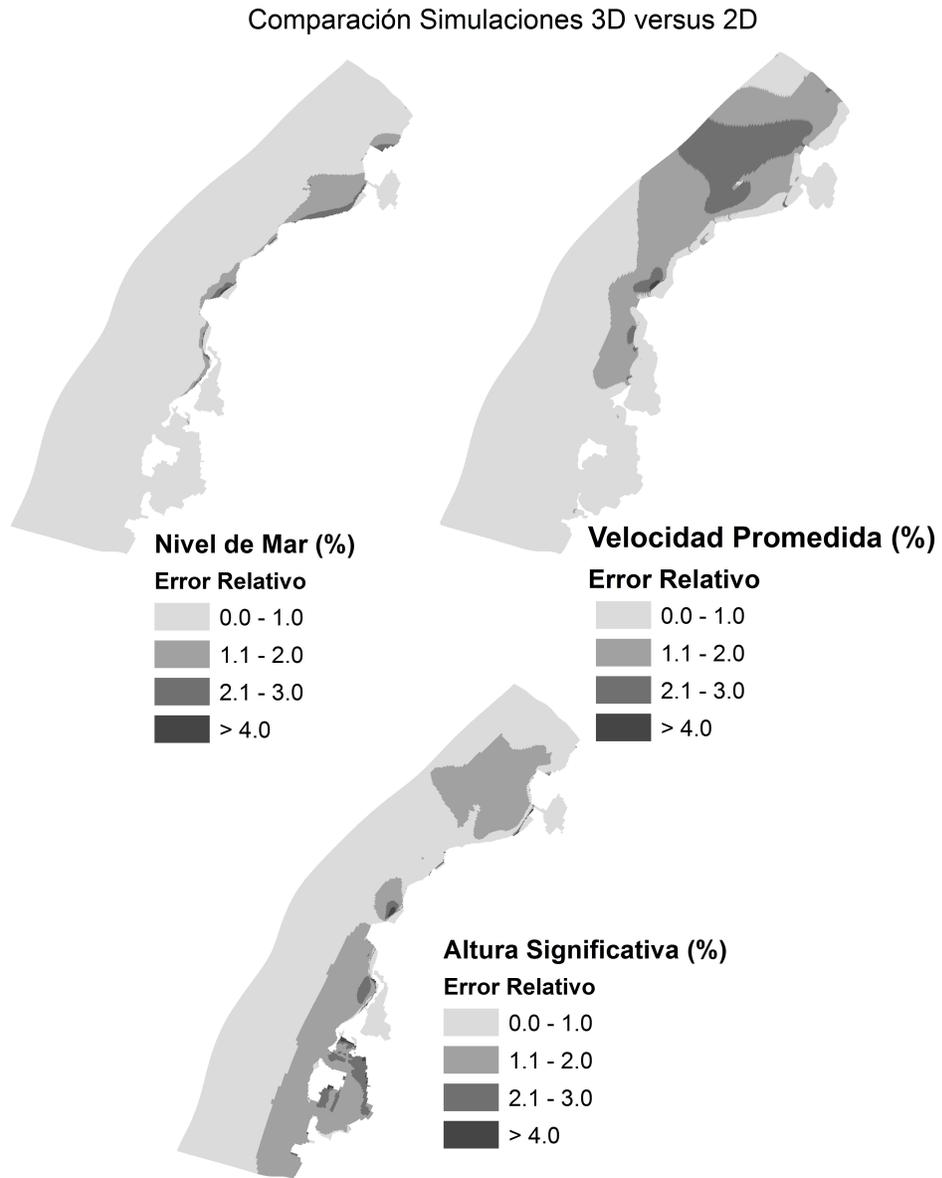


Figura 3.14: Variación espacial del efecto de la simulación en 3D

<b>Variable</b>	<i>MAE*</i>	<i>RMAE*</i> (%)
Nivel de Mar ( <i>mm</i> )	1.41	1.86
Velocidad Promediada ( <i>cm/s</i> )	1.40	2.01
Altura Significativa ( <i>mm</i> )	8.86	1.06

Tabla 3.12: Efecto de realizar la simulación 3D y 2D

De acuerdo a lo observado en el análisis de sensibilidad, el modelo para la Región de

Cartagena será bidimensional e incluirá oleaje. Los parámetros numéricos seleccionados para su utilización en las simulaciones posteriores son presentados en la Tabla 3.13.

<b>Párametro</b>	<b>Valor</b>
Número de Celdas	34717
Intervalo de Tiempo Hidrodinámico ( <i>min</i> )	0.5
Intervalo de Tiempo de Oleaje ( <i>min</i> )	180

Tabla 3.13: Parámetros Numéricos Modelo de Cartagena

# Capítulo 4

## Desempeño y Evaluación de las Simulaciones Numéricas

En este capítulo se realizó la evaluación de las simulaciones numéricas mediante la comparación de información relativa a corrientes, oleaje y mareas provenientes de las mediciones de campo mencionadas en el Capítulo 2 con respecto a información obtenida de simulaciones para iguales periodos de tiempo. La primera etapa de la evaluación consistió en la calibración de distintos parámetros físicos que permitieran a las simulaciones obtener mejores predicciones de la realidad. Al momento de tener los parámetros físicos en su punto óptimo las simulaciones fueron validadas en otro periodo de tiempo, donde al igual que en la calibración se compararon mediciones y predicciones.

Para los procesos de calibración y validación, 3 estadísticos comúnmente utilizados en la evaluación de desempeño de modelos numéricos fueron tenidos en cuenta: el MAE (Mean Absolute Error), el RMAE (Relative Mean Absolute Error) y el ARMAE (Adjusted Relative Mean Absolute Error) (Sutherland et al., 2004), los cuales son descritos en las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3 respectivamente.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |p_i - t_i| \quad (4.1)$$

$$RMAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|p_i - t_i|}{|\langle t_i \rangle|} \quad (4.2)$$

$$ARMAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|p_i - t_i| - OE}{|\langle t_i \rangle|} \quad (4.3)$$

Donde  $p_i$  es el valor modelado,  $t_i$  es el valor medido,  $|\langle t_i \rangle|$  es el promedio de los valores absolutos de las mediciones,  $OE$  es el error de las observaciones y  $n$  es el número de datos. Para el caso del ARMAE se tiene que valores negativos en el numerador se convierten a cero antes de promediar. De acuerdo con campañas de medición realizadas, así como con lo reportado en la literatura (Sutherland et al., 2004; van Rijn et al., 2003), el error de observación (OE) para el oleaje fue fijado en valores de  $0.1 \text{ m}$  para los datos tomados en campañas y de  $0.033 \text{ m}$  ( $3 \text{ cm}$ ) para los provenientes del satélite JASON-2, en el caso de las corrientes el OE se fijó en  $0.05 \text{ m/s}$ . El MAE es comúnmente utilizado para medir la precisión, y junto con el RMAE son estadísticos preferidos para realizar la evaluación de desempeño de modelos numéricos sobre otros como el RMSE (Descrito en Capítulo 2), dado que los valores atípicos tiene poca influencia en ellos (van Rijn et al., 2003). Para la calibración y validación del modelo numérico construido se utilizó información recolectada en campañas de medición llevadas a cabo entre los meses de Abril, Mayo y Noviembre del año 2012 (Figura 4.1).

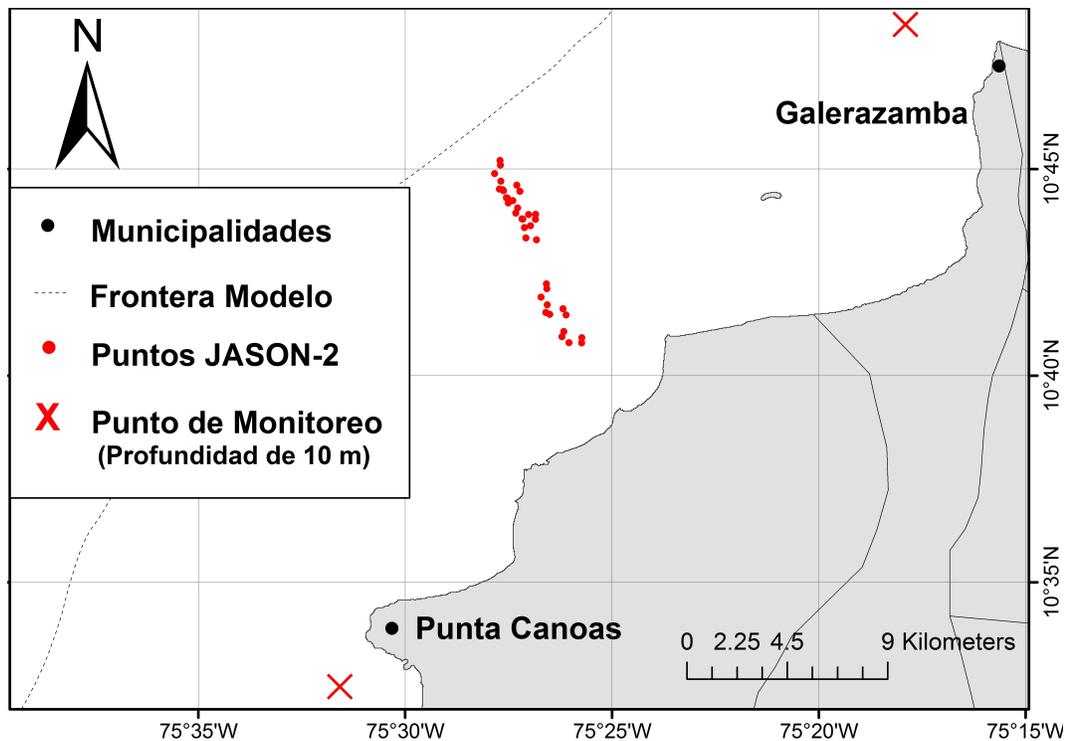


Figura 4.1: Ubicación Fuentes de Información Para Calibración y Validación

En dichas fechas se obtuvo información de corrientes con una resolución temporal de 10 minutos, información de oleaje con una resolución temporal de 60 minutos e información relativa a mareas con una resolución temporal de 30 minutos. Las mediciones se obtuvieron en dos puntos geográficos distintos, Galerazamba y Punta Canoas, a una profundidad de 10 m, adicionalmente se adquirió información del satélite JASON-2 (Figura 4.1), cuya resolución temporal es de aproximadamente 2 datos cada 10 días.

En la Figura 4.2 se aprecian los transectos de corrientes medidos tanto en temporada seca (Abril 26 a Mayo 2) como en temporada lluviosa (Noviembre 18 a 23) del año 2012. En cada punto de la trayectoria de los transectos se tomaron sondeos a diferentes profundidades en un mismo tiempo, posteriormente fueron promediados.

