



**Estimación de vientos extremos y sus implicaciones generales en la zona de la costa del
Caribe colombiano**

Silvia Carolina Herrera Sarmiento

Daniela Páez Ramírez

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Ingeniería Civil

Bogotá D.C., Colombia

2020

**Estimación de vientos extremos y sus implicaciones generales en la zona de la costa del
Caribe colombiano**

Proyecto de investigación

Silvia Carolina Herrera Sarmiento

Daniela Páez Ramírez

Tesis presentada como requisito parcial para obtener el título de:

Ingeniero Civil

Director

Ph. D, Juan Pablo Rodríguez Rincón

Universidad Antonio Nariño

Facultad de ingeniería ambiental y civil

Ingeniería civil

Bogotá D.C., Colombia

2020

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

NOTA DE ACEPTACIÓN

Julio Ernesto Riaño Puentes
Jurado

Carlos Martín Molina
Jurado

Lugar de desarrollo del trabajo de grado:

Bogotá, Colombia.

Universidad Antonio Nariño, Sede Sur.

TUTOR DE TESIS

Ph D. JUAN PABLO RODRÍGUEZ RINCÓN

Bogotá D.C., Noviembre de 2020

Dedicatoria y Agradecimientos

Primero que todo le agradezco y le dedico este trabajo a Dios, a mis padres y hermanos que son los pilares de mi vida; gracias por su compañía durante este proceso, su apoyo incondicional, su paciencia y confianza, también quiero agradecerle a mi tía Lucy Ramírez por impulsarme a cumplir este logro; a mi novio Sebastián Hernández por su compañía y apoyo incondicional, a mi compañera de tesis Carolina Herrera por su paciencia, apoyo y esfuerzo durante este trabajo.

Además, le agradezco al ingeniero Juan Pablo Rodríguez por su conocimiento, acompañamiento, apoyo y guía durante este arduo trabajo, gracias por su paciencia y comprensión.

Gracias a todo el equipo docente de la Universidad Antonio Nariño por la formación brindada.

Atentamente: Daniela Páez Ramírez.

Quiero empezar agradeciéndole y dedicándole este trabajo a Dios, a mis padres, a mis abuelitos maternos que son el pilar de mi vida, que siempre me han brindado todo su amor, apoyo y sobre todo por depositar su confianza en mí en estos años, también quiero agradecerle en especial a mi tía Sandra Reyes por motivarme a seguir adelante en esta etapa de mi vida y a toda mi familia a pesar de que se encuentren lejos.

A mi compañera de tesis Daniela Páez por su paciencia, compromiso, esfuerzo y siempre conservar su buen ánimo durante este trabajo.

A mi amiga Marlly Tatiana Pérez por brindarme su amistad durante todos estos años y siempre brindarme su apoyo.

Además, quiero agradecerle al ingeniero Juan Pablo Rodríguez por su paciencia, apoyo, guía y acompañamiento, en este arduo trabajo.

Finalmente, agradezco a la Universidad Antonio Nariño por haberme formado como profesional y aportar a mi crecimiento personal.

Atentamente: Carolina Herrera.

Tabla de contenido

Resumen	1
Abstract	2
1 Introducción	3
2 Objetivos	6
2.1 General.	6
2.2 Específicos.	6
3 Marco Teórico	7
3.1 Viento.	7
3.2 Circulación global atmosférica.	8
3.3 Medición del viento.	10
3.3.1 Boyas de oleaje.	10
3.4 Modelos globales para el viento.	11
3.4.1 Modelo global revisado de vientos termosférico utilizando observaciones satelitales y terrestres.	12
3.4.2 DWM07 modelo empírico global de vientos.	12
3.4.3 Modelo GloWiSMo de la velocidad del viento.	13
3.4.4 Modelo WAVEWATCH III.	14
3.5 Modelado de sistemas climáticos.	15
3.6 Modelos para describir el clima.	17
3.6.1 WRF un modelo de investigación meteorológica.	17
3.6.2 PRECIS (Sistema Regional de Modelación Climática).	20
3.6.3 RAMS (Sistema Regional de Modelado Atmosférico).	20
3.7 Modelos oceánicos (MO).	20
4 Estado del Arte	22
4.1 Aplicación de modelos numéricos para la predicción de la velocidad y dirección del viento costero.	22
4.1.1 Modelo para presión de vientos y simulación de huracanes.	23
4.1.2 Modelos numéricos para la predicción de eventos marítimos.	24
4.2 Modelación de impacto de los vientos en la zona costera.	25
4.2.1 Inicio del modelo WRF en América del Sur para la simulación eólica.	25
4.2.2 Modelo de mesoescala para la predicción de energía eólica.	26

4.3	Metodologías para el análisis del oleaje en el Caribe colombiano.	27
4.3.1	Estudio del oleaje del mar Caribe colombiano.	27
4.3.2	Modelo hidrodinámico y de oleaje del mar Caribe usando DELFT3D.	29
4.4	Avances de las mediciones con boyas oceanográficas.	30
4.5	Desarrollo de aplicaciones para la gestión de datos meteorológicos y marinos.	31
4.5.1	Aplicación móvil para el pronóstico del tiempo climático en base al modelo atmosférico WRF.	31
4.5.2	Aplicación APPMAR 1.0: una caja de herramientas para la gestión de datos meteorológicos y marinos en regiones de información limitada.	32
5	Justificación	35
5.1	Zona de estudio.	35
5.2	Implicaciones de la zona de estudio.	36
5.3	Condiciones meteorológicas del mes de diciembre en el año 1999.	42
5.3.1	Fenómenos meteorológicos sobre el mar Caribe durante el mes de diciembre en el año 1999.	42
5.4	Condiciones meteorológicas del mes de junio en el año 2001.	42
5.4.1	Fenómenos meteorológicos sobre el mar Caribe durante el mes de junio en el año 2001.	42
5.5	Condiciones meteorológicas del mes de marzo en el año 2004.	43
5.5.1	Fenómenos meteorológicos sobre el mar Caribe durante el mes de marzo en el año 2004.	43
5.5.2	Análisis de los parámetros meteorológicos de Cartagena (marzo) del año 2004. 45	
5.5.2.1	Régimen de vientos en superficie (marzo) del año 2004.	45
5.6	Condiciones meteorológicas del mes de enero en el año 2005.	46
5.6.1	Fenómenos meteorológicos sobre el mar Caribe durante el mes de enero en el año 2005.	46
5.6.2	Análisis de los parámetros meteorológicos de Cartagena (enero) del año 2005. 47	
5.6.2.1	Régimen de vientos en superficie (enero) del año 2005.	47
5.7	Condiciones meteorológicas del mes de enero en el año 2006.	51
5.7.1	Fenómenos meteorológicos sobre el mar Caribe durante el mes de enero en el año 2006.	51
5.7.2	Análisis de los parámetros meteorológicos de Cartagena (enero) del año 2006. 51	

5.7.2.1	Régimen de vientos en superficie (enero) del año 2006.....	51
5.8	Condiciones meteorológicas del mes de enero en el año 2007.	56
5.8.1	Fenómenos meteorológicos sobre el mar Caribe durante el mes de enero en el año 2007.....	56
5.8.2	Análisis de los parámetros meteorológicos de Cartagena (enero) del año 2007. 57	
5.8.2.1	Régimen de vientos en superficie (enero) del año 2007.....	57
5.8.2.2	Condiciones oceánicas presentadas sobre el Mar Caribe Colombiano en el mes de enero del 2007.	58
5.9	Condiciones meteorológicas del mes de marzo en el año 2009.....	64
5.9.1	Fenómenos meteorológicos sobre el mar Caribe durante el mes de marzo en el año 2009.....	64
5.9.2	Análisis de los parámetros meteorológicos de Cartagena (marzo) del año 2009. 65	
5.9.2.1	Régimen de vientos en superficie (marzo) del año 2009.....	65
5.9.2.2	Condiciones oceánicas presentadas sobre el Mar Caribe Colombiano en el mes de marzo del 2009.....	65
6	Metodología.....	69
6.1	Análisis de las condiciones actuales.	70
6.1.1	Análisis de la información.	70
6.1.2	Análisis de la información del evento 2004.	72
6.1.3	Análisis de otros eventos ocurridos en la zona.	79
6.2	Montaje del modelo.	79
6.2.1	Datos de entrada del WRF.	79
6.2.2	Puesta punto del modelo.....	80
6.2.2.1	Ejecución del modelo.....	81
6.2.2.2	Descripción de los dominios.....	82
6.2.2.3	Configuración del modelo.....	83
6.3	Comparación de los eventos realizados por el modelo con los datos existentes.....	86
6.4	Complicaciones en la infraestructura.	87
7	Análisis de resultados.....	90
7.1	Resultados de la variable U-10.	92
7.2	Resultados de la variable V-10.	96
7.3	Resultados de la variable resultante.	100

7.4 Métricas para la evaluación del error..... 104
7.5 Implicaciones en la zona costera debido a los eventos meteorológicos..... 108
8 Conclusiones 112
9 Referencias..... 114

Lista de Tablas

Tabla 1. Modelos para describir el clima. Fuente Propia.....	17
Tabla 2. Función del módulo 1 y módulo 2 de la aplicación APPMAR. Fuente Propia	33
Tabla 3. Estadísticas de los frentes fríos del mar Caribe colombiano desde el año 1999 al 2009. Fuente Propia.....	41
Tabla 4. Características de la tormenta tropical Allison en el 2001. Fuente (Matamoros et al., 2001).....	43
Tabla 5. Régimen de vientos en superficie (marzo) del año 2004. Fuente Propia.....	46
Tabla 6. Régimen de vientos en superficie (enero) del año 2005. Fuente Propia.....	48
Tabla 7. Sistemas ciclónicos que afectaron al mar Caribe en el año 2005. Fuente: (CIOH, 2005)	50
Tabla 8. Régimen de vientos en superficie (enero) del año 2006. Fuente Propia.....	53
Tabla 9. sistemas ciclónicos de la temporada ciclónica del año 2006. Fuente: (CIOH, 2006).....	55
Tabla 10. Sistemas ciclónicos que afectaron al Mar Caribe. Fuente:(CIOH, 2006).....	55
Tabla 11. Régimen de vientos en superficie (enero) del año 2007. Fuente Propia.....	58
Tabla 12. Comportamiento de la corriente y la temperatura superficial del mes de enero de 2007. Fuente Propia.....	59
Tabla 13. sistemas ciclónicos de la temporada ciclónica del año 2007. Fuente: (Ospina Vallejo et al., 2007).....	61
Tabla 14. Sistemas ciclónicos que afectaron al Mar Caribe. Fuente:(Ospina Vallejo et al., 2007)	63
Tabla 15. Comportamiento de la corriente y la temperatura superficial del mes de marzo de 2009. Fuente Propia.....	65
Tabla 16. sistemas ciclónicos de la temporada ciclónica del año 2009. Fuente: (Cabeza Durango et al., 2009).....	67
Tabla 17. Sistemas ciclónicos que afectaron al Mar Caribe. Fuente: (Cabeza Durango et al., 2009)	68
Tabla 18. Datos del año 2004 sobre los frentes fríos. Los datos de color rojo representan la mayor altura de ola. Fuente: Invemar.....	71
Tabla 19. Vientos extremos del año 2004. (CIOH, 2004).....	73
Tabla 20. Estaciones meteorológicas ubicadas en el mar Caribe colombiano. Fuente: (IDEAM, 2015).....	75
Tabla 21. Dirección y velocidad del viento de la estación Galerazamba. Fuente: (IDEAM, 2015)	75
Tabla 22. Dirección y velocidad del viento de la estación Apto. Rafael Núñez. Fuente: (IDEAM, 2015).....	76
Tabla 23. Dirección y velocidad del viento de la estación Apto. Simón Bolívar. Fuente:(IDEAM, 2015).....	76
Tabla 24. Datos de entrada para la modelación (WRF). Fuente: (WRF, 2020).....	80
Tabla 25. Tiempo de ejecución del modelo. Fuente Propia.....	83
Tabla 26. Características del dominio. Fuente Propia.....	84
Tabla 27. Características físicas del modelo. Fuente Propia.....	86