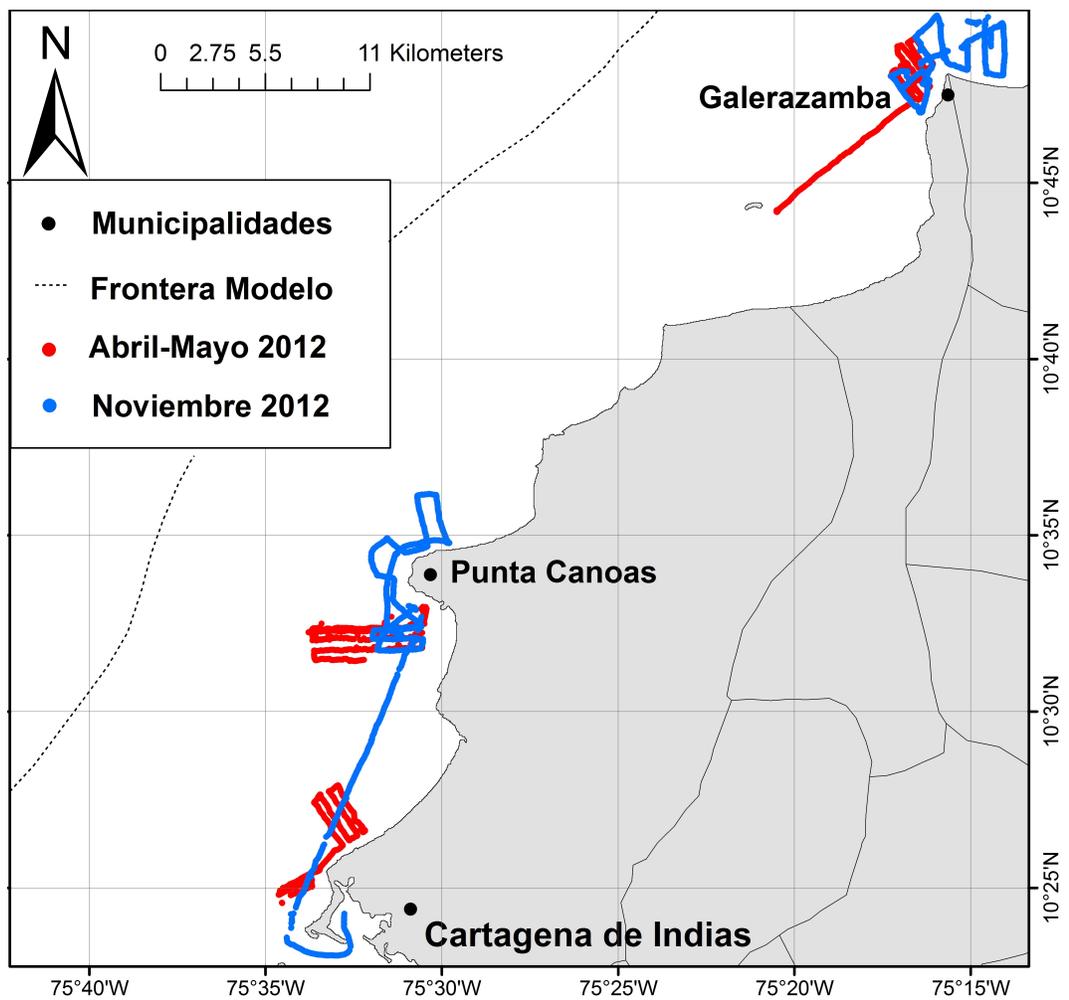


Figura 4.2: Ubicación Transectos Corrientes Calibración y Validación

## 4.1. Calibración

La calibración del modelo numérico es el proceso mediante el cual se ajustan los parámetros físicos de éste con el objetivo de obtener la mejor reproducción posible de la realidad, aun así es posible que al mejorar la calidad de los resultados para determinados periodos de tiempo o lugares, esta se pueda ver afectada en otros lugares o tiempos, por lo que se debe encontrar un punto de equilibrio. La calibración del modelo fue realizada con ayuda de los datos recolectados en la campaña de medición realizada entre el 17 y el 23 de Noviembre de 2012, de igual manera se utilizó información proveniente del satélite JASON-2 para el periodo de tiempo comprendido entre el 1 de Agosto y el 27 de Noviembre del mismo año. Adicional a los parámetros físicos sometidos a variación, se corrieron varias simulaciones utilizando diversas fuentes de información relativa a viento y oleaje, con la finalidad de encontrar la fuente más óptima.

Los valores de los parámetros, procesos y forzadores sometidos a variación se muestran en las Tablas 4.1, Tabla 4.2, Tabla 4.3 (En esta se mencionan procesos que pueden ser tenidos en cuenta en el oleaje, procesos como el cambio de la marea inducido por el oleaje, la difracción y el esquema del cálculo de la fuerza del oleaje (Wave Set-Up, Diffraction, RS = Radiation Stress, WEDR = Wave Energy Dissipation Rate)) y Tabla 4.4. Al fijar cada uno de los diferentes forzadores o parámetros numéricos se compararon la magnitud y dirección de las corrientes, así como la altura significativa y la dirección del oleaje simulados con los provenientes de las mediciones en los mismos tiempos, calculando los parámetros estadísticos MAE, RMAE y ARMAE.

<b>Forzamiento Atmosférico</b>	<b>Fuente</b>
Velocidad y Dirección Viento	NCAR
	NCAR + Información Aeropuerto Cartagena

Tabla 4.1: Forzamientos Atmosféricos sometidos a variación durante la calibración

<b>Forzamiento Oleaje</b>	<b>Fuente</b>
Características Oleaje (Hs, Dp, Tp)	WWIII
	WWIII + Información JASON-2
	Modelo Caribe
	Modelo Caribe + Información JASON-2

Tabla 4.2: Forzamientos de oleaje sometidos a variación durante la calibración

Proceso	Estado
Wave Set-Up	Activo - No Activo
Difraction	Activo - No Activo
Forces	RS - WEDR

Tabla 4.3: Procesos del oleaje sometidos a variación durante la calibración

Parámetro Numérico	Valores
Coefficiente de rugosidad de Manning	0.08 - 0.01 - 0.015 - 0.021 - 0.025
Viscosidad de remolino horizontal ( $m^2/s$ )	300 - 400 - 500 - 600 - 700
Coefficiente dragado viento [0-100] ( $m/s$ )	0.00114 - 0.00699
	0.00075 - 0.007450
	0.00129 - 0.006881
	0.00100 - 0.007230
	0.001176 - 0.007809

Tabla 4.4: Parámetros numéricos sometidos a variación durante la calibración

Los valores adoptados para el coeficiente de dragado del viento a 0 y 100  $m/s$  fueron fijados de acuerdo con Large y Pond (1981); Makin et al. (1995); Mitsuyasu y Kusaba (1984); Smith (1980); Velásquez M. (2013); Yelland et al. (1998). En el caso del coeficiente de rugosidad de Manning, adicional a los valores descritos en la Tabla 4.4 éste fue considerado variable con la profundidad de acuerdo con lo propuesto por The Dutch Continental Shelf Model en Lynch y Davies (1995) y Deltares (a), lo anterior se llevó a cabo siguiendo las ecuaciones 4.4 y 4.5 donde se relaciona el coeficiente de fricción con la profundidad y con el coeficiente de Manning.

$$C = \begin{cases} 65, & \text{Si } h \leq 40m \\ 65 + (h - 40), & \text{Si } 40 < h \leq 65m \\ 90, & \text{Si } h > 65m \end{cases} \quad (4.4)$$

$$C = \frac{h^{1/6}}{n} \quad (4.5)$$

donde  $C$  es el coeficiente de fricción,  $h$  es la profundidad y  $n$  es el coeficiente de Manning.

De acuerdo a la metodología de calibración seguida, una vez obtenidos los resultados de las simulaciones construidas a partir de las variaciones de un primer parámetro, se

procedía a fijar para las simulaciones siguientes, el parámetro que había generado la solución con los menores errores respecto a las mediciones. Aunque esta metodología va fijando un parámetro a la vez, para los parámetros más sensibles, es recomendable realizar verificaciones con las configuraciones finales de otros parámetros, de tal forma que se tengan en cuenta las correlaciones existentes entre éstos. En la Tabla 4.5 se presentan tanto los parámetros numéricos como los procesos evaluados junto con sus valores y estados calibrados.

Parámetro - Proceso	Valor - Estado
Forzamiento Atmosférico	NCAR + Información Aeropuerto Cartagena
Forzamiento Oleaje	WWIII + Información JASON-2
Wave Set-Up	No Activo
Difraction	No Activo
Forces	WEDR
Coefficiente de rugosidad de Manning	0.01
Viscosidad de remolino horizontal ( $m^2/s$ )	400
Coefficiente dragado viento [0-100] ( $m/s$ )	0.00129 - 0.006881

Tabla 4.5: Parámetros numéricos y procesos calibrados

Al final del proceso de calibración para la información de corrientes puntuales y transectos se obtuvieron los errores MAE, RMAE y ARMAE mostrados respectivamente en las Tablas 4.6 y 4.7. Para el caso de la magnitud de las corrientes modeladas respecto de las medidas (puntuales y transectos) se obtuvieron ARMAE de 21.12% y 26.01% respectivamente, lo que de acuerdo con van Rijn et al. (2003) y Sutherland et al. (2004) clasifica el desempeño de las simulaciones como bueno.

Galerazamba-Punta Canoas			
MAE		RMAE	ARMAE
Velocidad	Dirección	Velocidad	Velocidad
0.074 ( $m/s$ )	69.26°	45.21%	21.12%

Tabla 4.6: Errores Corrientes Puntuales

En la Tabla 4.7 se aprecia que el MAE de la dirección modelada respecto a la medida de las corrientes en los transectos es de 71.03°, similar al encontrado en las mediciones puntuales. En las Figuras 4.3 y 4.4 se muestran las rosas de dirección para

Transectos			
MAE		RMAE	ARMAE
Velocidad	Dirección	Velocidad	Velocidad
0.078 (m/s)	71.03 °	54.50 %	26.01 %

Tabla 4.7: Errores Transectos de Corrientes

las corrientes medidas y modeladas en las estaciones de medición fijas (Galerazamba y Punta Canoas). En la Figura 4.3 correspondiente a Galerazamba, se aprecia que la predominancia de las corrientes medidas es hacia el este, y en las modeladas predomina la dirección hacia el noreste.