Tabla 28. Coordenadas de la zona de análisis. Fuente Propia.....	86
Tabla 29. Relación entre la velocidad del viento y los daños en la infraestructura. Fuente: (Oas, 2000).....	89
Tabla 30. Salidas del modelo WRF. Fuente: (Cordex WRF, 2020).....	90
Tabla 31. Resultados arrojados por la variable (U-V). Fuente Propia	107
Tabla 32. Resultados arrojados por la variable (resultante). Fuente Propia.....	108
Tabla 33. Daños debido a los eventos meteorológicos del 2014 al 2019. Fuente Propia	109

Lista de Figuras

Figura 1. Anemómetro de cazoletas tipo Robinson. Fuente:(Ruiz Murcia et al., 2017).....	7
Figura 2. Cinturones de viento globales en el hemisferio norte. Fuente: (Lumen, 2020).....	9
Figura 3. Celdas atmosféricas. Fuente:(CEUPE, 2020)	9
Figura 4. Tipos de mediciones de las boyas de oleaje. Fuente: (Darrera, 2019).....	10
Figura 5. Características de los modelos globales de viento. Fuente:(Energy data, 2020).....	11
Figura 6. DWM07 (izquierda) vientos perturbadores zonales y meridionales (derecha) en función de la hora local magnética y la latitud para tres niveles de Kp diferentes. Fuente:(Emmert et al., 2008).....	13
Figura 7. Distribución global del primer momento L que representa la velocidad media del viento cerca de la superficie a una altura de 10 m sobre el nivel del suelo. Fuente:(Jung & Schindler, 2020).....	14
Figura 8. Modelo de onda global. Fuente: (NOOA, 2020)	15
Figura 9. Modelo climático basado en la media anual térmica del aire superficial. Fuente: NOAA GFDL	15
Figura 10. Proceso general sugerido para simular y modelar un sistema climático (SC). Fuente: (Díaz et al., 2017).....	16
Figura 11. Estructura básica de un modelo para simular la dinámica de un sistema climático. Fuente: (Díaz et al., 2017).....	17
Figura 12. Estructura del WRF. Fuente:(Skamarock et al., 2008)	18
Figura 13. Pronóstico de lluvia para el 31 de octubre de 2014 realizado con el WRF. Los tonos indican la cantidad de lluvia en mm, en este caso la escala de color inicia 1mm (gris) hasta 25 mm (rojo). Fuente: (IDEAM, 2014).....	19
Figura 14. Mapa de dominio del modelo WRF. Fuente:(Kibona, 2020b)	26
Figura 15. Fuentes de información. Fuente Propia	28
Figura 16. Variables que se pueden calcular a partir del modelo DELF3D. Fuente Propia.	30
Figura 17. Bases de datos y modelos numéricos. Fuente Propia	33
Figura 18. estructura de la aplicación APPMAR. Fuente Propia.....	34
Figura 19. Ubicación geográfica de la zona Caribe colombiana. Fuente Propia	36
Figura 20. Afectaciones por los vendavales en la ciudad de Barranquilla. Fuente: El Heraldo	37

Figura 21. Rosa de viento en superficie en la ciudad de Cartagena en marzo de 2004. Fuente:(CIOH, 2004)	45
Figura 22. Rosa de viento en superficie en la ciudad de Cartagena de diciembre 2004 a enero 2005. Fuente:(CIOH, 2005)	48
Figura 23. Rosa de viento en superficie en la ciudad de Cartagena de diciembre 2005 a enero 2006. Fuente: (CIOH, 2006)	52
Figura 24. Rosa de viento en superficie en la ciudad de Cartagena de diciembre 2005 a enero 2006. Fuente: (Ospina Vallejo et al., 2007)	57
Figura 25. Panel superior el Comportamiento de la TSM y en el panel inferior la corriente del mes de enero de 2007. Fuente:(Ospina Vallejo et al., 2007)	59
Figura 26. Panel superior el Comportamiento de la TSM y en el panel inferior la corriente del mes de marzo de 2009. Fuente: (Cabeza Durango et al., 2009).....	66
Figura 27. Afectaciones a causa de los eventos ocurridos en el 2004. Fuente: El Pílon	69
Figura 28. Metodología del proyecto. Fuente Propia.....	70
Figura 29. Datos sobre las magnitudes y vectores de la velocidad del viento brindados por la Invemar. Fuente Propia	71
Figura 30. Velocidad del viento (m/s) desde 1999 al 2009. Los tonos indican el valor de la velocidad en m/s, en este caso la escala de color empieza desde 0 m/s (azul) hasta 5 m/s (rojo). En la figura (a), (b) y (c) se observa que el dominio es la zona Caribe colombiana. Fuente: Invemar.....	72
Figura 31. Rosa de viento en superficie en la corriente del mar Caribe desde el año 1981 al 2010. Fuente: (IDEAM, 2020)	77
Figura 32. Opciones físicas del WRF. Fuente: (Rodríguez Rincón, 2016).....	81
Figura 33. Proceso de ejecución del modelo. Fuente: (UCAR, 2020b)	81
Figura 34. Descripción del proceso de ejecución del modelo. Fuente: (UCAR, 2020b)	82
Figura 35. Dominios anidados ubicados en el territorio colombiano. Fuente Propia	83
Figura 36. Ubicación de los puntos sobre el dominio 2. Fuente Propia.....	87
Figura 37. Daños en la infraestructura a causa de los fenómenos meteorológicos. Fuente: (El Heraldo, 2020).....	88
Figura 38. Se observa parte de la infraestructura urbana muy cerca del talud y afectada por la acción del mar. Fuente: (Invemar, 2008)	89
Figura 39. Resultado del dominio anidado 1 y 2. Los tonos indican el valor de la velocidad en (m/s), en este caso la escala de color empieza desde 1 m/s (azul) hasta -16 m/s (rojo). Fuente Propia	91
Figura 40. Huracan ETA categoría 5. Fuente: (CIOH, 2020).....	110
Figura 41. Daños en San Andrés Isla. Fuente: (Infobae, 2020)	110
Figura 42. Daños en San Andrés y Providencia por el huracán Iota. Fuente: (Jiménez, 2020)...	111

Lista de Gráficas

Gráfica 1. Altura de ola significativa de marzo del año 2004. Fuente Propia	74
Gráfica 2. Oleaje del año 2004. Fuente: (CIOH, 2004)	78
Gráfica 3. Variable U (Punto 1). Fuente Propia	92
Gráfica 4. Variable U (Punto 2). Fuente Propia	93
Gráfica 5. Variable U (Punto 3). Fuente Propia	94
Gráfica 6. Variable U (Punto 4). Fuente Propia	94
Gráfica 7. Variable U (Punto 5). Fuente Propia	95
Gráfica 8. Variable U (Punto 6). Fuente Propia	96
Gráfica 9. Variable V (Punto 1). Fuente Propia	97
Gráfica 10. Variable V (Punto 2). Fuente Propia	97
Gráfica 11. Variable V (Punto 3). Fuente Propia	98
Gráfica 12. Variable V (Punto 4). Fuente Propia	99
Gráfica 13. Variable V (Punto 5). Fuente Propia	99
Gráfica 14. Variable V (Punto 6). Fuente Propia	100
Gráfica 15. Resultante (Punto 1). Fuente Propia	101
Gráfica 16. Resultante (Punto 2). Fuente Propia	101
Gráfica 17. Resultante (Punto 3). Fuente Propia	102
Gráfica 18. Resultante (Punto 4). Fuente Propia	103
Gráfica 19. Resultante (Punto 5). Fuente Propia	103
Gráfica 20. Resultante (Punto 6). Fuente Propia	104
Gráfica 21. Correlación punto 6 de la resultante. Fuente Propia	108

Resumen

El mar Caribe colombiano representa el 28.46% de agua en el territorio colombiano, el cual se caracteriza por su múltiple sistema oceánico donde se concentran distintas transformaciones físicas y químicas que moldean las costas; reutiliza elementos que resultan del continente y abastecen de hábitat y alimento a diversas especies marinas. Se caracteriza por su extensa diversidad de ecosistemas marinos y una amplia biodiversidad que persiste sorprendiendo con la riqueza de sus aguas tropicales. Su estudio ha sido un gran desafío ya que su comportamiento es muy variable, se deben examinar todos los componentes que contribuyen en su dinámica y composición (Bastidas Salamanca & Ricaute Villota, 2017).

Debido a los estudios realizados al cambio climático se puede observar que los fenómenos meteorológicos extremos se encuentran en aumento, volviéndose una gran preocupación debido a sus fuertes impactos sociales y económicos causado por inundaciones, erosión, daños por tormentas y afectaciones en las estructuras marítimas y puertos, etc (Soto & Quiñones, 2013).

A causa de los eventos extremos de viento que se han presentado en los últimos años en la zona del Caribe colombiano, se ha decidido realizar una investigación en el cual se compararan los datos de viento brindados por el modelo de reanálisis WAVEWATCHIII de la NOAA / NCEP consolidados en la aplicación Appmar 2.0 de la Universidad del norte para la región Caribe, con la información generada por el modelo numérico de predicción y mesoescala (WRF). Esto con el fin de analizar con más precisión los vientos de esta zona, y tener datos más verídicos.

Palabras claves: Modelo WRF, mar Caribe colombiano, vientos, fenómeno meteorológico, Appmar.

Abstract

The Colombian Caribbean Sea represents 28.46% of the water in the Colombian territory, which is characterized by its multiple oceanic system where different physical and chemical transformations that mold the coasts are concentrated; it reuses elements that result from the continent and supply habitat and food to diverse marine species. It is characterized by its extensive diversity of marine ecosystems and a wide biodiversity that persists surprising with the richness of its tropical waters. Its study has been a great challenge since its behavior is very variable; all the components that contribute to its dynamics and composition must be examined (Bastidas Salamanca & Ricaute Villota, 2017).

Due to the studies carried out on climate change, it can be observed that extreme weather events are on the rise, becoming a great concern due to their strong social and economic impacts caused by floods, erosion, storm damage and effects on maritime structures and ports, etc (Soto & Quiñones, 2013).

Due to the extreme wind events that have occurred in the last few years in the Colombian Caribbean region, it has been decided to carry out an investigation in which the wind data provided by the NOAA / NCEP WAVEWATCHIII reanalysis model consolidated in the University of the North's Appmar 2.0 application for the Caribbean region will be compared with the information generated by the numerical prediction and mesoscale model (WRF). This in order to analyze more accurately the winds of this area, and have more accurate data.

Key words: WRF model, Colombian Caribbean Sea, winds, Meteorological phenomenon, Appmar.

1 Introducción

Los vientos que afectan las superficies oceánicas y las áreas costeras tienen un impacto significativo en diversas actividades, como la pesca, el turismo, las operaciones portuarias, la navegación comercial y la navegación recreativa. Precisamente en Colombia los vientos extremos son el principal forzador de eventos meteorológicos como los son los frentes fríos (Alejandro & Sarrazola, 2015; Posada Jaramillo, 2019), que año tras año causan numerosas afectaciones en la zona costera como son daños en la vivienda e infraestructura pública, privada y comunitaria, afectaciones en las vías y deslizamientos.

Sin embargo, estos vientos no se comportan igual en las diferentes épocas del año, ya que presentan gran variedad de velocidad y/o dirección, es por ello que se utilizan métodos in situ como la utilización de boyas oceanográficas para su medición, pero estos métodos in situ no brindan la información necesaria para los estudios costeros. Además de ello, en el país la información sobre la medición del viento, es muy escasa, a causa de esto, se hacen modelos atmosféricos de mesoescala para compensar la falta de información (Luo et al., 2008).

Es por este motivo, que el principal objetivo de este proyecto es realizar la estimación de los vientos extremos a escala 1:250 del Caribe colombiano durante un evento reportado de vientos extraordinarios, utilizando el modelo Weather Research and Forecasting (WRF), el cual tiene un sistema de predicción meteorológica numérica de mesoescala, para producir simulaciones que pueden llegar a hacer reales o ideales para la predicción del clima (William C Skamarock et al., 2005).

Teniendo en cuenta las actividades que se realizan en el mar del Caribe colombiano, como lo son la pesca, el tránsito marino, la explotación petrolera, la construcción, la recreación y el turismo y la explotación de los recursos marinos del país (Daniel et al., 2015), es importante brindar una información detallada sobre la caracterización del clima marítimo, y del pronóstico del viento y el oleaje.

Este trabajo este compuesto por los siguientes capítulos estructurados como se describe a continuación:

Capítulo 3. Marco teórico.