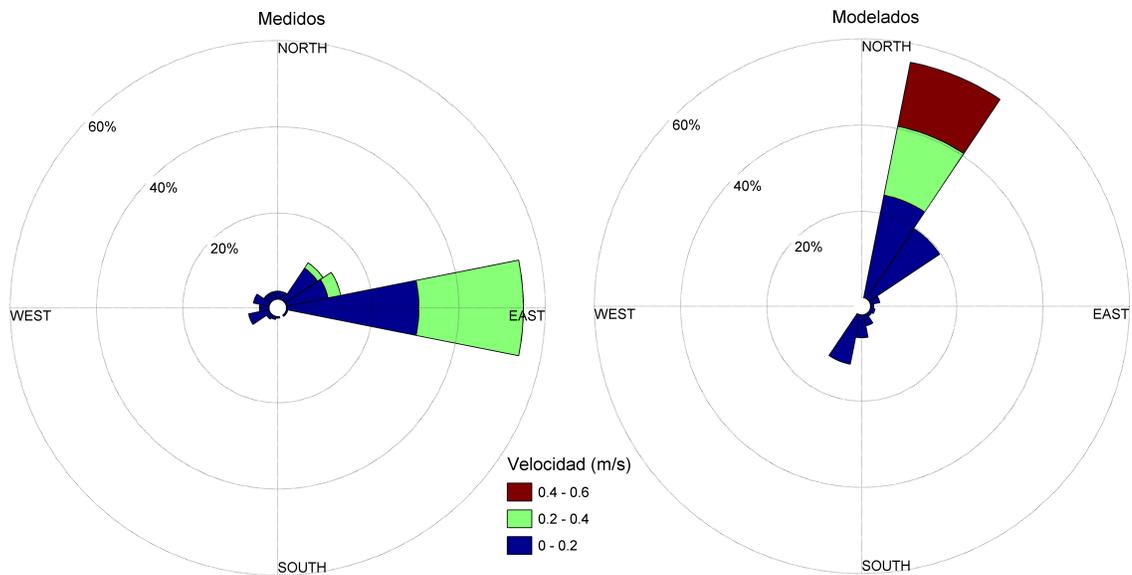


Figura 4.3: Rosa de Dirección Corrientes Galerazamba

La Figura 4.4 muestra el comportamiento de la dirección de las corrientes en Punta Canoas, es visible la predominancia de las corrientes hacia el sureste en las mediciones, mientras las modeladas tienden a dirigirse hacia el sur, sureste y suroeste. En ambos casos se observa una reproducción de la dirección de las corrientes bastante semejante a la observada en las mediciones.

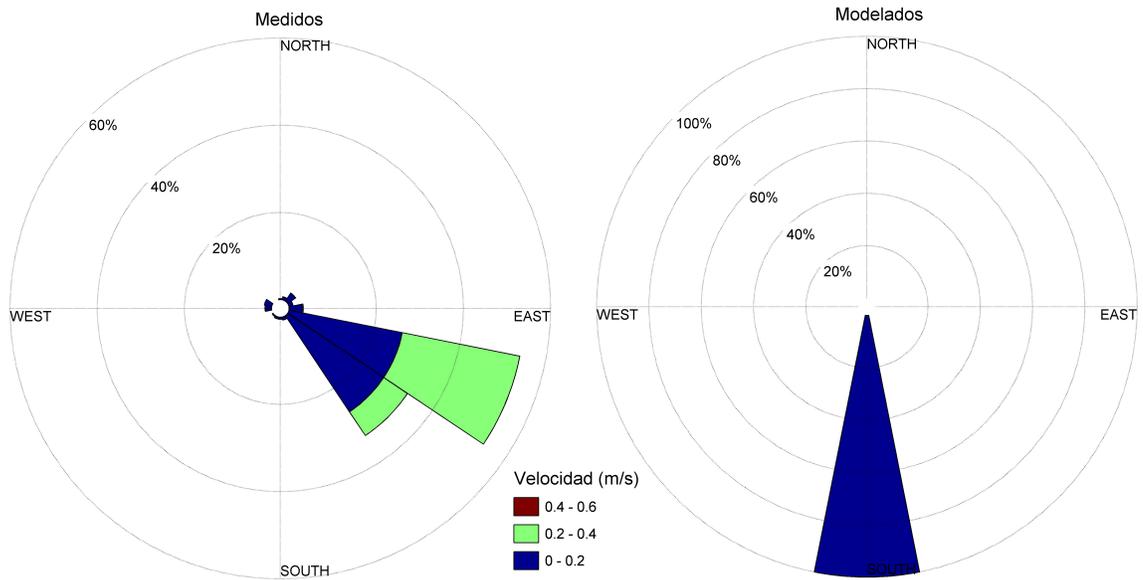


Figura 4.4: Rosa de Dirección Corrientes Punta Canoas

Para el caso del oleaje se obtuvieron los errores MAE, RMAE y ARMAE mostrados en la Tabla 4.8. Para la altura de ola se obtuvieron respectivamente ARMAE de 29.29 % y 8.03 % para las mediciones provenientes del satélite JASON-2 y de las campañas realizadas, lo cual de acuerdo con la literatura clasifica el desempeño de las simulaciones entre razonable y bueno.

JASON-2			UNINORTE			
MAE	RMAE	ARMAE	MAE	RMAE	ARMAE	MAE
Altura de Ola						Dirección
0.27 (m)	33.09 %	29.29 %	0.12 (m)	21.00 %	8.03 %	71.10 °

Tabla 4.8: Errores Oleaje

En la Figura 4.5 se aprecia la rosa de dirección del oleaje en Galerazamba, en ésta se muestra el comportamiento de la dirección medida y modelada. Se observa que el oleaje modelado es homogéneo y tiene dirección proveniente del norte y noreste, y el medido proviene del norte, noreste y este. Es visible una reproducción acertada de la dirección del oleaje, con un MAE promedio de 71.10 ° entre modelaciones y mediciones.

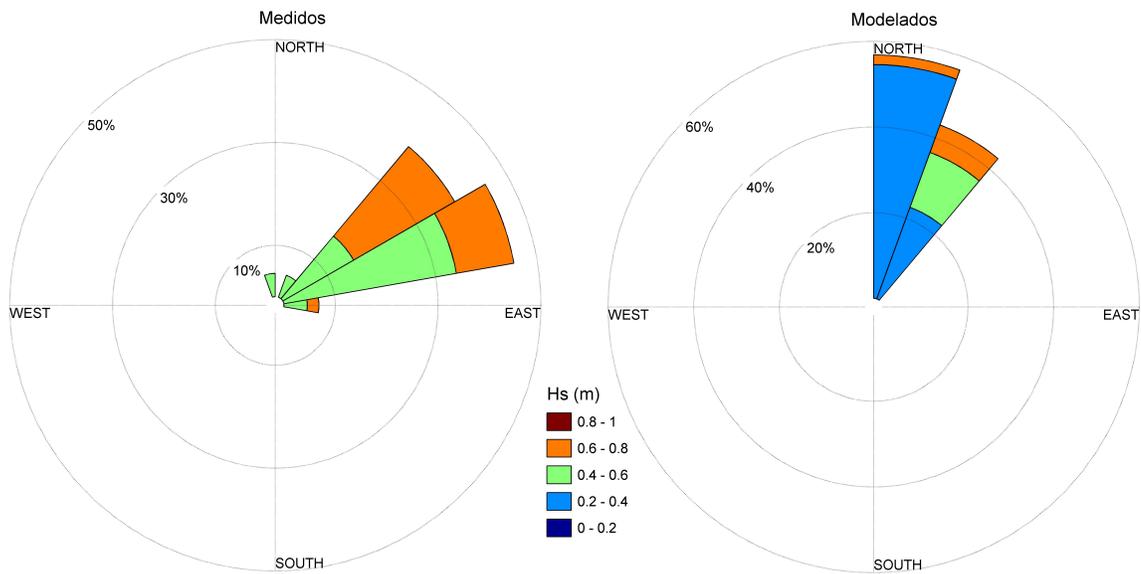


Figura 4.5: Rosa de Dirección Oleaje Galerazamba

## 4.2. Validación

Posterior al proceso de calibración de los parámetros físicos del modelo se prosiguió con la validación de éste, la cual consistió en la reproducción de periodos de tiempo diferentes para evaluar el desempeño del modelo con sus parámetros calibrados. El objetivo de la validación no es más que llevar a conclusiones acerca de las predicciones del modelo bajo condiciones atmosféricas y oceanográficas diferentes a las utilizadas en la calibración. La validación del modelo fue realizada con ayuda de los datos recolectados en la campaña de medición llevada a cabo entre el 26 de Abril y el 2 de Mayo del año 2012, de igual manera se utilizó información proveniente del satélite JASON-2 para el periodo de tiempo comprendido entre el 15 de Marzo y el 3 de Mayo del mismo año. La validación del modelo se realizó para la época seca, con la simulación llevada a cabo en este período se pretendió verificar el nivel de certeza de las predicciones del modelo relativas a corrientes, oleaje y marea.

En las Tablas 4.9 y 4.10 se aprecian los errores MAE, RMAE y ARMAE que se obtuvieron de la simulación respecto de las mediciones al finalizar el proceso de validación del modelo. En el caso de la magnitud de las corrientes modeladas respecto de las medidas (puntuales y transectos) se obtuvieron ARMAE de 28.22% y 32.92%, lo que

de acuerdo con van Rijn et al. (2003) y Sutherland et al. (2004) clasifica el desempeño de las simulaciones entre razonable y bueno respectivamente.

Galerazamba-Punta Canoas			
MAE		RMAE	ARMAE
Velocidad	Dirección	Velocidad	Velocidad
0.078 (m/s)	55.77°	59.32 %	28.22 %

Tabla 4.9: Errores Corrientes Puntuales Validación

Transectos			
MAE		RMAE	ARMAE
Velocidad	Dirección	Velocidad	Velocidad
0.084 (m/s)	75.47°	62.04 %	32.92 %

Tabla 4.10: Errores Transectos de Corrientes Validación

En la Figura 4.6 se puede observar el comportamiento de la dirección de las corrientes medidas y modeladas durante la validación en el sector de Galerazamba, se aprecia que las corrientes modeladas en su gran mayoría se dirigen hacia noreste y un pequeño porcentaje de éstas hacia el suroeste. Las medidas en su gran mayoría van hacia el norte y noreste.

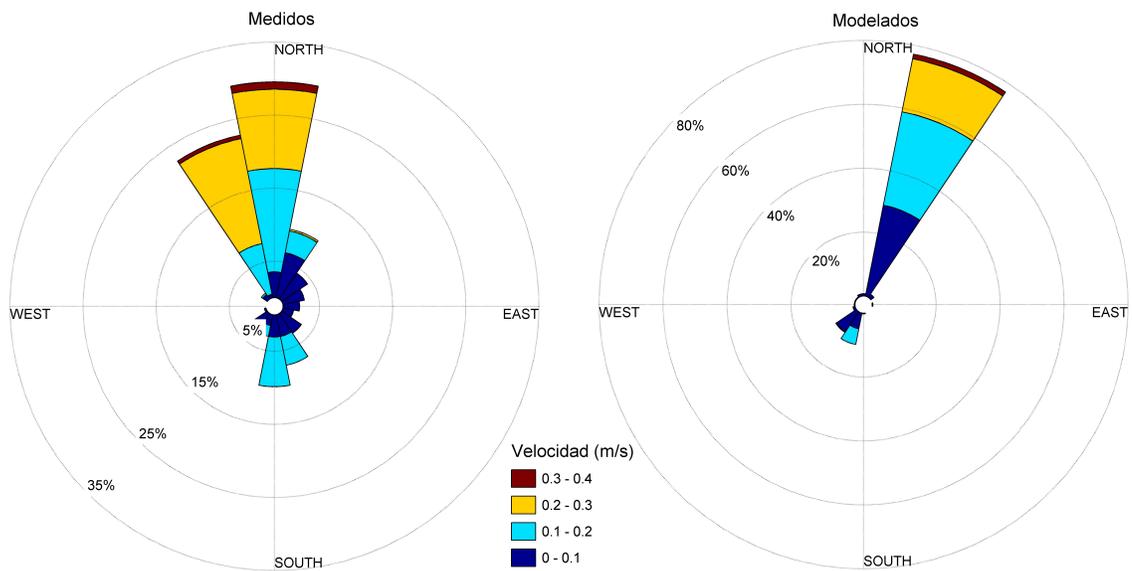


Figura 4.6: Rosa de Dirección Corrientes Galerazamba

En la Figura 4.7 se observa que en el caso de Punta Canoas las corrientes modeladas en su totalidad se dirigen hacia el sur-sureste y las medidas hacia el sureste. Se

observa que las simulaciones comparadas con las mediciones presentan una acertada reproducción de la dirección de las corrientes.