El objetivo de este capítulo es describir todas las fuentes de consulta teórica de las que puede disponer el problema a investigar. Basado en lo anterior se realizaron las siguientes consultas: definición del viento, mediciones del viento, los modelos del clima, modelos del viento, modelos oceánicos.

Capítulo 4. Estado del arte.

En esta sección del trabajo se describen los diferentes avances científicos sobre los estudios realizados sobre los modelos numéricos para la predicción del viento costero, también se puede observar avances sobre la generación de la energía eólica a partir del modelo de mesoescala WRF.

Capítulo 5. Justificación.

En esta sección del trabajo se describe la zona de estudio donde fue aplicado el marco de trabajo desarrollado en esta investigación. De manera concreta se presenta los eventos meteorológicos presentados en la zona Caribe colombiana desde el año 1999 al 2009.

Capítulo 6. Metodología.

En esta sección se describe en detalle la metodología desarrollada en el proyecto, la cual consiste en la modelación y el análisis de los eventos ocurridos en el año 2004 de vientos extremos, debido a que fue uno de los eventos reportado con más incidentes en la zona costera.

Capítulo 7. Análisis de resultados.

Como su nombre lo indica, este capítulo contiene los resultados de la aplicación de la modelación en el WRF del evento extremo registrado en el año 2004. Así mismo, se incluye el análisis de la incertidumbre de cada etapa de la modelación, a fin de determinar el comportamiento de las variables U, V y la resultante, y los errores a lo largo de la reproducción del modelo.

Capítulo 8. Conclusiones y futuras líneas del trabajo.

Por último, el octavo capítulo resume las conclusiones más importantes de este trabajo de investigación, junto con algunas sugerencias respecto a las futuras líneas de investigación que se desprendan de esta tesis.

2 Objetivos

2.1 General.

Estimar vientos extremos a escala 1:250 del Caribe colombiano para el mes de marzo del año 2004.

2.2 Específicos.

- Recopilar la información de los eventos extremos del viento que se presentaron en los últimos años.
- Realizar una reducción de escala a través de un modelo numérico de los vientos extremos para el evento más representativo.
- Realizar un análisis general de las implicaciones en la zona costera (generalidades en las estructuras marítimas, playas, etc), debido a los eventos meteorológicos.

3 Marco Teórico

3.1 Viento.

Es el movimiento producido por el aire natural y las diferencias de presión que se generan a partir del calentamiento de la superficie terrestre. De este modo, el aire cálido se extiende y produce una zona de baja presión, mientras que el aire frío desarrolla una zona de alta presión. Con el propósito de alcanzar un balance atmosférico entre la presión y el aire se presentan variaciones en el tiempo y el espacio (Ruiz Murcia et al., 2017).

En la Figura 1 se puede observar el instrumento de medición para monitorear el viento, que es el anemómetro, el cual se ubica a 10 metros de altura en lugares que sean abiertos y libre de obstáculos.



Figura 1. Anemómetro de cazoletas tipo Robinson. Fuente: (Ruiz Murcia et al., 2017)

El calentamiento térmico en la atmósfera produce las variaciones en la densidad de las partículas de aire, en consecuencia, de la presión atmosférica (Ruiz Murcia et al., 2017).

Además, Los vientos dirigen grandes circulaciones oceánicas y transfieren momentum a la superficie del océano para producir corrientes marinas y olas. El oleaje también proporciona parámetros morfológicos e hidrodinámicos que influyen en el modelamiento de las costas y transporte de sedimento (Daniel et al., 2015).

En Colombia se utiliza el modelo WRF para obtener detalles del viento a nivel regional y nacional, el cual permite incluir una correcta orografía, y condiciones del suelo que se pueden obtener de coberturas USGS y el espectrómetro MODIS para asimilar datos de estaciones nacionales. La parametrización física básica que se emplea es la que utiliza el IDEAM, la cual permite emitir pronósticos y predicciones en este caso del viento (Ruiz Murcia et al., 2017).

3.2 Circulación global atmosférica.

Es el movimiento del aire atmosférico a gran escala, y el medio por el cual la energía se distribuye en la tierra. Este movimiento ocasiona que el aire se mueva de áreas de alta presión a áreas de baja presión. Además, conduce a áreas de alta precipitación, como son selvas tropicales, desiertos, etc (Bitesize, 2020).

La circulación atmosférica es variable de un año a otro, pero su funcionamiento es el mismo. Existen sistemas atmosféricos individuales, que son aleatorios como los sistemas de baja presión, células convectivas, etc (CEUPE, 2020).

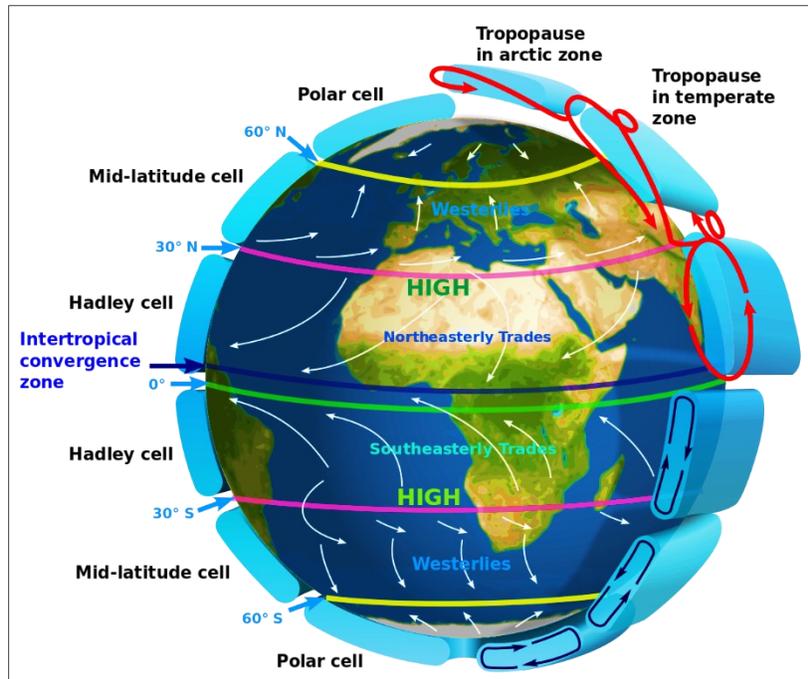


Figura 2. Cinturones de viento globales en el hemisferio norte. Fuente: (Lumen, 2020)

Existen tres tipos de celdas atmosféricas de gran importancia en la circulación atmosférica.

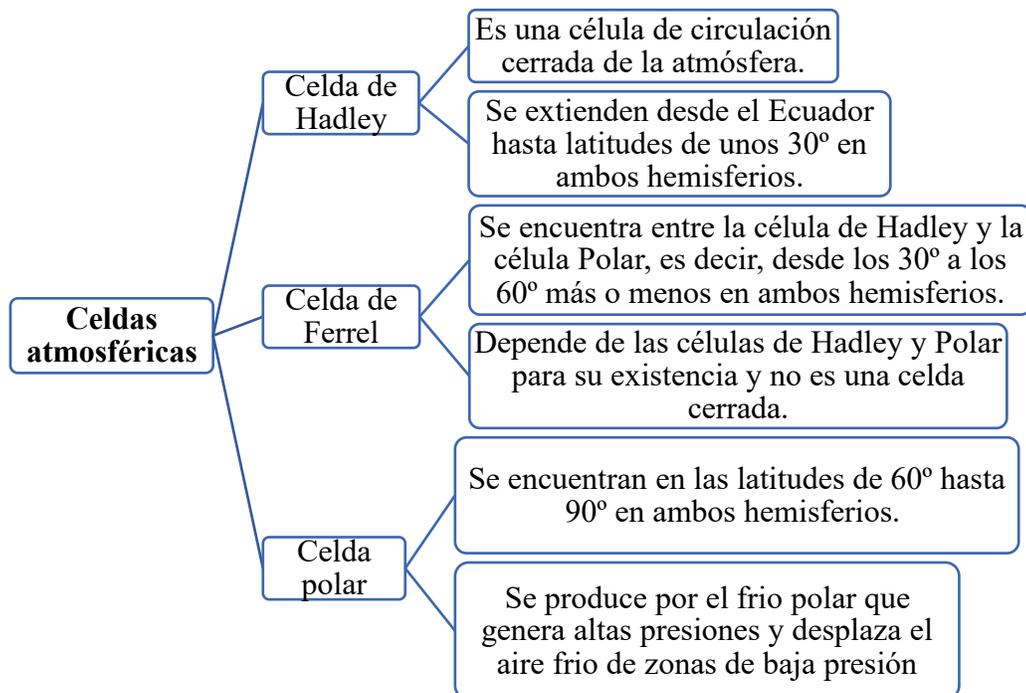


Figura 3. Celdas atmosféricas. Fuente: (CEUPE, 2020)

3.3 Medición del viento.

El viento puede medirse por medio de sensores como son las veletas, anemómetro, barómetros, boyas de oleaje, etc.

La medición del viento desde la parte meteorológica se realiza por medio de boyas oceanográficas, las cuales permiten tener valores más precisos sobre el comportamiento del viento en donde se puede conocer principalmente su velocidad y dirección.

3.3.1 Boyas de oleaje.

Su diseño se basa especialmente para el monitoreo de las condiciones marítimas como estudios marítimos y seguridad portuaria. Además, cuenta con una unidad central llamada “datalogger”, que permite controlar todo el sistema central, alimentar cada sensor y capturar los datos que se suministran en la unidad (Darrera, 2019). En la Figura 4 se encuentran los principales tipos de mediciones de las boyas de oleaje.

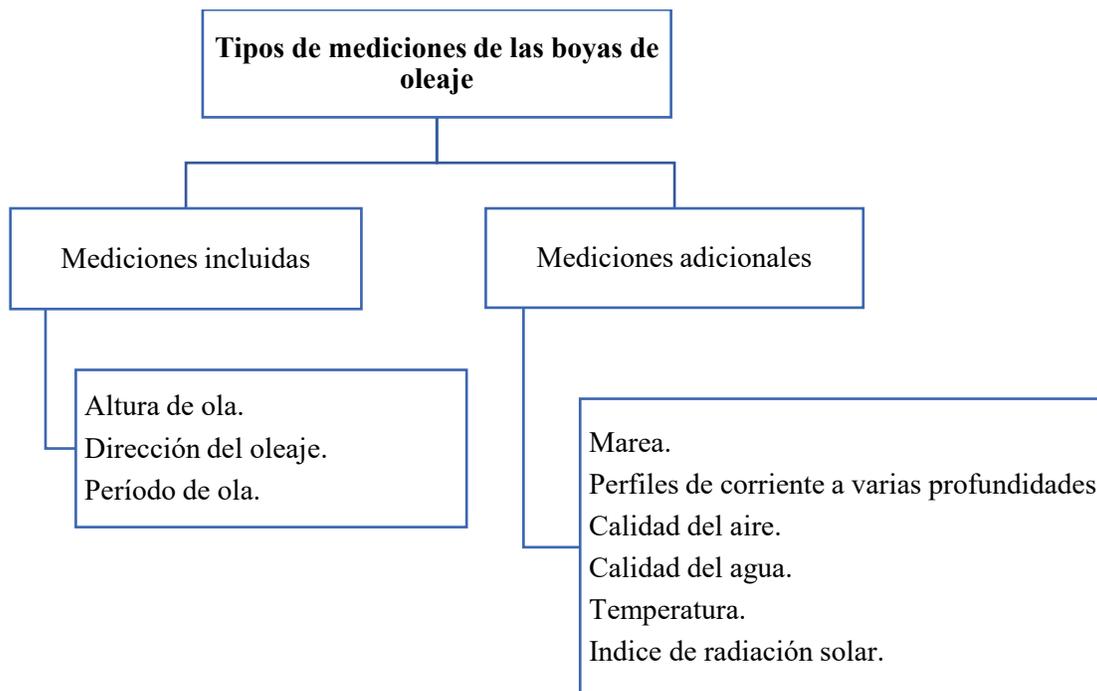


Figura 4. Tipos de mediciones de las boyas de oleaje. Fuente: (Darrera, 2019)

La medición realizada por las boyas con respecto al viento, meteorológicamente, es el movimiento del aire según su intensidad y duración; estos pueden llegar a producir pequeñas ráfagas de viento y llegar hasta un tornado. Por eso es importante conocer su velocidad y su dirección, con el fin de prevenir catástrofes naturales (Castaño Sánchez, 2011).

Además, oceanográficamente se usan para proveer mediciones de la elevación de la superficie libre a través de los océanos. Las mediciones que crean son ampliamente usadas para producir parámetros promediados de las olas, como la altura significativa de las olas y el período de pico, junto con estadísticas de onda por ola, como las distribuciones de altura de cresta (McAllister & van Den Bremer, 2020).

3.4 Modelos globales para el viento.

Los modelos globales para el viento son aplicaciones de desarrollo web diseñadas para realizar un soporte de ayuda a los planificadores, legisladores, e inversores; de este modo pueden realizar la identificación a través de los programas o desarrollos; por otra parte, la mayor área de viento se presenta en diferentes zonas y proceden a realizar los cálculos preliminares (Energy data, 2020). Los modelos principalmente determinan áreas de vientos fuertes en cualquier lugar del mundo, además constantemente caracterizan la información que se encuentra en la Figura 5.

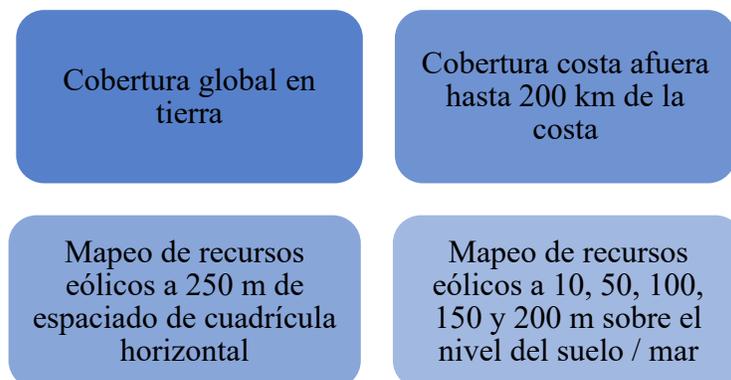


Figura 5. Características de los modelos globales de viento. Fuente: (Energy data, 2020)

3.4.1 Modelo global revisado de vientos termosférico utilizando observaciones satelitales y terrestres.

Los datos del viento termosférico obtenidos de los satélites Atmosphere Explorer E y Dynamics Explorer 2, se han combinado con los datos del viento para la termosfera inferior y superior del radar de dispersión incoherente con base en tierra, y los interferómetros ópticos Fabry-Perot para generar una revisión (HWM90) del empírico HWM87 modelar y extender su aplicabilidad a 100 km.

El modelo global revisado de vientos termosférico utilizado en observaciones satelitales, describe la transición de variaciones predominantemente diurnas en la termosfera superior a variaciones semidiurnas en la termosfera inferior, y una transición del flujo de verano a invierno por encima de 140 km a flujo de invierno a verano por debajo. Se encuentra que los gradientes de altitud significativos en el viento se extienden a 300 km en algunas horas locales y plantean complicaciones para la interpretación de las observaciones de Fabry-Perot (Hedin et al., 1991).

3.4.2 DWM07 modelo empírico global de vientos.

El modelo de viento de perturbación empírica global (DWM07), representa perturbaciones promedio inducidas por tormentas geoespaciales de vientos neutrales termosféricos superiores (200–600 km de altitud). DWM07 depende de los siguientes tres parámetros: latitud magnética, hora local magnética y el índice de actividad geomagnética de 3 h Kp.

Este modelo toma datos del interferómetro de imágenes de viento a bordo del satélite de investigación, el espectrómetro de temperatura y viento a bordo del Dynamics Explorer 2 y siete interferómetros Fabry-Perot basados en tierra (Emmert et al., 2008).

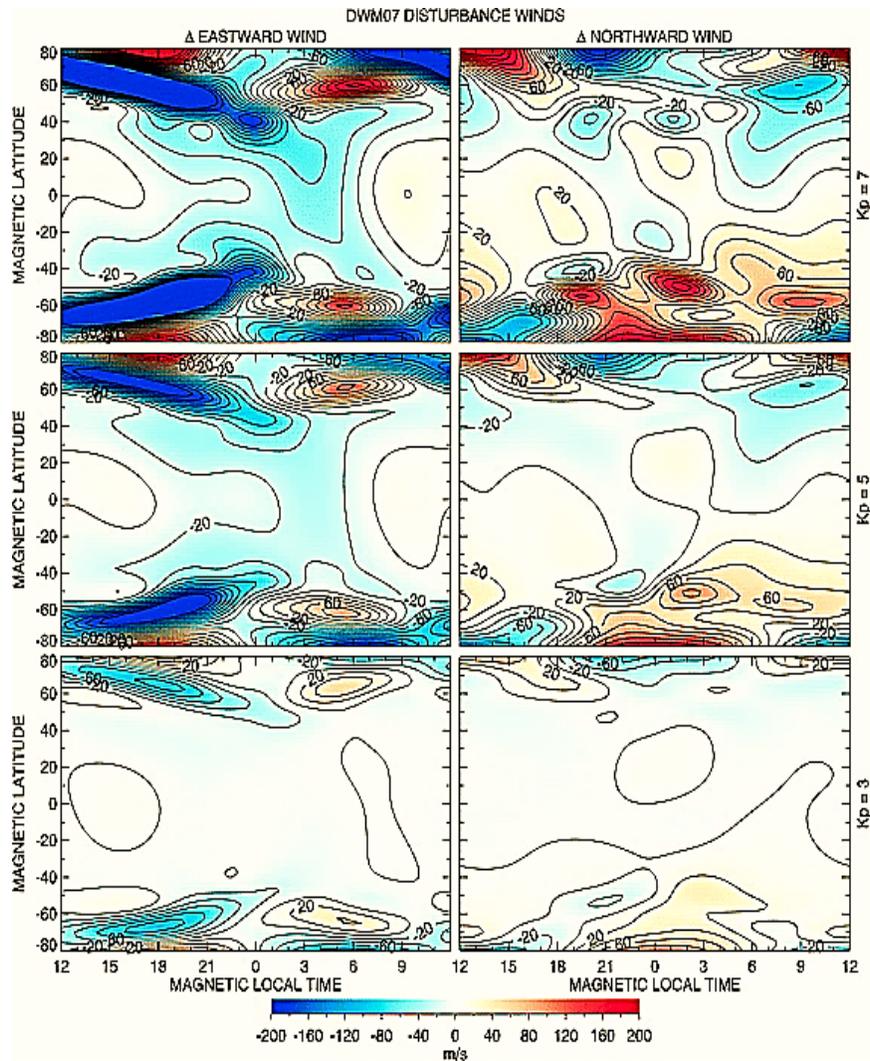


Figura 6. DWM07 (izquierda) vientos perturbadores zonales y meridionales (derecha) en función de la hora local magnética y la latitud para tres niveles de Kp diferentes. Fuente: (Emmert et al., 2008)

3.4.3 Modelo GloWiSMo de la velocidad del viento.

El modelo GloWiSMo sirve para mapear los momentos L sobre la velocidad del viento, que se produce próxima a la superficie en una escala de alta resolución espacial (250 m × 250 m) (GloWiSMo). El modelo se basa en un enfoque de refuerzo de mínimos cuadrados que es un algoritmo de aprendizaje automático (Jung & Schindler, 2020). En la Figura 7 se puede observar una representación de la velocidad media del viento.

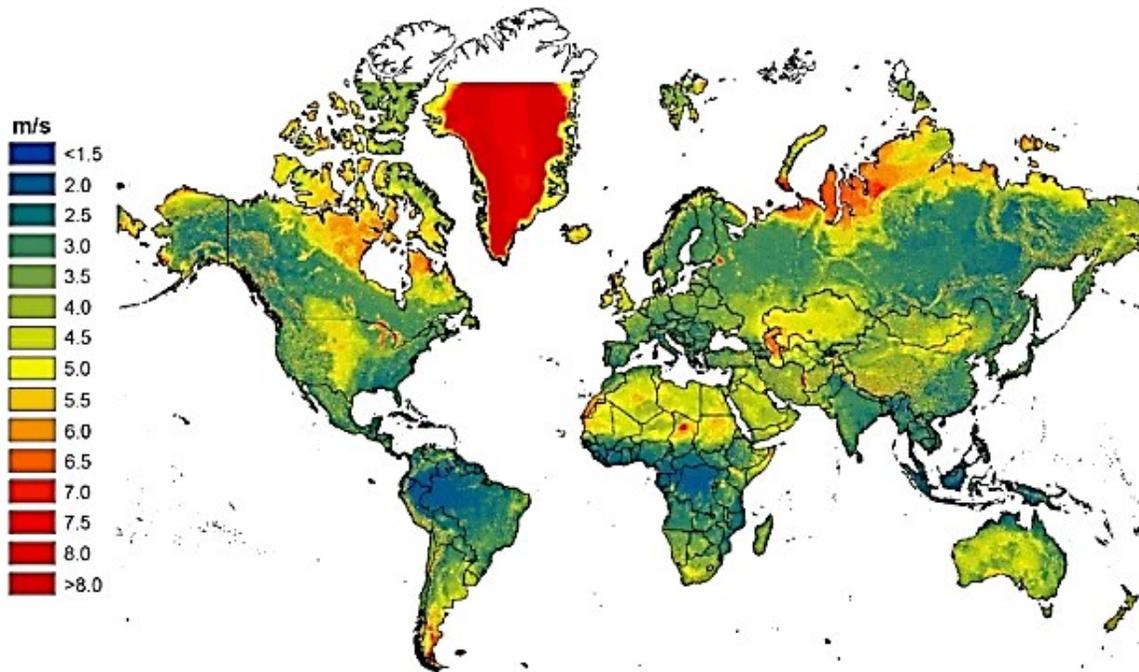


Figura 7. Distribución global del primer momento L que representa la velocidad media del viento cerca de la superficie a una altura de 10 m sobre el nivel del suelo. Fuente: (Jung & Schindler, 2020)

3.4.4 Modelo WAVEWATCH III.

El WAVEWATCH III (WW3) (Tolman, 1989, 1991a, 1991b) es un modelo de onda de tercera generación desarrollado en NOAA / NCEP para el desarrollo e investigación de viento y el oleaje en el pacífico y el caribe (WAMDIG, 1988). WW3 resuelve la ecuación de equilibrio de densidad de acción espectral de fase aleatoria para espectros en la dirección del número de onda. El supuesto implícito de esta ecuación es que las propiedades del medio (profundidad del agua y corriente), así como el campo de las olas en sí, varían en escalas de tiempo y espacio que son mucho más grandes que las escalas de variación de una sola ola (Komen et al., 1994).

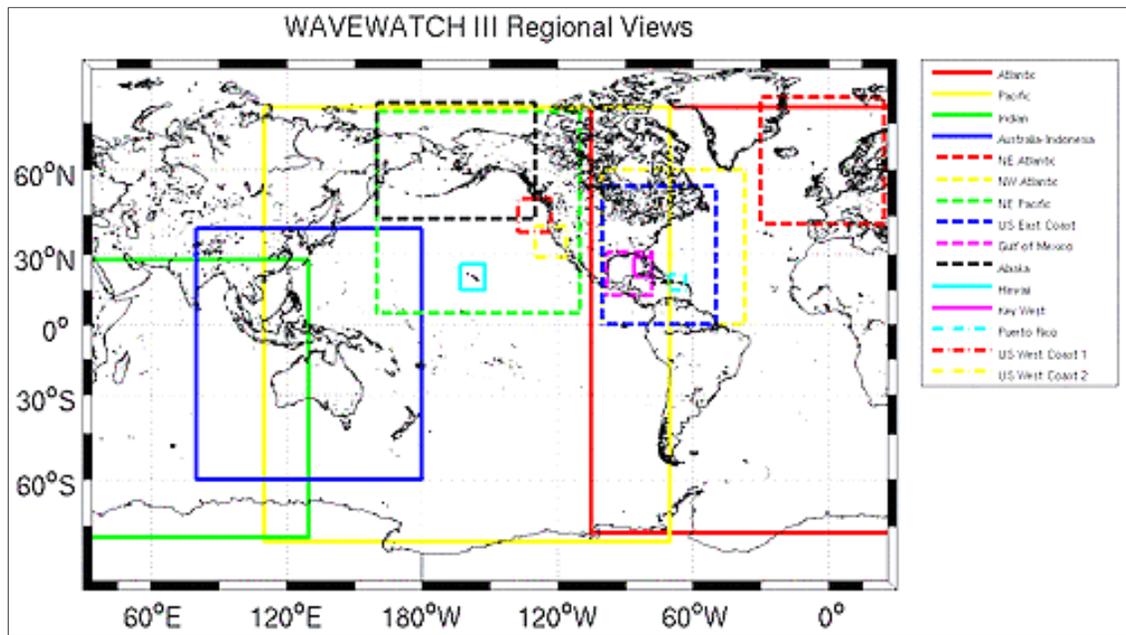


Figura 8. Modelo de onda global. Fuente: (NOOA, 2020)

3.5 Modelado de sistemas climáticos.

Tiene como finalidad describir el comportamiento temporal y espacial de las variables que conforman el sistema. El objeto de estudio puede ser la atmósfera, el océano, o el microclima de un invernadero (Díaz et al., 2017). El proceso general para simular y modelar un sistema climático, se puede apreciar en la Figura 10.