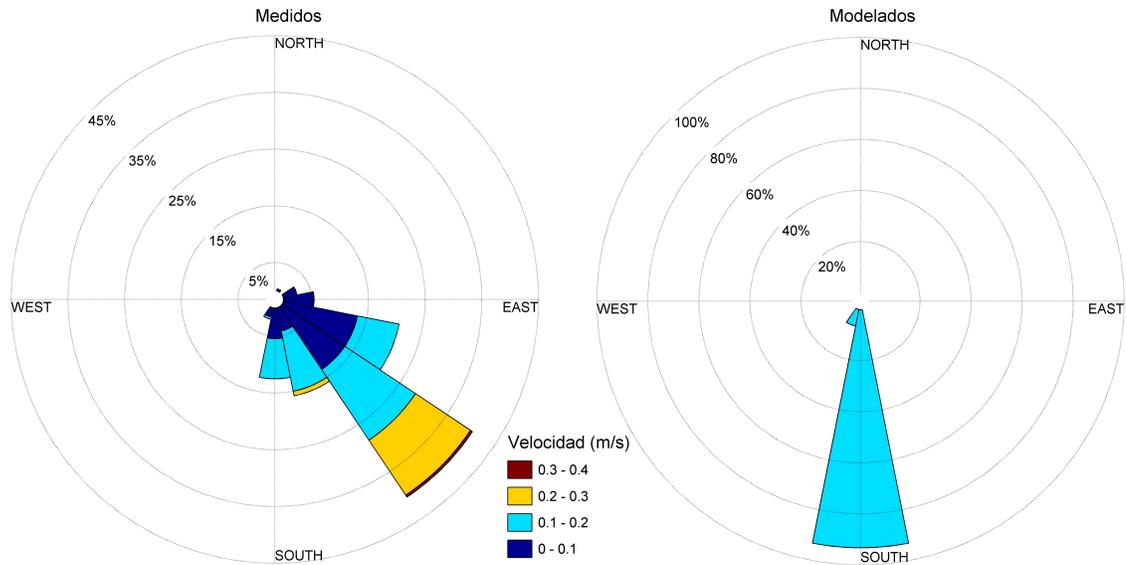


Figura 4.7: Rosa de Dirección Corrientes Punta Canoas

La Figura 4.8 muestra la rosa de dirección de las corrientes en los transectos, se tiene que tanto las modeladas como las medidas se dirigen en su gran mayoría hacia el sureste.

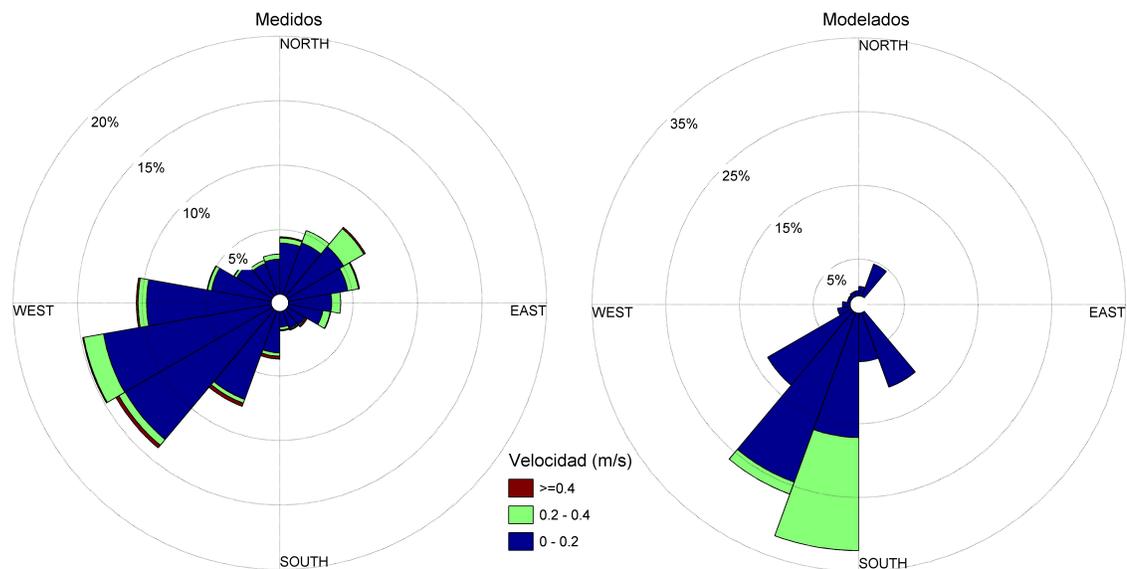


Figura 4.8: Rosa de Dirección Transectos de Corrientes

En las Tabla 4.11 se aprecian los errores MAE y RMAE para la variable nivel de mar que se obtuvieron después de la validación del modelo. Se obtuvo un RMAE de 28.32 % con un MAE de 0.02 m (2 cm).

Marea	
MAE	RMAE
0.020 (m)	24.38 %

Tabla 4.11: Errores de Marea Puntuales Validación

En la parte izquierda de la Figura 4.9 se presenta una gráfica de dispersión para los datos de marea medidos y modelados en Punta Canoas, presentando éstos un coeficiente de correlación de 0.93, lo que indica que las simulaciones siguen de forma adecuada la tendencia de los datos medidos. En la parte derecha de la misma Figura, se observa una gráfica del nivel de mar contra el tiempo, mostrando ésta el ajuste del modelo con las mediciones.

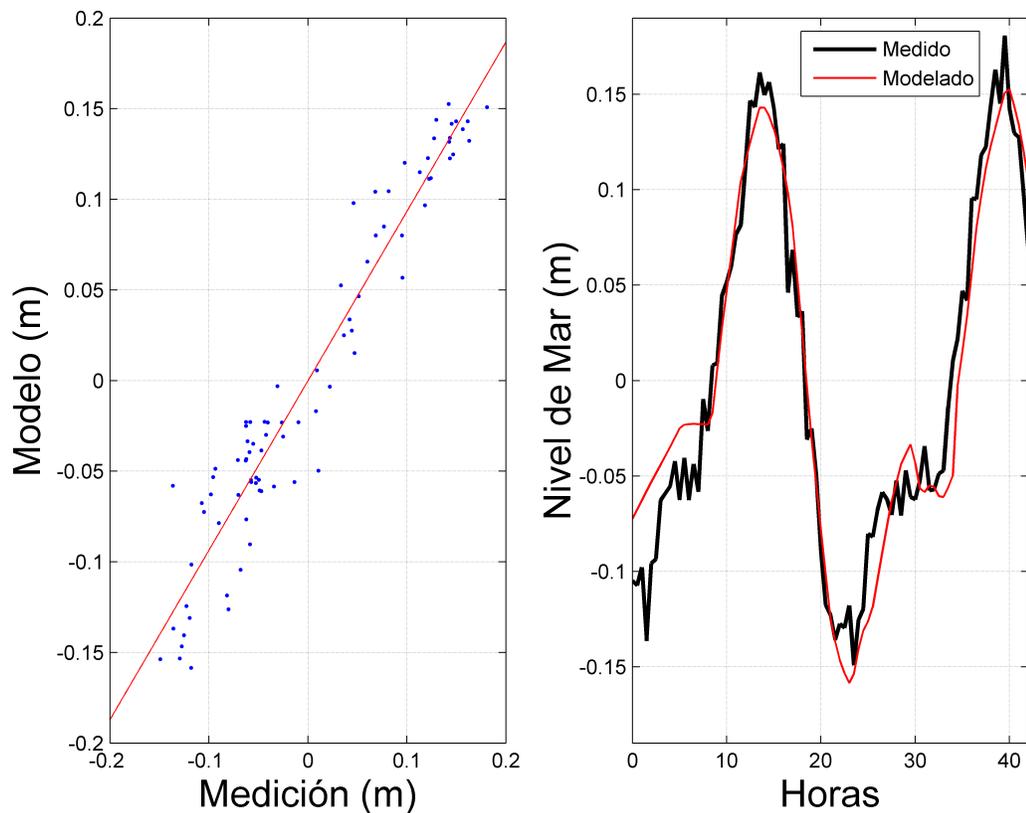


Figura 4.9: Nivel de mar medido y simulado (Punta Canoas)

Para el caso del oleaje del proceso de validación se obtuvieron los errores MAE,

RMAE y ARMAE mostrados en la Tabla 4.12. Para la altura significativa del oleaje se obtuvieron ARMAE de 24.87 % para las mediciones provenientes del satélite JASON-2, así como un ARMAE de 25.86 % para la información proveniente de la campaña de medición realizada. Siguiendo los ARMAE obtenidos y de acuerdo con la literatura, el desempeño de las simulaciones puede clasificarse entre razonable y bueno.

JASON-2			UNINORTE			
MAE	RMAE	ARMAE	MAE	RMAE	ARMAE	MAE
Altura de Ola						Dirección
0.36 (m)	27.19 %	24.87 %	0.33 (m)	36.96 %	25.86 %	39.16 °

Tabla 4.12: Errores Oleaje Validación

En la Figura 4.10 y 4.11 se pueden apreciar las rosas de dirección del oleaje para el periodo de validación, en éstas se aprecia que la mayoría del oleaje tanto medido como modelado es proveniente del noroeste, norte y noreste. Es evidente la buena reproducción de la dirección del oleaje por parte de las simulaciones realizadas.

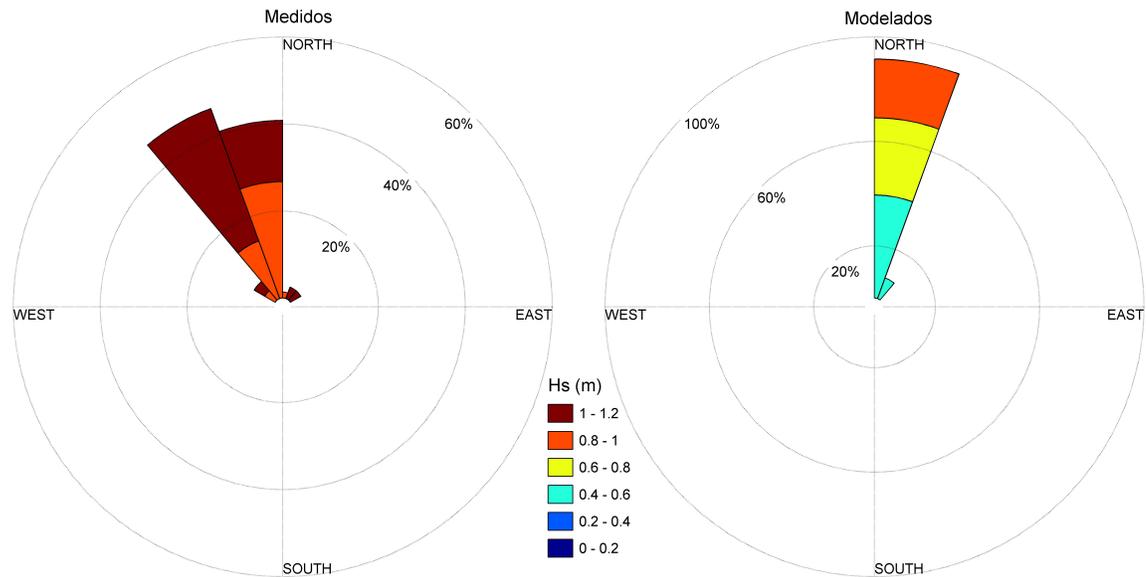


Figura 4.10: Rosa de Dirección Oleaje Galerazamba

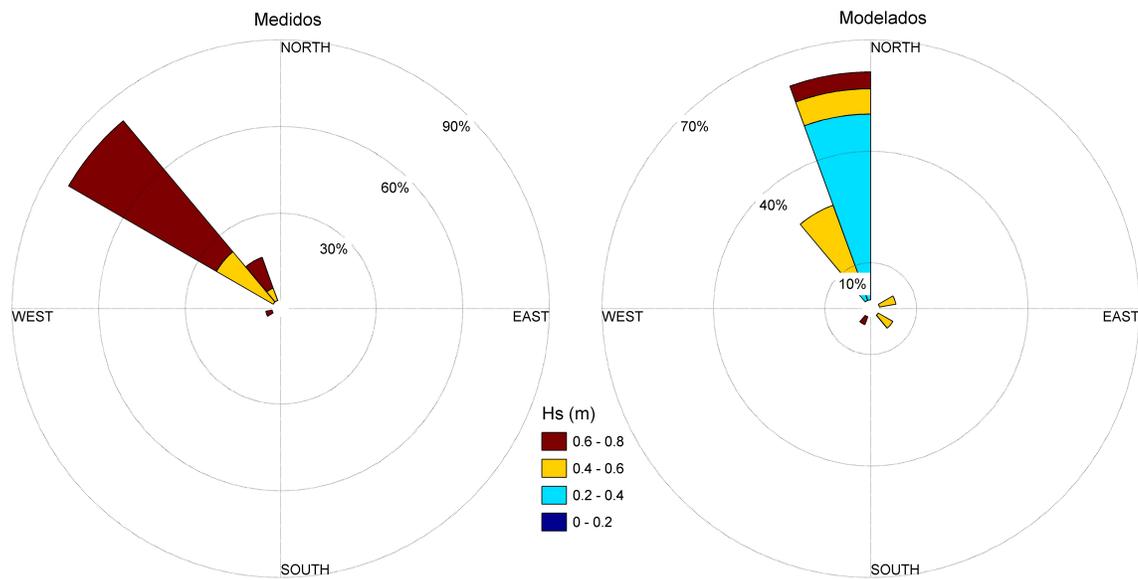


Figura 4.11: Rosa de Dirección Oleaje Punta Canoas

Al final del proceso de calibración y validación de las simulaciones numéricas se encontro que éstas presentaron un desempeño que a nivel general puede clasificarse entre bueno y razonable a la hora de reproducir hidrodinámica marina en la región de Cartagena, claro que se debe aclarar que dichas simulaciones fueron construidas utilizando forzamientos atmosféricos provenientes del modelo de reanálisis NCAR, y es de recordar que en la sección 2.5.1 del capítulo 2 se encontró que en zonas costeras el modelo de reanálisis NCAR no fue el de mejor desempeño, como sí lo fue el CCMP, pero éste último no dispone de información para el año en el cual se contruyó el modelo (2012).

# Capítulo 5

## Aplicaciones

Una vez se conoció que el modelo construido tenía un desempeño entre bueno y razonable en la reproducción de la hidrodinámica en la región de Cartagena para las épocas características que se presentan allí, se procedió a acoplar el modelo calibrado y validado con el modulo de transporte de sedimentos presente en la plataforma Delft3D (Deltares, a), con el objetivo de tener un primer acercamiento al transporte de sedimentos en la región. Ante la escasa información referente a las propiedades de los sedimentos presentes en la región de Cartagena, y teniendo en cuenta los resultados obtenidos de las campañas de medición realizadas, se optó por utilizar para este primer acercamiento a la mecánica de sedimentos un sólo tipo de partículas: (1) arenas con un  $d_{50}$  de  $150 \mu m$ . Las variables dependientes de las propiedades de los sedimentos tuvieron que ser asumidas para completar los datos de entrada del modelo. En la Tabla 5.1 se muestran los parámetros característicos asumidos para los sedimentos presentes en la región de Cartagena, algunos de ellos sugeridos por Deltares (a). El diámetro medio de los sedimentos gruesos (Arenas) fue obtenido de la realización de una granulometría a muestras de material recolectado en las campañas llevadas a cabo en los años 2013 y 2014.

Variable	Valor
$d_{50}$ ( $\mu m$ )	150
Densidad específica ( $Kg/m^3$ )	2650
Densidad seca de fondo ( $Kg/m^3$ )	1600
Densidad de referencia para asentamiento en medio real ( $Kg/m^3$ )	1600

Tabla 5.1: Tamaño y parámetros característicos asumidos para los sedimentos presentes en Cartagena

## 5.1. Concentración de Sedimentos en Suspensión

La campaña en la cual se recolectaron muestras de concentración de sedimentos en suspensión en la región de Cartagena fue realizada entre el 16 y el 20 de Octubre del año 2013, obteniéndose alrededor de 30 muestras. Los resultados obtenidos en la mencionada campaña fueron utilizados para la realización de la primera aplicación del modelo construido, con la finalidad de tener un primer acercamiento al transporte de sedimentos en la región. Esta aplicación consistió en la reproducción de concentraciones de sedimentos en suspensión. En la Figura 5.1 se aprecia la localización espacial de las estaciones donde se obtuvo concentración de sedimentos en suspensión, así como el valor de ésta para el año 2013, en la mayoría de las estaciones la concentración se encontró entre 0 y 20  $mg/l$ . Al igual que en los procesos de calibración y validación se compararon datos modelados contra medidos utilizando los estadísticos MAE y RMAE, descritos respectivamente en las ecuaciones 4.1 y 4.2.

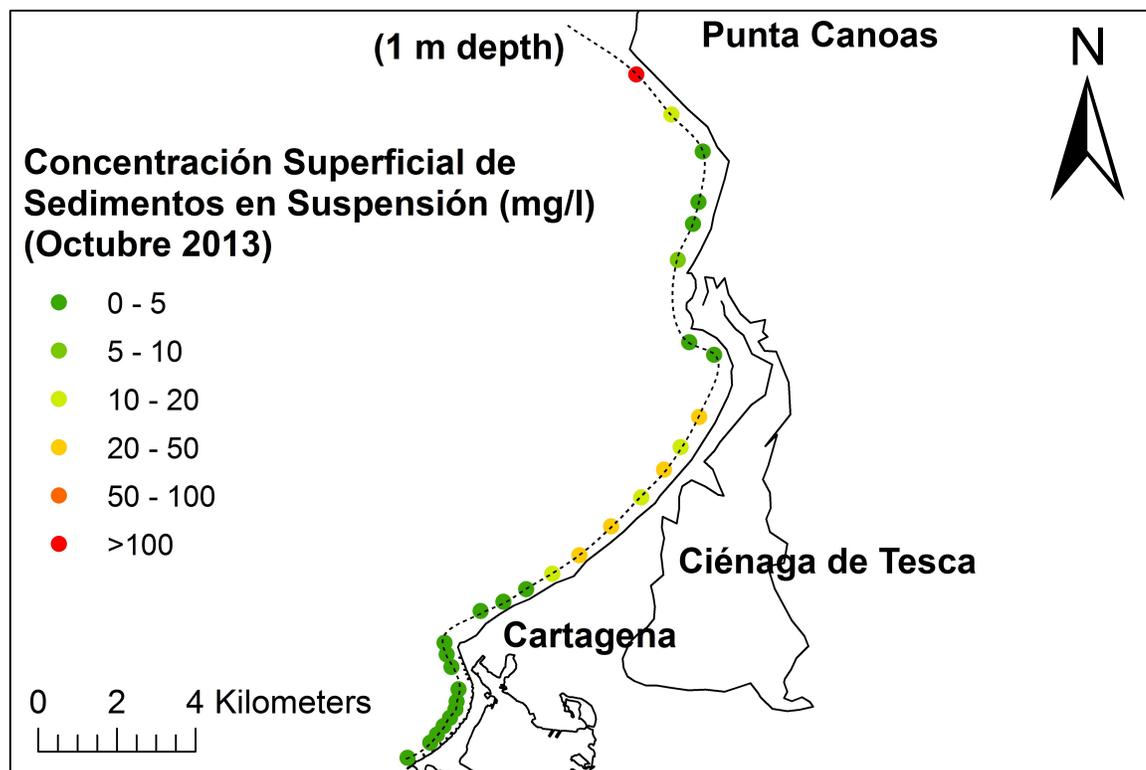


Figura 5.1: Estaciones de Muestreo Concentración de Sedimentos en suspensión año 2013

En la Figura 5.2 se aprecia la distribución espacial de los errores relativos (RMAE) obtenidos entre los datos medidos y los modelados. Se tiene que en más del 50 % de las estaciones de medición, es decir en la mayoría de éstas los valores de RMAE se encuentran por debajo de 0.4. También se encontró que no más del 18 % de las estaciones presentaron valores de RMAE entre 0.4 y 0.8, mientras que alrededor del 30 % de las estaciones presentó valores de RMAE mayores a 1.0. Éstos valores altos en su gran mayoría se presentaron en los alrededores de la conexión existente entre la Ciénaga de Tesca (Virgen) y el Mar Caribe, donde también fueron encontradas las mayores mediciones de concentraciones de sedimentos (Figura 5.1), en dicha conexión no fue tomada en cuenta dentro del modelo la descarga proveniente de esta ciénaga, lo anterior debido a la falta de conocimiento de la hidrodinámica de este sector. En sectores ubicados entre Punta Canoas y Bocagrande se presentó sobrestimación de la concentración por parte del modelo. Lo anterior puede considerarse un buen indicio del desempeño general del modelo para reproducir concentración de sedimentos en suspensión.