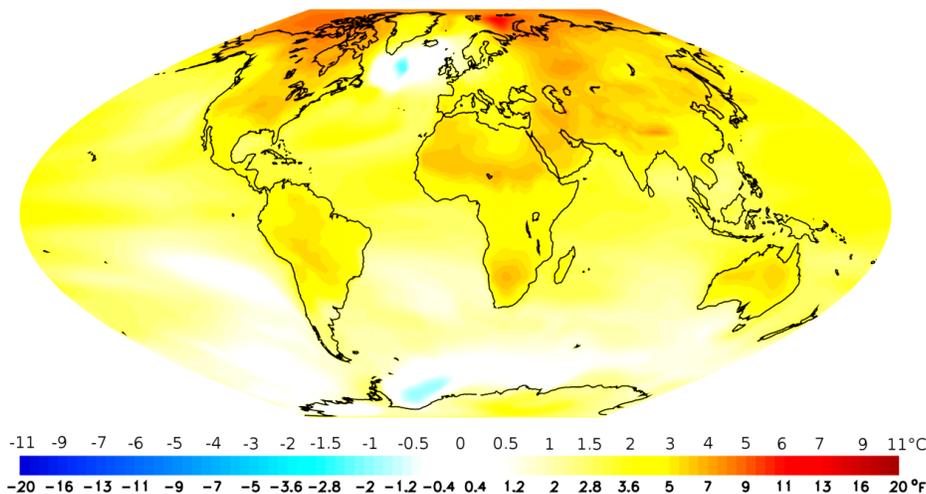


Figura 9. Modelo climático basado en la media anual térmica del aire superficial. Fuente: NOAA GFDL

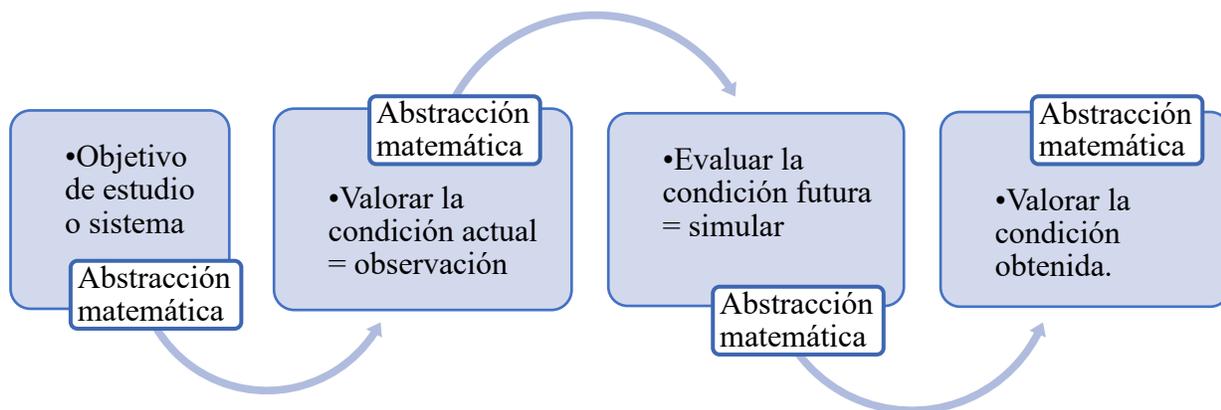


Figura 10. Proceso general sugerido para simular y modelar un sistema climático (SC). Fuente: (Díaz et al., 2017)

En cuanto la abstracción matemática que se describe anteriormente, son aquellos procesos físicos que se relacionan con la transmisión de masa, energía y momentum. Estos intercambios suceden entre las partes del sistema y de ellos con el medio externo (Díaz et al., 2017).

Para evaluar la condición actual se debe reunir la información disponible de las variables asociadas al sistema, como son: la radiación solar, temperatura, presión, viento, humedad y precipitación radiación ultravioleta, dirección de los vientos, pluviometría. La información anteriormente descrita se obtiene de las estaciones meteorológicas (Díaz et al., 2017).

El resultado del proceso general para modelar y simular un sistema climático, será un modelo cuya estructura básica pueda resumirse, como se indica en la Figura 11.

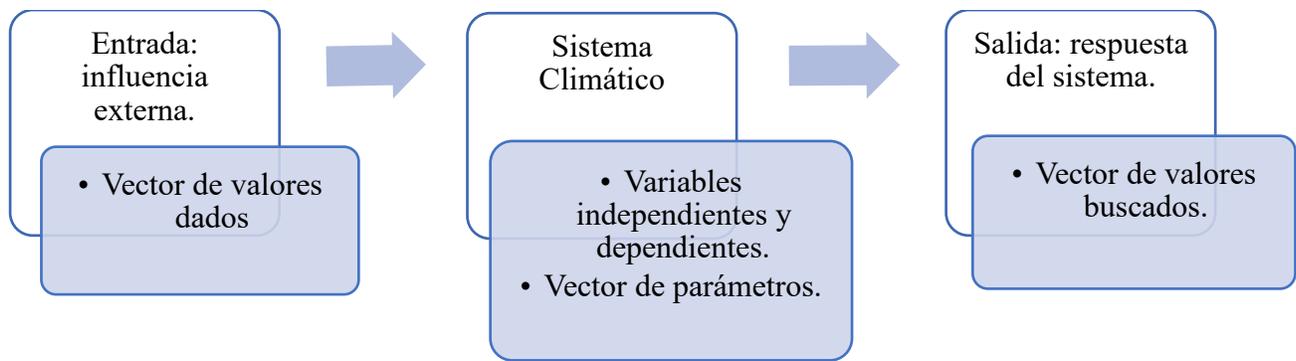


Figura 11. Estructura básica de un modelo para simular la dinámica de un sistema climático. Fuente: (Díaz et al., 2017)

3.6 Modelos para describir el clima.

Los modelos atmosféricos se caracterizan por representar los procesos físicos que se encuentran en la atmosfera. Pertenece al grupo de los modelos de la calidad del aire, hasta únicamente los climáticos. En la Tabla 1 se pueden apreciar algunos modelos utilizados en Colombia para realizar estudios y pronosticar el clima.

Modelos atmosféricos globales	Modelos atmosféricos regionales
GFS (Sistema de pronóstico global).	RAMS (Sistema Regional de Modelado Atmosférico).
CCM3 (Modelo de clima comunitario), del Centro Nacional de Investigación Atmosférica.	WRF (Modelo de investigación y pronóstico del tiempo).
ECHAM (Modelo de circulación general).	PRECIS (Sistema Regional de Modelación Climática).

Tabla 1. Modelos para describir el clima. Fuente Propia

3.6.1 WRF un modelo de investigación meteorológica.

Es un modelo mesoescala que tiene como finalidad el estudio de la atmósfera. Las variables meteorológicas de entrada que usa WRF son las componentes de velocidad del viento, temperatura,

humedad relativa, topografía, humedad, temperatura del mar, espesor de la nieve, uso del suelo y la altura geopotencial en los niveles de presión: 1000, 850, 500, 400, 300, 250, 200, 150, y 100 mb (Díaz et al., 2017; William C Skamarock et al., 2008). En la Figura 12 se encuentra la estructura básica del software WRF.

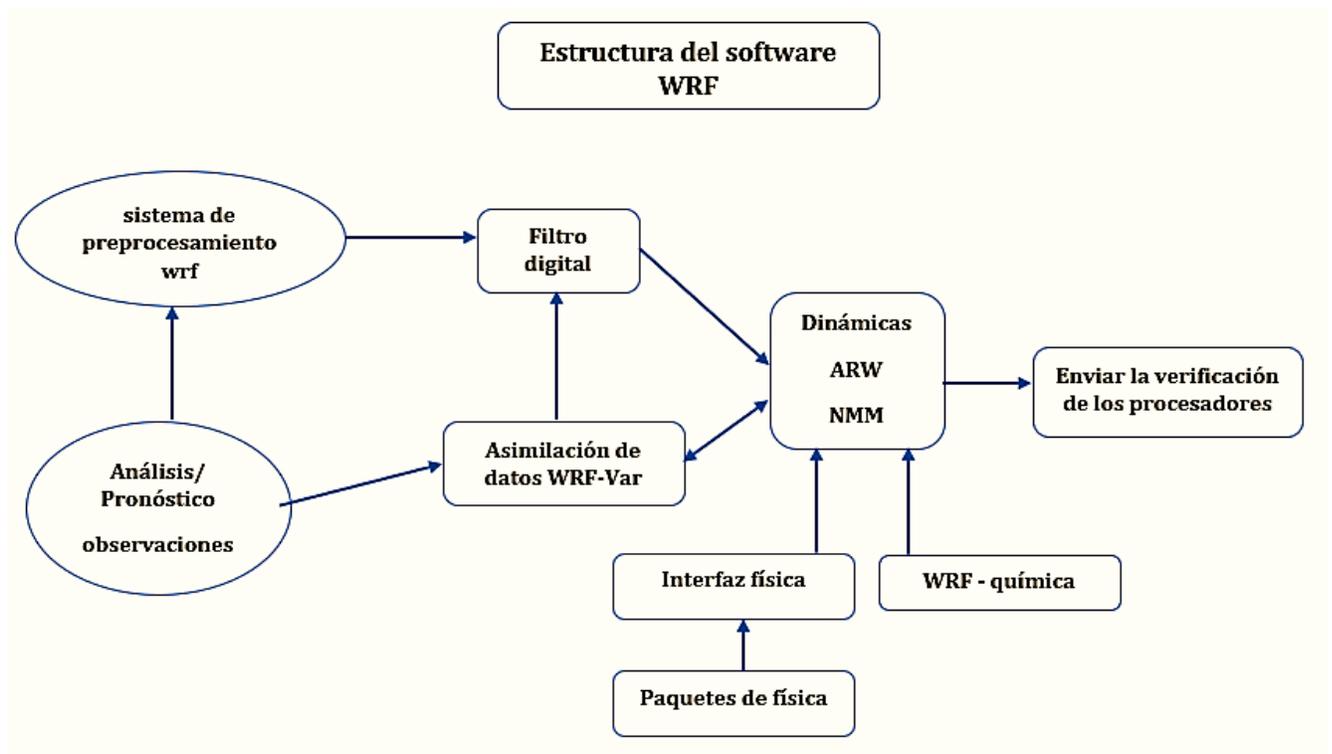


Figura 12. Estructura del WRF. Fuente:(Skamarock et al., 2008)

Las principales variables de salida son las componentes del viento, la velocidad vertical, la perturbación en la temperatura potencial, la perturbación en el geopotencial y la perturbación y la presión de aire seco en superficie. Sin embargo, son más de 90 variables las que pueden estimarse con el WRF (Díaz et al., 2017).

Este modelo usa las ecuaciones de Euler que se logran obtener al despreciar los términos disipativos en las ecuaciones de Navier-Stokes. Se puede aplicar con la aproximación hidrostática o la no hidrostática. Las ecuaciones son planteadas en coordenadas verticales de presión, que tienen

la ventaja de seguir la forma del terreno. El método numérico que utiliza para solucionar el conjunto de ecuaciones es el de Runge-Kutta de segundo y tercer orden. El tipo de grilla que usa se denomina Arakawa C y usa pasos de tiempo cortos, de modo que puedan resolverse las ondas de gravedad y ondas acústicas (William C Skamarock et al., 2008; Wang et al., 2020).