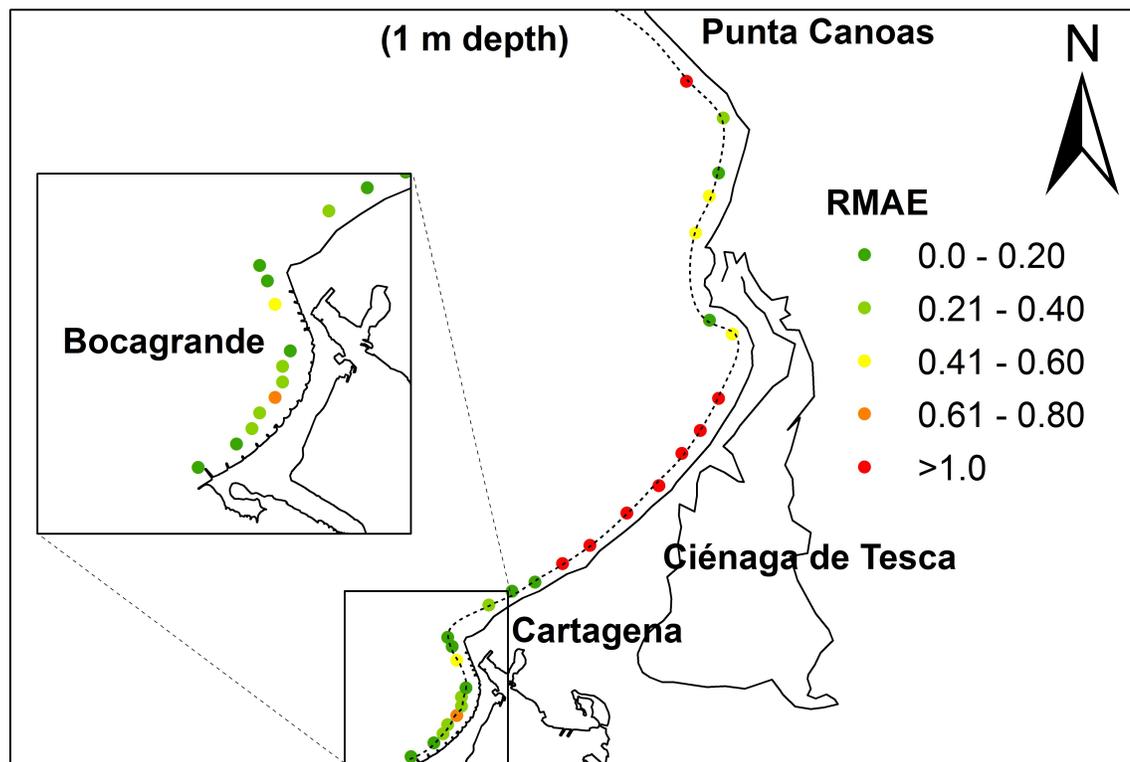


Figura 5.2: Variación Espacial del Error Relativo (RMAE)

## 5.2. Zonas de Erosión y Acreción a lo largo de la línea costera

Como aplicación final del modelo construido, y con el objetivo de identificar si éste logra reproducir la pérdida o ganancia de sedimentos en zonas de erosión y sedimentación de acuerdo con lo reportado en la literatura (Correa, 1990; Molina et al., 1996), se llevaron a cabo balances de transporte de sedimentos a lo largo de la línea costera. Para el anterior fin se realizaron 3 simulaciones, una para época seca, una para época lluviosa y otra para un evento extremo, cuyo objetivo no era otro que identificar patrones de erosión o sedimentación durante éstas. De las mencionadas simulaciones se obtuvieron las zonas donde el modelo está prediciendo pérdida y ganancia de sedimentos a lo largo de su línea de costa.

La información de pérdida o ganancia de sedimentos se obtuvo a partir de la generación de secciones de control paralelas y perpendiculares a la línea de costa, a través de las cuales, se realizaron balances de pérdida y ganancia de material particulado. Los balances mencionados fueron realizados para periodos de 15 días (época seca y húmeda), así como para un periodo de 5 días en el caso del evento extremo. En Figura 5.3 se muestra la distribución espacial de las secciones generadas a lo largo de la línea de costa para la región de Cartagena, las secciones de control perpendiculares a la costa se generaron siguiendo el criterio de alcanzar profundidades entre los 4 y 5 *m*. En el caso de las secciones paralelas a la línea de costa, éstas fueron de una longitud media de 1.5 *km*, no excediendo nunca los 2 *km*. Es de notar que en la parte sur de la región, en cercanías de Turbaná no fue posible la creación de secciones de control que satisficieran las características anteriormente mencionadas, esto a causa de la irregularidad de las celdas en este tramo.

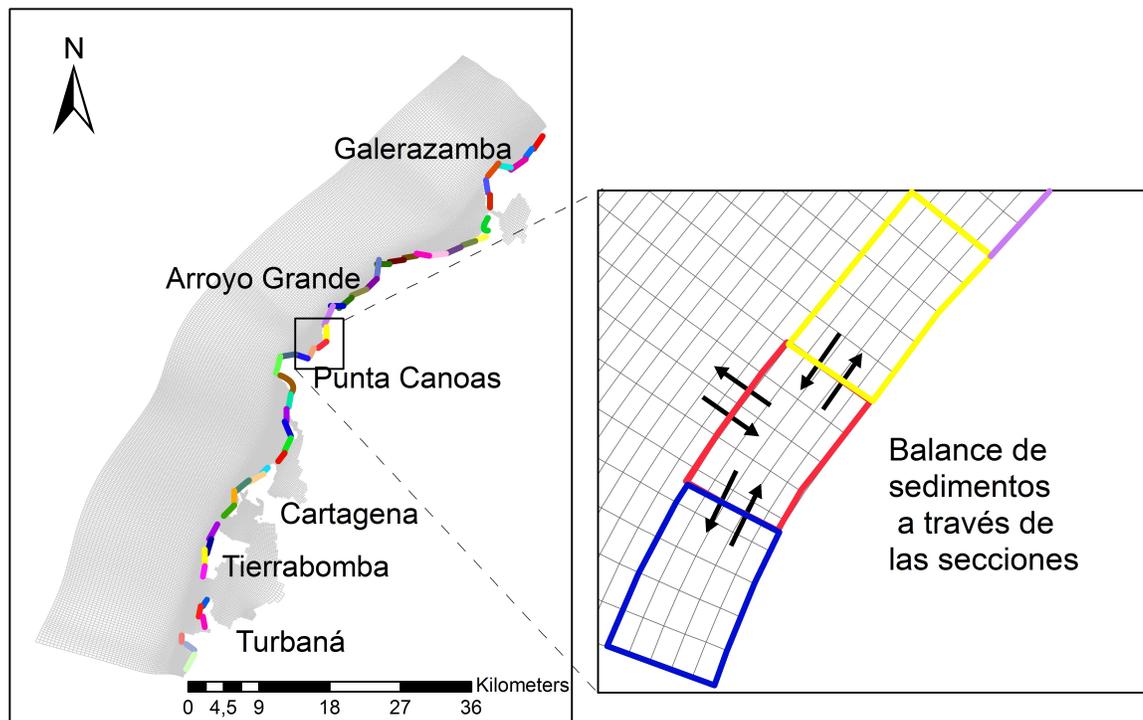


Figura 5.3: Secciones para el cálculo de balance de sedimento

Los resultados para los 3 casos simulados a partir de distintas condiciones climáticas se muestran en la Figura 5.4, donde se aprecia el transporte total (fondo y suspensión) a través de las secciones de control, la primera imagen corresponde con lo acontecido durante la simulación de una época seca, la segunda con lo sucedido durante una época lluviosa y la tercera imagen corresponde con la respuesta del transporte de sedimentos ante la ocurrencia de un evento extremo. En la Figura 5.4 se tiene que los tonos de color rojo indican erosión y los tonos de color verde sugieren sedimentación.

Para las 3 condiciones climáticas utilizadas se aprecia un comportamiento homogéneo en cuanto a erosión y sedimentación para ciertos tramos de la línea costera. Durante la época seca se presentaron eventos erosivos en varios tramos de la línea de costa, siendo el más grande y representativo el ocurrido entre la parte sur de Punta Canoas y el sur de Arroyo Grande, entre esta última parte y Galerazamba se observan algunos tramos que presentaron sedimentación, específicamente en cercanías a la ubicación de isla Cascajo y en alrededores de Lomarena. La parte norte de Galerazamba (Las Salinas) presentó erosión. En el tramo costero entre el sur de Punta Canoas y la conexión entre la Ciénaga de Tesca y el mar Caribe se evidenció sedimentación, mientras que desde

allí, y pasando por los Morros hasta punta Santo Domingo se observaron fenómenos erosivos. Durante la temporada seca Bocagrande y sus alrededores hasta el Laguito presentaron acreción sedimentaria.

Para el caso de la época húmeda se tiene que casi la totalidad de la línea costera entre el norte de Galerazamba y Lomarena presentó erosión, mientras que entre la parte sur de Lomarena (Conexión Ciénaga del Totumo y Mar caribe) y Arroyo Grande (Cercanías Isla Casacajo) la sedimentación se hizo presente. Al igual que con lo acontecido durante la época seca se observaron fenómenos erosivos entre Arroyo Grande y Punta Canoas. Entre el sur de Punta Canoas y la conexión entre la Ciénaga de Tesca con el mar Caribe se encontraron algunos tramos de erosión y otros de sedimentación. Desde este punto y hasta Bocagrande se apreció durante esta época erosión costera. En cercanías al sector conocido como el Laguito, al igual que como sucedió durante la época seca, se presentó sedimentación.

Para el caso de condiciones extremas se buscó en las bases de datos del National Hurricane Center (<http://www.nhc.noaa.gov/>) eventos que tuvieran la clasificación de huracán (máxima posible) con paso cercano a la región de interés (Cartagena), además se buscó que coincidieran con los periodos de simulación existentes, encontrándose el caso del huracán Ernesto, que tuvo paso por el Caribe en Agosto de 2012. El huracán en su ojo presentó una velocidad máxima de  $43.72 \text{ m/s}$ , pero en Cartagena sólo se registraron velocidades cercanas a los  $4.0 \text{ m/s}$ , además efectos ocasionados en el oleaje por los vientos no se ven reflejados debido a que el WWIII no predice acertadamente condiciones de oleaje bajo eventos extremos. Dado lo anterior no se esperó gran diferencia en los resultados de esta simulación, en comparación con otras. Los efectos en los patrones de erosión y sedimentación bajo esta configuración no distaron mucho de los observados en las temporadas seca y húmeda, presentándose sólo algunas variaciones hacia la parte norte de la región. Por ejemplo en los alrededores del norte de Galerazamba a causa del evento extremo se presentó sedimentación, al igual que en algunos alrededores de Arroyo Grande y el sur de Punta Canoas.

Durante las épocas seca y húmeda, así como durante el evento extremo la línea de costa de Tierrabomba hasta el fin de ésta presentó el mismo comportamiento, acreción en la mayor parte de ella con unos pequeños tramos de erosión. Ha de recordarse que como la Bahía de Cartagena no fue el área de estudio principal de este trabajo, no se incluyeron procesos que suceden dentro de ella y que pueden afectar el transporte de sedimentos en sus alrededores (vr.g Descarga Canal del Dique).

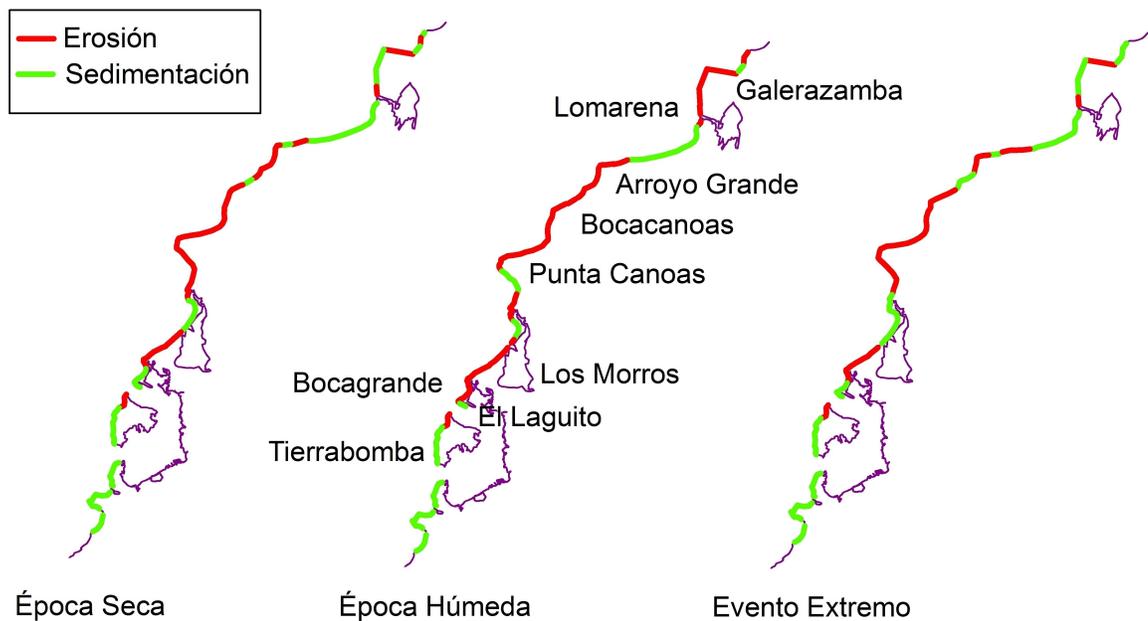


Figura 5.4: Zonas de erosión y sedimentación de acuerdo a condiciones climáticas

Al realizar una comparación de los resultados obtenidos de las simulaciones en términos de sectores con pérdida o ganancia de sedimentos con lo reportado en la literatura (Correa, 1990; Molina et al., 1996), se observa coincidencia en la tendencia generalizada de erosión en el norte de Galerazamba, Punta Canoas, Los Morros y Punta Santo Domingo, mientras que la acumulación de sedimentos coincide en cercanías a Isla Cascajo (Figura 1.1).

# Capítulo 6

## Conclusiones

Se realizaron simulaciones numéricas para reproducir la dinámica marina en la región de Cartagena, las cuales fueron evaluadas siguiendo criterios ampliamente utilizados en la literatura, de acuerdo con los cuales éstas lograron un desempeño general entre razonable y bueno, lo que indica que las simulaciones son una buena herramienta para la realización de estudios sobre dinámica marina, así como problemáticas que puedan ser estudiadas a partir de éstas (erosión-sedimentación). Para el fin anterior se llevo a cabo un anidamiento de las simulaciones de la región de Cartagena dentro de las simulaciones del Caribe desarrolladas por Ruiz Sarrazola (2015), por lo que las simulaciones de Cartagena fueron alimentadas con condiciones de frontera obtenidas de las simulaciones de mayor escala (Caribe), asegurando así una mejor calidad de éstas. Gracias al anidamiento se lograron reproducir patrones de comportamiento de las corrientes más acordes con lo descrito en la literatura y lo dictado por las mediciones, patrones que no se lograron reproducir sin la utilización de esta funcionalidad. En la literatura no se encontró evidencia de que la metodología del anidamiento haya sido realizada antes para la región de interés.

En la primera parte de este proyecto se realizó un análisis de diversas fuentes de información batimétrica, topográfica y meteorológica, encontrándose que la mejor fuente de información batimétrica fue la procedente de la digitalización de las cartas náuticas editadas por el CIOH, la mejor fuente de información topográfica fue la obtenida de la misión satelital SRTM, esta última fue utilizada en cercanías a la línea de costa, con el fin de obtener una mejor representación de la zona costera. Para el caso de información meteorológica, se encontró que en aguas profundas los modelos de Reanálisis de mejor desempeño fueron el CCMP (Velocidad-Dirección Viento) y el NCAR (Pre-

sión), mostrando que éstos presentaron un comportamiento homogéneo tanto para las diferentes épocas climáticas que tienen lugar en el Caribe, así como para períodos de tiempo cortos y largos. En aguas someras se encontró que los diferentes modelos no presentaron un buen desempeño en la reproducción con adecuada precisión de condiciones atmosféricas, siendo nuevamente para este caso los de mejor desempeño el CCMP (Velocidad-Dirección Viento) y el NCAR-NARR (Presión), pero presentando errores de más del 60-70 % para velocidad y dirección el viento, lo anterior claramente presenta un efecto negativo en la simulación de condiciones hidrodinámicas para zonas costeras, ya que tener condiciones atmosféricas de buena calidad es de vital importancia para la representación adecuada de la interacción atmósfera-océano.

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad espacial a diferentes parámetros numéricos, análisis en el cual se encontraron los valores adecuados para dichos parámetros, asegurando así una calidad adecuada de los resultados de las simulaciones. Se determinó que el hecho de incluir el oleaje en la simulación afecta en gran medida la calidad de los resultados de ésta, también se encontró que al simular en 3 dimensiones no se obtuvo una mejoría significativa en los resultados, pero si se incurrió en un muy alto costo computacional.

Simulaciones numéricas bidimensionales de la hidrodinámica marina en la región de Cartagena fueron calibradas y validadas, esto se llevó a cabo mediante la comparación de información relativa a corrientes y oleaje proveniente de campañas de medición-satélite con información obtenida de éstas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los errores de las mediciones pueden generar un rango de incertidumbre entre lo modelado y lo medido. Parámetros físicos como el coeficiente de rugosidad de manning, fuentes de información para oleaje (WWIII, JASON-2), condiciones atmosféricas (NCAR, Aeropuerto Cartagena) y forzadores oceánicos (UHSLC, Modelo Caribe) fueron sumamente importantes para lograr la aproximación de los resultados del modelo con la realidad.

Los resultados de las simulaciones evidenciaron que se logró una reproducción buena de condiciones hidrodinámicas en términos de niveles de mar, magnitud y dirección de corrientes en aguas someras, así como características de oleaje tanto en aguas profundas como someras. Para las 2 temporadas marcadas que se presentan en la región de Cartagena se encontró que el patrón característico de circulación de las corrientes en la mayor parte del dominio es hacia el sur, mientras que la dirección del oleaje es predominantemente del noreste (NE). Al analizar los datos medidos y modelados en cuanto a dirección de corrientes es de remarcar que las corrientes en la región durante ambas temporadas no presentan en todo el dominio una dirección completamente homogénea,

ya que en cercanías a Galerazamba gran porcentaje de las corrientes tanto medidas como modeladas presentaron una dirección abarcada en un rango comprendido entre noreste y este, así como un pequeño porcentaje de éstas que van hacia el suroeste. En cuanto a Punta Canoas (parte media-baja del dominio) es notorio un comportamiento un poco más homogéneo en la dirección de las corrientes, ya que el abanico de direcciones está localizado entre el sureste y el sur. El comportamiento de la dirección de las corrientes medidas y modeladas a través de los transectos confirma lo anterior, dirección no homogénea en ambas temporadas, ya que gran parte de las mediciones y modelaciones tienden a dirigirse al noreste, este y sureste durante la temporada húmeda, mientras que en la seca la mayoría tienden hacia el suroeste. En el caso de la magnitud de las corrientes se encontró que los cambios de una temporada a otra son mínimos, por lo general menores a  $0.4 \text{ m/s}$ . En cuanto al oleaje se encontró que en ambas temporadas la dirección predominante es del noreste, pero caracterizándose la época seca por presentar regímenes de oleaje de mayor intensidad.

Se acopló de forma satisfactoria la hidrodinámica calibrada y validada con el módulo de transporte de sedimentos presente en Deflt3D, encontrándose una reproducción aceptable de concentración de sedimentos en suspensión en la mayoría de las estaciones de monitoreo establecidas. En algunas pocas estaciones no se encontró una reproducción semejante a la obtenida en las mediciones, aunque se debe recordar que dada la poca información que se tiene acerca de los sedimentos en la región, se utilizó únicamente un sólo tipo de éstos en las simulaciones, lo cual sin duda alguna afecta los resultados obtenidos.

Al realizar el balance de sedimentos en las secciones de control establecidas a lo largo de la línea de costa, y a pesar de la diferencia en las escalas temporales, los resultados obtenidos a partir de las simulaciones de las temporadas climáticas características de la región de Cartagena, tendieron a confirmar los resultados presentados por otros autores en la literatura haciendo uso de diferentes metodologías.

En el presente trabajo se mostró que la simulación numérica para Cartagena puede ser una herramienta útil para el estudio de la hidrodinámica marina en la región, así como para aplicaciones que involucren una acertada reproducción de ésta como punto de partida (erosión costera), sin embargo existen factores que pueden mejorarse como trabajo futuro para aumentar la calidad de éste: evaluar alternativas para complementar la información de las fuentes meteorológicas disponibles actualmente (Viento), construir el modelo en 3 dimensiones incluyendo un modelo de calor y fenómenos de transporte, incluir descargas de los diferentes afluentes presentes en la región, así como realizar una

mejor caracterización de los sedimentos presentes en ésta.

Finalmente se remarca que en este trabajo se presenta una metodología para la construcción de simulaciones numéricas para una zona (Cartagena) y fecha específicas, por lo que si se desean realizar nuevas simulaciones en otras regiones y fechas, la metodología aquí descrita, debe ser nuevamente aplicada.

# Bibliografía

Application of a three-dimensional hydrodynamic model to the nam theun 2 reservoir (lao pdr). *Journal of Great Lakes Research*, 38(2):260 – 269, 2012.

Application of a three-dimensional hydrodynamic model for san quintin bay, b.c., mexico. validation and calibration using openda. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 273(0):428 – 437, 2015.

A comparison between the suspended sediment concentrations derived from {DELFT3D} model and collected using transmissometer a case study in tidally dominated area of dithmarschen bight. *Oceanologia*, 57(1):44 – 49, 2015.

Long-term hydrodynamic modeling of the arabian gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 94(12):19 – 36, 2015.

Use of hydrodynamic models for the management of the danube delta wetlands: The case study of sotea-fortuna ecosystem. *Environmental Science and Policy*, 46(0):48 – 56, 2015.

Aguilera Díaz, María, Reina Aranza, Yuri, Orozco Gallo, Antonio, Yabrudy Vega, Javier, y Barcos Robles, Rosemary. *Ensayos Sobre Economía Regional: Composición de la Economía de la Región Caribe de Colombia*. Banco de la República, 2013. Número 53.

ASTER. *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*. NASA Jet Propulsion Laboratory, 2014. [Http://asterweb.jpl.nasa.gov/](http://asterweb.jpl.nasa.gov/) , Consultada el 20 de marzo de 2014.