Cabe resaltar que en Colombia es uno de los modelos atmosféricos más utilizados por las diferentes instituciones, aunque son pocos los trabajos publicados sobre los resultados (Aragón et al., 2012; Díaz et al., 2017). Una de las instituciones colombianas que ha implementado el uso del modelo WRF en sus estudios e investigaciones es el IDEAM, en este caso realizaron un pronóstico de lluvia como se puede observar en la Figura 13.

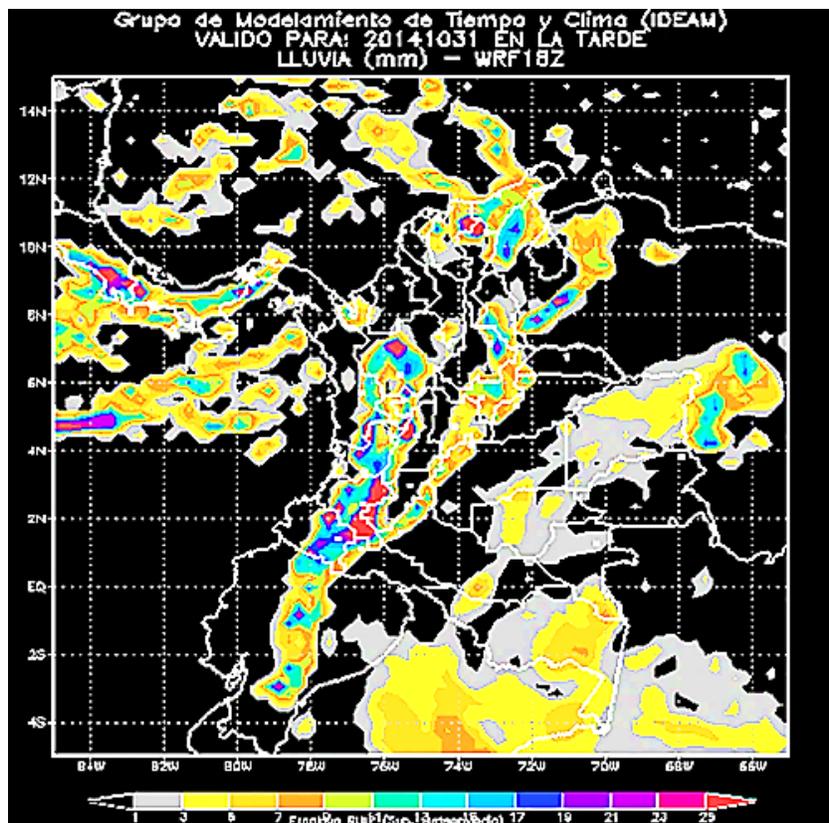


Figura 13. Pronóstico de lluvia para el 31 de octubre de 2014 realizado con el WRF. Los tonos indican la cantidad de lluvia en mm, en este caso la escala de color inicia 1mm (gris) hasta 25 mm (rojo). Fuente: (IDEAM, 2014)

3.6.2 PRECIS (Sistema Regional de Modelación Climática).

Es un Sistema Regional de Modelación Climática que se basa en la tercera generación del modelo climático regional del Hadley Centre (HadRM3), junto con datos fáciles de usar interfaz en procesamiento y visualización. Su diseño flexible permite aplicaciones en cualquier región del mundo (Centre, n.d.; McSweeney et al., 2012).

Al igual que cualquier otro modelo climático regional, PRECIS está fomentado por un límite de condiciones simuladas por modelos de circulación general (MCG).

3.6.3 RAMS (Sistema Regional de Modelado Atmosférico).

El Sistema de Modelado Atmosférico Regional (RAMS) es utilizado para simular procesos atmosféricos de corto plazo. Para realizar integraciones de modelos de año completo a varios años, se ha desarrollado una versión climática de RAMS (ClimRAMS), que se utiliza para simular ciclos diurnos, estacionales y anuales de variables e interacciones atmosféricas e hidrológicas (Liston & Pielke, 2001).

Las condiciones de contorno lateral del modelo son generadas por productos de reanálisis NCEP de seis horas. ClimRAMS incluye submodelos simplificados de precipitación, radiación, y representaciones que describen la evolución estacional de los parámetros relacionados con la vegetación. Además, puede usar todas las capacidades generales de RAMS, como sus submodelos de radiación más complejos y esquemas explícitos de microfísica de nubes y precipitaciones (Liston & Pielke, 2001).

3.7 Modelos oceánicos (MO).

Se caracterizan por describir la dinámica y termodinámica de los océanos, que facilitan el estudio de los problemas costeros y su circulación. Estos modelos pueden simular las condiciones

de temperatura, corrientes y salinidad a lo largo de áreas costeras como mares, puertos, bahías y estuario. En la parte ambiental se utiliza para hacer modelaciones sobre la trayectoria de derrame de contaminantes, y así pronosticar la calidad del agua (Díaz et al., 2017).

Por otro lado, el océano no ha podido ser estudiado en su totalidad, debido a la recolección de información en campo. Históricamente ha sido más difícil tomar datos en el océano que en la atmósfera, no solo por la limitación de los instrumentos a grandes profundidades, sino también por los costos operacionales de los buques oceanográficos (Díaz et al., 2017).

La implementación de estos modelos ha permitido el conocimiento acerca del comportamiento de la cuenca del Pacífico colombiano, ya que anteriormente solo se podían obtener datos a partir de los cruceros oceanográficos de la Armada Nacional.

4 Estado del Arte

Los diferentes avances de los modelos meteorológicos han permitido abordar la investigación sobre las nuevas aplicaciones que se han venido desarrollando sobre el estudio y pronóstico del viento.

En los últimos años el modelo WRF ha sido uno de los modelos de mesoescala más utilizados en la investigación meteorológica. Es un modelo de PNT adecuado con una amplia gama de aplicaciones que incluyen predicciones en tiempo real, desarrollo y estudios de datos, investigación de física parametrizada atmosférica, simulaciones climáticas regionales, modelado de la calidad del aire, acoplamiento atmósfera-océano, simulaciones idealizadas, etc (Gholami et al., 2021; W.C. Skamarock et al., 2019).

Este modelo también se utiliza para estudiar y pronosticar la velocidad y dirección del viento, donde el límite lo proporcionan los datos del análisis final (FNL), que son un producto del sistema de asimilación de datos globales (GDAS), que utiliza el Modelo de medio espectral global para simular múltiples fuentes de datos y pronosticar la meteorología. Estos datos (FNL) son del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP)(Gholami et al., 2021).

4.1 Aplicación de modelos numéricos para la predicción de la velocidad y dirección del viento costero.

Los vientos juegan un papel fundamental en la hidrodinámica del mar, al ser el principal forzador de las corrientes superficiales y del oleaje. Al jugar un papel tan importante en la hidrodinámica del mar diferentes autores como ((Di et al., 2019); (Olaofe, 2019); (Dong et al., 2018); (Wu et al., 2020); (Zhao et al., 2017); (Cannon et al., 2017); (Tolman & Chalikov, 1996);

(Holland, 1980); (Vickery et al., 2000)) han desarrollado diferentes modelos, con el fin de evaluar la velocidad y la dirección del viento.

A pesar del desempeño que han tenido estos modelos de alta resolución en los vientos marinos, es importante resaltar que estas tareas de modelado requieren de recursos computacionales y tiempo para obtener resultados de calidad. Además, es importante no descartar el valor de los vientos obtenidos por satélite para futuras modelaciones, ya que son una fuente de información valiosa.

Debido a los estudios realizados sobre el viento marino, en diversos países se han podido generar nuevas fuentes de energía no contaminantes como se menciona anteriormente.

4.1.1 Modelo para presión de vientos y simulación de huracanes.

El autor (Holland, 1980) en el artículo *un modelo analítico de los perfiles de viento y presión en huracanes*, presenta un modelo analítico en donde los perfiles radiales permiten medir la presión a nivel del mar y los vientos de un huracán. Este modelo emplea ecuaciones que contienen dos parámetros que se pueden considerar a partir de observaciones en un huracán o determinarse por medio de la climatología para definir un huracán.

A partir del estudio anteriormente realizado, determinaron que este modelo es superior a otros dos modelos ampliamente utilizados, además se considera una ayuda valiosa en la previsión operativa, estudios de casos y trabajos de ingeniería.

En la revista de ingeniería estructural se encuentra el estudio realizado por los autores (Vickery et al., 2000), en el cual desarrollaron un modelo para la simulación de huracanes el cual brinda información sobre la intensidad, el tamaño y la velocidad de traslación de la tormenta. En

la investigación describen las ecuaciones de movimiento de un huracán, la cual resuelve y parametriza el uso de simulaciones de ejecución rápida.

El modelo que se describe anteriormente tiene en cuenta los efectos del cambio de la rugosidad de la superficie del mar y la diferencia de temperatura entre el aire y el mar en las velocidades estimadas del viento a nivel de la superficie.

A partir del estudio anterior, se puede determinar que el modelo para la simulación de huracanes sirve para realizar comparaciones entre los registros de la velocidad del viento de un huracán modelado y observado, también permite comparar las velocidades medias del viento en 10 minutos como las velocidades máximas del viento en ráfagas.

Otro estudio valioso fue realizado por la Sociedad Meteorológica Estadounidense por (Tolman & Chalikov, 1996), en el cual desarrollaron un modelo de olas de viento oceánico de tercera generación. Este nuevo modelo se basa en una fuente de interacción no lineal y de entrada desarrollados previamente, y un nuevo término de fuente de disipación. La disipación está ajustada para que el modelo represente un comportamiento de crecimiento idealizado de alcance limitado.

Los resultados que brinda son un excelente comportamiento en la sensibilidad de los errores numéricos, y resultados similares a los WAM, con recuperaciones extremadamente cortas.

4.1.2 Modelos numéricos para la predicción de eventos marítimos.

En la zona costera debido a los fuerte vientos que generan olas peligrosas, se producen los ciclones tropicales que tienen un gran poder destructivo ocasionando inundaciones costeras, bien sea por el mar de fondo ocasionado, si el evento se mueve alejado de la costa o por la combinación con la surgencia del huracán.

En el estudio realizado por (Mitrani Arenal et al., 2012) buscaban la predicción de eventos de ola en el Pacífico Oriental, sobre el cual se presentaron diferentes huracanes (John, Lane, Paul) en la temporada ciclónica del año 2006. Para poder analizar la influencia de los huracanes sobre el estado dinámico de la superficie marina, hicieron uso de la aplicación del modelo numérico WRF y WW3, en el cual determinaron que los recursos computacionales empleados son para sistemas que se encuentren en el área de estudio, puesto que las condiciones de fetch, son determinadas por la propia circulación del sistema.

Los resultados obtenidos son de utilidad para futuras investigaciones, ya que permite entender la influencia de los huracanes sobre el estado dinámico de la superficie marina en el área de interés y elaborar pronósticos operativos del tiempo climático para esta región.

4.2 Modelación de impacto de los vientos en la zona costera.

4.2.1 Inicio del modelo WRF en América del Sur para la simulación eólica.

En los últimos tiempos la producción de energía eólica marina ha aumentado, ya que se ha convertido en una de las formas de generación de energía no contaminante más atractiva, esto gracias a velocidades del viento más altas y estables y al aumento del potencial de las turbinas eólicas.

Las evaluaciones de los recursos de la energía eólica requieren de datos in situ, para analizar el comportamiento del viento en ciertas áreas. Sin embargo, los datos in situ no siempre están disponibles para los proyectos eólicos, la mayoría se encuentran en áreas marinas.

En América del Sur, se ha demostrado que Chile tiene un alto potencial para el desarrollo de la energía eólica marina; ya que los datos en alta mar no se encuentran disponibles en esa zona, hicieron uso del modelo WRF. En Chile este modelo es relativamente nuevo, ya que pocos autores,

como Mattar y Borvaranlo lo han utilizado para la simulación eólica marina. Sin embargo, no existe evidencia científica que considere un análisis de la configuración inicial de WRF sobre las costas de Chile (González-Alonso de Linaje et al., 2019).

4.2.2 Modelo de mesoescala para la predicción de energía eólica.

Otros autores como (Kibona, 2020a) también ha realizado estudios sobre la *Aplicación del modelo de mesoescala WRF para la predicción de recursos de energía eólica en Tanzania*, con este tipo de modelos es posible promover el estudio sobre el potencial de la energía eólica marina. Además, este modelo cuenta con una alta resolución horizontal a menos de cien metros y varios dominios, que permiten llevar a cabo un análisis detallado sobre los recursos de la energía eólica, complementada con mediciones reales del patrón de viento.



Figura 14. Mapa de dominio del modelo WRF. Fuente: (Kibona, 2020b)

La creciente industria de la energía eólica y el aumento de ocurrencias de eventos climáticos extremos, han producido interés en la simulación del viento, aunque actualmente sigue siendo un gran desafío para los modeladores atmosféricos involucrados en la investigación y aplicaciones

meteorológicas. Estos modelos meteorológicos regionales son una herramienta bastante útil para estudiar y simular variables meteorológicas (David Carvalho et al., 2012).

4.3 Metodologías para el análisis del oleaje en el Caribe colombiano.

4.3.1 Estudio del oleaje del mar Caribe colombiano.

Uno de los aspectos más importantes que se ha tratado de entender en los últimos tiempos sobre la dinámica del océano, es el comportamiento del oleaje, debido a su impacto en las actividades marítimas como navegación, recreación, ingeniería oceánica, etc (Osorio et al., 2009).

La información del oleaje juega un papel importante en la gestión y planificación costera en el país colombiano, ya que influye de forma directa en las decisiones relacionadas con estudios de defensa costera, desarrollo turístico y diseño portuario (Torres Parra & Lonin, 2007).

En Colombia la información existente sobre el clima del oleaje es limitada. Debido a la limitación de información de oleaje con resolución espacial y temporal en el Caribe colombiano, recurrieron a otras fuentes de datos dentro de los cuales se encuentra datos modelados y sintéticos, que son obtenidos a partir de campos de vientos pasados también modelados empleando técnicas de reanálisis.

En la investigación *Reconstrucción de cuarenta años de datos de oleaje en el mar Caribe colombiano empleando el modelo WWIIITM y diferentes fuentes de datos* realizada por (Osorio et al., 2009) hicieron uso del modelo Wave Watch IIITM, el cual fue desarrollado en el *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), del *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA); se caracteriza por resolver la ecuación de acción de balance de densidad espectral para el espectro direccional. Por medio de este modelo pudieron generar 40 años de datos

históricos sobre el oleaje y el desarrollo de la metodología coeficiente de correlación vectorial (CCV), que permite la combinación de datos y corregir el oleaje de origen numérico.

Para la simulación del modelo anteriormente descrito emplearon diversas fuentes de información, las cuales se pueden evidenciar en la Figura 15.

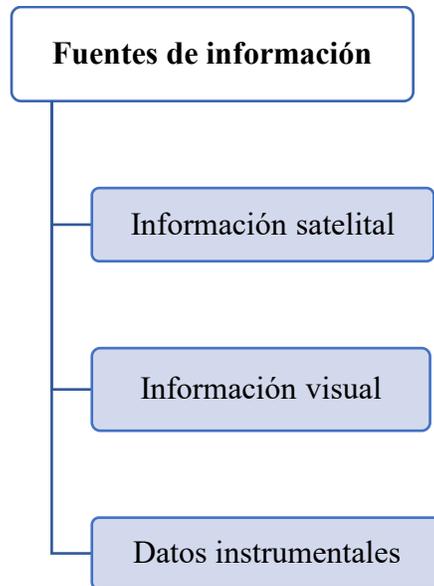


Figura 15. Fuentes de información. Fuente Propia

El modelo Wave Watch IIITM permite el reanálisis de series de oleaje en donde se pueden corregir los datos obtenidos por satélites y aplicar los coeficientes obtenidos a cada uno de los datos modelados (Osorio et al., 2009).

Otra investigación es el *Estudio o del espectro de oleaje en el Caribe observado con boyas y su representación en el espectro Jonswap* desarrollado por (Torres Parra & Lonin, 2007), en el cual buscan analizar los espectros de oleaje en el Caribe a partir de las mediciones de las boyas instaladas en el proyecto SMPOM. Con este proyecto lograron mejorar la información sobre el comportamiento del oleaje.

4.3.2 Modelo hidrodinámico y de oleaje del mar Caribe usando DELFT3D.

En la tesis *Metodología para simular la dinámica marina en el Mar Caribe* de (Alejandro & Sarrazola, 2015) desarrollaron una metodología para simular la hidrodinámica del mar Caribe. A causa de la falta de estaciones de monitoreo y la poca claridad en las políticas sobre el manejo de información, ocasionaron dificultad en el desarrollo del proyecto, el cual busca la construcción de infraestructura y la mitigación de la erosión costera.

Aunque han realizado múltiples estudios sobre la dinámica marina, estos se encuentran limitados. Como alternativa han desarrollado distintos modelos numéricos para reproducir corrientes, el oleaje y las mareas.

Debido a la problemática anterior, realizaron simulaciones haciendo uso de la plataforma DELFT3D que permite acoplar la hidrodinámica del oleaje y los fenómenos de transporte. Este modelo también considera las fuerzas gravitacionales sobre mareas, forzamientos atmosféricos y la descarga de los principales afluentes del mar (Alejandro & Sarrazola, 2015).

El modelo DELFT3D sirve para generar datos de condiciones de frontera para modelos de menos escala. También permite analizar la influencia de parámetros físicos, numéricos y estadísticos que ayudan a determinar la hidrodinámica marina.

Otro estudio realizado es el *Modelo hidrodinámico y de oleaje del mar Caribe usando DELFT Caribe* por (Posada Jaramillo, 2019) en el cual presentan un modelo matemático de gran escala en tres dimensiones que analiza la hidrodinámica marina y el oleaje.

Esta plataforma de modelación DELFT3D es utilizada para la simulación multidimensional de flujos y fenómenos de transporte. El modelo permite calcular lo que se observa en la Figura 16.

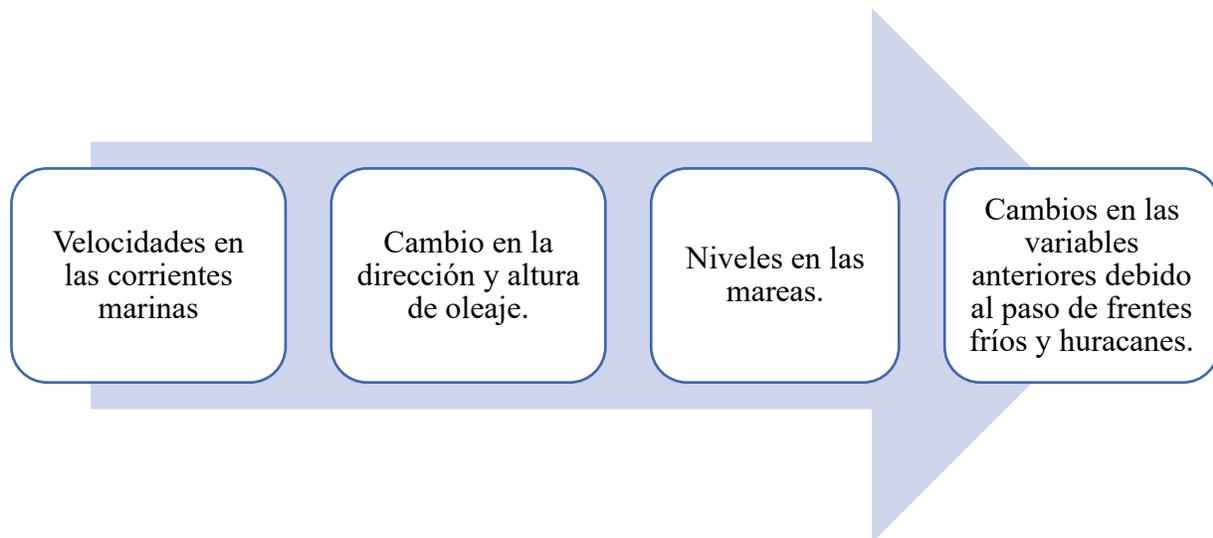


Figura 16. Variables que se pueden calcular a partir del modelo DELF3D. Fuente Propia.

4.4 Avances de las mediciones con boyas oceanográficas.

Las boyas oceanográficas son un punto de información meteorológica y oceanográfica importante que funcionan como una estación de información (Castaño Sánchez, 2011). La información que arrojan sirve para realizar estudios meteorológicos de las costas marinas, y como un punto de información para los navegantes (Gómez Reali, 2013).

Debido a la falta de información sobre la dinámica marina, se utilizan este tipo de instrumentos como son las boyas, la cuales se ubican en el mar y se anclan en el fondo marino, donde realizará sus funciones de recoger información oceanográfica. La recolección de información la realiza por medio de un sistema electrónico (Castaño Sánchez, 2011).

Actualmente las boyas oceanográficas aprovechan el movimiento de las olas para generar energía eléctrica. Esta forma de energía renovable aún se encuentra en desarrollo.

En las últimas décadas los datos tomados por las boyas son de gran relevancia, ya que permiten realizar múltiples estudios tanto oceanográficos, meteorológicos y climáticos. En el artículo *Comparación de vientos reanalizados, analizados, recuperados por satélite y modelados de PNT*

con datos de boyas a lo largo de la costa de la Península Ibérica de (D. Carvalho et al., 2014), en donde realizaron una comparación de los vientos marinos modelados por GFS y WRF con las mediciones in situ.

En este estudio realizado en la Península Ibérica implementaron el modelo WRF para la simulación de NWP de los vientos oceánicos cercanos a la superficie. El modelo NWP de última generación fue desarrollado por NECP y el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR), los detalles sobre el código del modelo se encuentran disponibles en (William C Skamarock et al., 2008).

Para esta investigación los datos de viento marino utilizados fueron recopilados por boyas y satélites como Sea Winds de la NASA. Es importante recalcar que los modelos climáticos, atmosféricos y oceánicos requieren datos precisos del viento de la superficie oceánica para representar los campos de fuerza oceánica y las interacciones entre el aire y el mar (D. Carvalho et al., 2014).

4.5 Desarrollo de aplicaciones para la gestión de datos meteorológicos y marinos.

4.5.1 Aplicación móvil para el pronóstico del tiempo climático en base al modelo atmosférico WRF.

En la Universidad del Bío-Bío, Chile, se han venido desarrollando diferentes avances en el departamento de Geofísica a una de las herramientas más utilizadas en el área de modelación y pronósticos climáticos, cuyo propósito es la creación de una aplicación móvil para dispositivos Android que presente un pronóstico verídico del tiempo a partir de la información generada por el modelo de predicción climático WRF (Torres Ferrada & Ávila Momberg, 2014).

Para el desarrollo de la aplicación móvil, utilizaron las características originales del dispositivo, como lo es el sensor GPS para brindar el pronóstico del clima diario. También es posible hacer uso de la aplicación de Google Maps, para seleccionar de manera interactiva un lugar en específico.

En cuanto a la programación, no solo emplearon el sistema operativo Android, sino que también se utiliza PHP para el servidor y Matlab para la interacción con el modelo WRF.

4.5.2 Aplicación APPMAR 1.0: una caja de herramientas para la gestión de datos meteorológicos y marinos en regiones de información limitada.

Los estudios de ingeniería oceánica, oceanográfica y costera requieren de información meteorológica y marina de lugares específicos. El nivel del mar, las corrientes, las olas y vientos son elementos importantes para la calibración y validación de modelos. A pesar de los estudios realizados en las regiones del Pacífico y Caribe colombiano en Sudamérica, existen serias limitaciones en la recolección de información.

Debido a la limitación de información, los investigadores y consultores de acceso se centran en el análisis de bases de datos internacionales de viento y olas. Estos datos los utilizan como condiciones de contorno para modelos numéricos de ola. Las bases de datos y modelos numéricos más utilizados se encuentran en la Figura 17.