Atlas, R., Hoffman, R. N., Ardizzone, J., Leidner, S. M., Jusem, J. C., Smith, D. K., y Gombos, D. A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity pro-

- duct for meteorological and oceanographic applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92:157–174, 2011.
- Ayan H, Chaudhuri, Ponte, Rui M, Forget, Gael, y Heimbach, Patrick. A comparison of atmospheric reanalysis surface products over the ocean and implications for uncertainties in air-sea boundary forcing. *Journal of Climate, American Meteorological Society*, 26(1):153–170, 2013.
- Booij, N., Ris, R. C., y Holthuijsen. A third-generation wave model for coastal regions. part 1 model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104(C4):7649–7666, 1999.
- Bourras, Denis. Comparison of five satellite-derived latent heat flux products to moored buoy data. *Journal of Climate, American Meteorological Society*, 19:6291–6313, 2006.
- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M., Alvarez, I., y Silva Santos, C. Comparison between ccmp, quikscat and buoy winds along the iberian peninsula coast. *Remote Sensing of Environment*, 137(0):173 – 183, 2013. ISSN 0034-4257. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.06.005>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425713001983>.
- CIOH. *Cartagena de Indias-Colombia. Central de Pronósticos*. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de Caribe, 1993. Consultado el 16 de Enero de 2014. < [http://www.cioh.org.co/dev/proserv/dat\\_generales.htm](http://www.cioh.org.co/dev/proserv/dat_generales.htm) >.
- CIOH. *Climatología Cartagena*. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de Caribe, 2007. Consultado el 16 de Mayo de 2014.
- Clesceri, Leonore S. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, Water Environment Federation, American Water Works Association, Washington, 20 ed<sup>ón</sup>, 1998. ISBN 0875532357.
- Correa, I.D. Inventario de Erosión y Acreción Litoral (1793-1990) entre Los Morros y Galerazamba, departamento de Bolívar, Colombia. En M., Hermelin, ed., *Mem. I Seminario Andino de Geología Ambiental-I Conferencia Colombiana de Geología*. 1990.
- Dee, D. P. y Coauthors. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137:553–597, 2011.

- Deltares. *Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments*. User Manual, Delft, Holanda, 2009ba.
- Deltares. *Delft3D-WAVE. Simulation of short-crested waves with SWAN*. User Manual, Delft, Holanda, 2009bb.
- Díaz Gonzáles, Guillermo. Influencia del oleaje y deriva litoral en la región costera de Cartagena de Indias (sector La Boquilla El Laguito). Tesis de Pregrado, 1999. URL <http://www.cioh.org.co/meteorologia/pdfTesis/Tesis4.pdf>. Escuela Naval de Cadetes Almirante José Prudencio Padilla.
- DIMAR, ed. *Caracterización físico-biótica del litoral Caribe colombiano. Tomo II*. CIOH, Cartagena de Indias, Colombia, 2009. ISBN 978-958-99076-1-0. Serie de Publicaciones Especiales CIOH Vol. 2.
- Dingemans, Maarten W. *Water Wave Propagation Over Uneven Bottoms*. World Scientific Publishing, 1997.
- Escobar, Carlos Alejandro. Análisis de sensibilidad espacial de un modelo hidrodinámico del embalse Punchiná (Antioquia). *Revista EIA*, 1(14):97–113, 2010.
- Fredsøe, Jørgen y Deigaard, Rolf. *Mechanics of Coastal Sediment Transport*. World Scientific, 1994. ISBN 9810208413 (pbk).
- GEBCO. *General Bathymetric Chart of the Ocean*, 2014. URL: <http://www.gebco.net/>, Consultada el 20 de marzo de 2014.
- Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bows, E., Carlson, H., Cartwrightm, D.E., Enke, K., Ewing, J. A., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W., y Walden, H. *Mesurements of Wind - Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project*. Deutches Hydrographisches Institut Hamburg, 1973.
- IDEAM. *Atlas Climatológico de Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2005. ISBN 958-8067-14-6.
- JASON. *Ocean Surface Topography Mission. OSTM/Jason-2 Products Handbook*. Centre National d'Études Spatiales (CNES) and the United States National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2011. <  
[http://www.aviso.oceanobs.com/fileadmin/documents/data/tools/hdbk\\_j2.pdf](http://www.aviso.oceanobs.com/fileadmin/documents/data/tools/hdbk_j2.pdf)>.

- Kalnay, E, Kanamitsu, M, Kistler, R, Deaven, D, Gandin, L, Iredell, M, Saha, S, White, G, Woollen, J, Zhu, Y, Chelliah, M, Ebisuzaki, W, Higgins, W, Janowiak, J, Mo, K C, Ropelewski, C, Wang, J, Leetmaa, A, Reynolds, R, Jenne, Roy, y Joseph, Dennis. The NCEP/NCAR 40 - Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996.
- Large, W.G. y Pond, S. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *Journal of Physical Oceanography*, 11:324–336, 1981.
- Leendertse, Jan J. *Aspects of a Computational Model for Long-Period Water-Wave Propagation. RM-5294-PR*. Rand Corporation, Santa Monica, CA, USA, 1967. Ph.D thesis.
- Leendertse, Jan J., Alexander, Richard C., y Liu, Shiao-Kung. *A three-dimensional model for estuaries and coastal seas. Volume I: Principles of Computations. R-1417-OWRR*. Rand Corporation, Santa Monica, CA, USA, 1973.
- Leendertse, J.J. y Gritton, E.C. *A water quality simulation model for well mixed estuaries and coastal seas: Vol. II, Computation Procedures. Tech.Rep. R-708-NYC*. Rand Corporation, 1971. New York City, NY, USA.
- Lynch, D.R. y Davies, A.M. *Quantitative Skill Assessment for Coastal Ocean Models*. Coastal and Estuarine Studies. American Geophysical Union, 1995. ISBN 9780875902616.
- Makin, V.K., Kudryavtsev, V.N., y Mastenbroek. Drag of the sea surface. *Boundary-Layer Meteorology*, 73(Drag of the Sea Surface):159–182, 1995.
- Masselink, Gerhard y Hughes, Michael. *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. Hooper Arnold, Londres, Gran Bretaña, 2003. ISBN 340 76411 2.
- Mei, Chiang C. *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*. World Scientific Publishing, 1989.
- Mesinger, F., DiMego, G., Kalnay, E., Shafran, P., Ebisuzaki, W., Jovic, D., Woollen, J., Mitchell, K., Rogers, E., Ek, M., Fan, Y., Grumbine, R., Higgins, W., Li, H., Lin, Y., Manikin, G., Parrish, D., y W., Shi. North American Regional Reanalysis. *15th Symp. on Global Change and Climate Variations*, 15, 2004. Paper P1.1, Combined Preprints CD-ROM, 84th AMS Annual Meeting, Seattle, WA.

- Mitsuyasu, H. y Kusaba, T. Drag coefficient over water surface under the action of strong wind. *Journal of Natural Disaster Science*, 6(2):43–50, 1984.
- Molina, Amparo, Pelgrain, Arnaud, Suzunaga, Jairo, y Giraldo, Luis. Comportamiento de la dinámica marina en el sector costero entre Galerazamba y Cartagena. *Boletín Científico CIOH No. 17*, págs. 73–78, 1996.
- Molina M., Amparo, Molina M., Consuelo, Thomas, Yves, y Molina M., Luz Elenas. Comportamiento de la línea de costa del Caribe Colombiano sector entre Barranquilla (Bocas de Ceniza) y Flecha de Galerazamba. *Boletín Científico CIOH No. 19*, págs. 68–79, 2001.
- Morales B., Ricardo. *Clasificación e Identificación de las componentes de Marea del Caribe Colombiano*. CIOH, 2004. Boletín Científico. CIOH, 22: 105-14.
- Padman, L. y Erofeeva, S. *Tide Model Driver (TMD) Manual*. Earth and Space Research, 2005.
- Philips, N. A. A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting. *Journal of Metereology*, 14:184–185, 1957.
- Posada, Blanca Olivia y Henao, William. *Diagnóstico de la Erosión en la zona costera del Caribe Colombiano*. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 13, Santa Marta, 2008.
- Rangel Buitrago, Nelson G., Galeano T., Esther Andrea, y Coca Domínguez, Oswaldo. Estudios para la prevención y mitigación de la erosión costera. convenio MADS-INVEMAR. Informe técnico final, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Santa Marta, D.T.C, 2012.
- Roelvink, J. A. y Van Banning, G. K. F. M. Design and development of DELFT3D and application to coastal morphodynamics. En *Hydroinformatics (Balkema, Rotterdam)*. 1994.
- Ruiz Sarrazola, David Alejandro. *Modelamiento de Dinámica Marina en el Caribe, Fase II*. Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 2015.
- Simmons, A., Uppala, S., Dee, D., y Kobayashi, S. ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newsletter*, (110):25–35, 2006.

- Smith, S.D. Wind stress and heat flux over the ocean in gale force winds. *Journal of physical Oceanography*, 10:709–726, 1980.
- SRTM. *Shuttle Radar Topography Mission*. NASA Jet Propulsion Laboratory, 2014. [Http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/](http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/) , Consultada el 20 de marzo de 2014.
- Stelling, Gustaaf Sjoerd. *On the construction of computational methods for shallow water flow problems*. Government Pub. Office, 1984.
- Sutherland, J., Walstra, D.J.R., Chesher, T.J., Rijnvan , L.C., y Southgate, H.N. Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth. *Coastal Engineering*, 51(2):119 – 142, 2004. ISSN 0378-3839. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2003.12.003>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383903001327>.
- Taylor, Karl E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, 106(D7):7183–7192, 2001.
- Tolman, H.L. *User manual and system documentation of WAVEWATCH -III version 1.5*. NOAA/NWS/NCEP/OMB, 1997.
- UHSLC. University of Hawaii Sea Level Center, 2014. [Http://uhslc.soest.hawaii.edu/data/faq](http://uhslc.soest.hawaii.edu/data/faq) , Consultada el 20 de marzo de 2014.
- Uppala, S. M., Killberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., Bechtold, V. Da Costa, Fiorino, M., Gibson, J. K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G. A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R. P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M. A., Beljaars, A. C. M., Berg, L. Van De, Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hlm, E., Hoskins, B. J., Isaksen, L., Janssen, P. A. E. M., Jenne, R., Mcnally, A. P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N. A., Saunders, R. W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K. E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., y Woollen, J. The ERA-40 Re-Analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(612):2961–3012, 2005.
- Rijnvan , L.C, Walstra, D.J.R, Grasmeijer, B, Sutherland, J, Pan, S, y Sierra, J.P. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. *Coastal Engineering*, 47(3):295 – 327, 2003. ISSN 0378-3839. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00120-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00120-5). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383902001205>.

Velásquez M., Liliana. *Modelación del Transporte de Sedimentos en el Golfo de Urabá, Colombia*. Tesis de Maestría, Departamento de Geología, Escuela de Ingeniería, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 2013.

Whitham, G. B. *Linear and Nonlinear Waves*. John Wiley and Sons, 1974.

Yelland, M.J., Moat, B.I., Taylor, P.K., Pascal, R.W., Hutchings, J., y Cornell, V.C. Wind stress measurements from the open ocean corrected for airflow distortion by the ship. *Journal of Physical Oceanography*, 28(7):1511–1526, 1998.