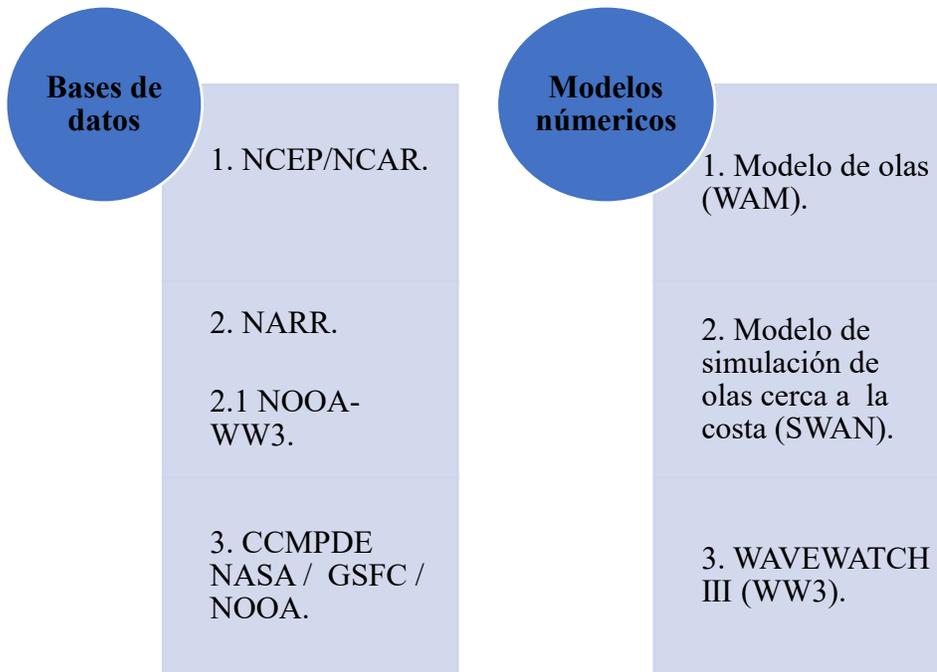


Figura 17. Bases de datos y modelos numéricos. Fuente Propia

APPMAR se encuentra basado en las características de Python utilizando las siguientes bibliotecas: Numpy, Matplotlib y Pandas. El código principal tiene la capacidad de llamar 2 módulos, dependiendo de la tarea que desee ejecutar el usuario.

Módulo 1	Módulo 2
Descarga la información de la base de datos.	Procesa la información del módulo 1 en base al análisis estadístico.
Extrae datos de viento y oleaje.	Calcula el régimen medio y el análisis a largo plazo de viento y oleaje.

Tabla 2. Función del módulo 1 y módulo 2 de la aplicación APPMAR. Fuente Propia

La estructura de la aplicación APPMAR se encuentra constituida de la siguiente forma.

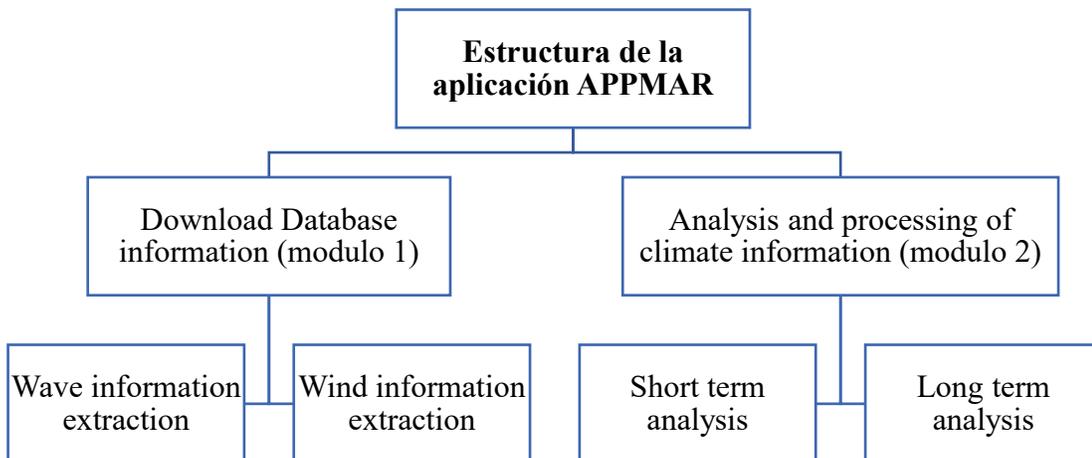


Figura 18. estructura de la aplicación APPMAR. Fuente Propia

La aplicación APPMAR 1.0 realizó un gran aporte frente a la posibilidad de realizar análisis estadísticos utilizando metodologías estandarizadas y código libre. Esta versión permite procesar la información marina recopilada de la base de datos NOAA y de otras fuentes, de manera rápida y eficiente.

5 Justificación

5.1 Zona de estudio.

La zona de estudio se encuentra en el mar Caribe, el cual se encuentra ubicado en el océano Atlántico, al este de América Central y al norte de América del sur, limitando al norte con las Antillas Mayores (Cuba, Haití, República Dominicana y Puerto Rico), al sur con Venezuela, Colombia y Panamá, al este con las Antillas Menores y al oeste con México, Belice, Guatemala, Honduras, Nicaragua y Costa Rica (Alejandro & Sarrazola, 2015).

Tiene una superficie de $2'763,800 \text{ km}^2$, su punto más profundo se encuentra en la fosa de las islas Caimán (7,686m). Su superficie se encuentra dividida en 5 cuencas oceánicas superadas entre sí, lo que da una batometría poco uniforme. Las cuencas de mayor tamaño son:

- Cuenca de Colombia: tiene una profundidad promedio de 3,000m.
- Cuenca de Venezuela: tiene una profundidad promedio de 5,000m.

La línea costera tiene un número de accidentes geográficos como lo son: el canal de Yucatán, el paso de los vientos, el canal de la mona, la península de Yucatán, la península de la Guajira, el golfo del Darién, etc.

Debido a la ubicación de la zona Caribe se presenta un clima tropical (semiárido), el cual presenta temperaturas en la superficie que varían entre los 26°C y 29°C durante el transcurso de todo el año, con aumentos en el mes de mayo y disminución en el mes de diciembre. El clima se define por el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que permite definir el comportamiento de los vientos alisios (Alejandro & Sarrazola, 2015).

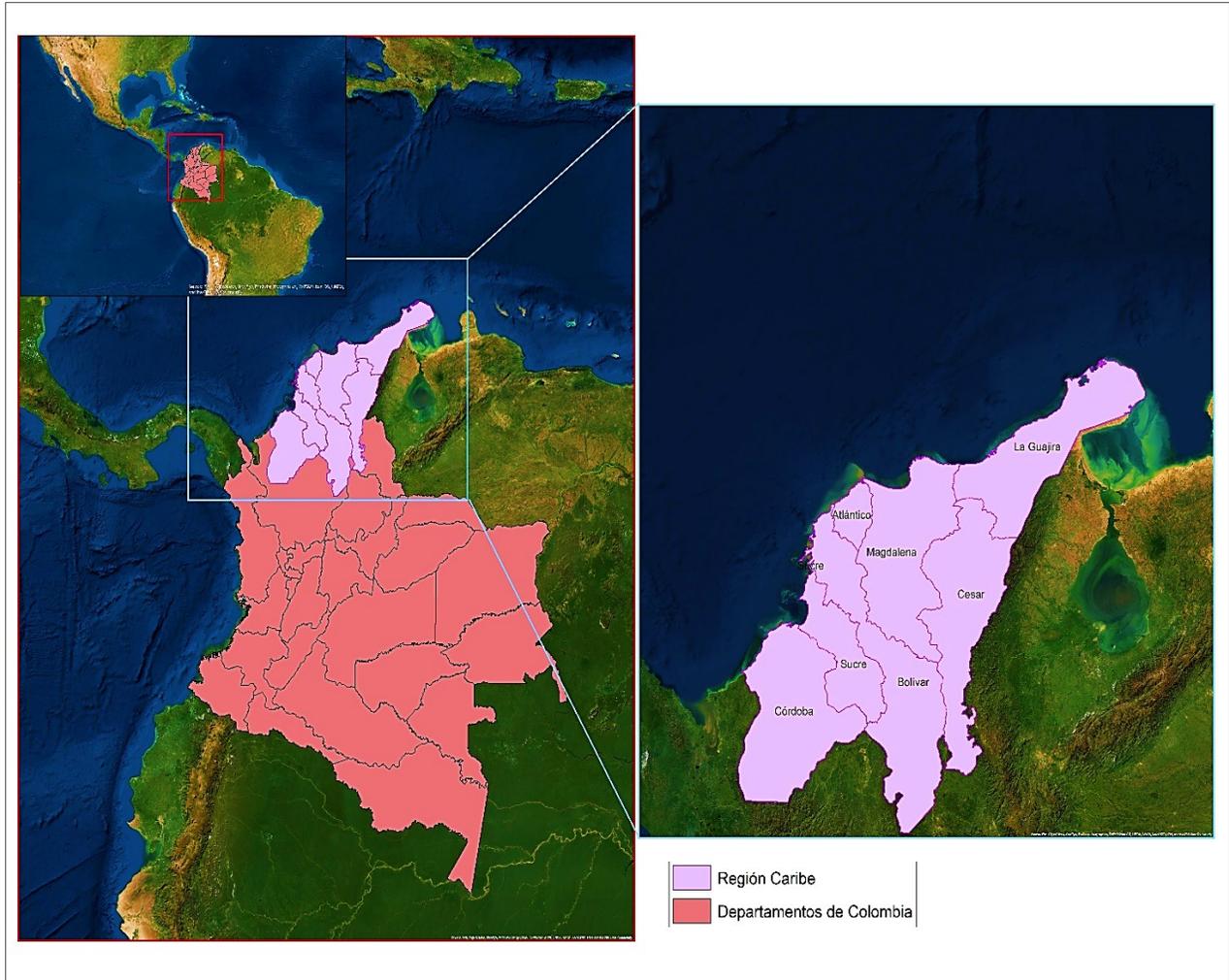


Figura 19. Ubicación geográfica de la zona Caribe colombiana. Fuente Propia

5.2 Implicaciones de la zona de estudio.

En la hidrodinámica del Caribe los vientos desempeñan un papel importante, ya que es el principal forzador de las corrientes superficiales y del oleaje. Al tener una influencia tan alta en la zona Caribe se han desarrollado una gran cantidad de fenómenos meteorológicos.

Debido a la influencia de los vientos en esta zona se ha decidido analizar los frentes fríos que se presentaron en el mar Caribe desde el año 1999 al 2009, ya que fueron los años en donde ocurrieron un número alto de fenómenos meteorológicos.

De acuerdo los estudios e investigaciones realizados por las diferentes entidades, se evidencia la presencia de fenómenos como los huracanes en los meses de agosto a octubre, siendo septiembre el mes de mayor concurrencia, por otra parte, los ciclones tropicales y depreciaciones tropicales, que se presentan en las diferentes épocas del año (Márquez Pérez, 2018).

A causa de estos fenómenos se pueden observar los eventos que se presentan con mayor recurrencia en la zona de Caribe colombiano son: las tormentas eléctricas, lluvias intensas, mini tornados, incrementos de fuertes vientos con mayor intensidad, vendavales, incremento de marea alta e inundaciones.

Las zonas más afectadas por estos fenómenos son: el Archipiélago de San Andrés y Providencia, la península de La Guajira, Bolívar, Atlántico y Magdalena, estos pueden presentar afectaciones considerables tales como, daños en la vivienda e infraestructura pública, privada y comunitaria, los daños más recurrentes son daños en techos y ventanales, afectaciones en las vías y deslizamientos (Márquez Pérez, 2018).



Figura 20. Afectaciones por los vendavales en la ciudad de Barranquilla. Fuente: El Heraldo

En la Tabla 3 se presenta una estadística de los diferentes frentes fríos producidos en la zona Caribe en los años descritos anteriormente. Además, se realiza un análisis histórico sobre las condiciones y parámetros meteorológicos de cada uno de los años teniendo en cuenta el mes en que ocurrieron los diferentes eventos.

Mes	No. Eventos	Tipo de Evento	Posición	Consecuencias y lugares que afecto	Fecha
Dic/1999	02	F. frío	Nor-oeste, Vargas en Venezuela la formación de una vaguada estacionaria.	La causa de estas elevadas precipitaciones fue la presencia muy persistente de una vaguada sobre el Caribe, durante casi 20 días de diciembre.	4 y 5 de diciembre.
Jun/2001	03	Tormenta Tropical	Noroeste, Golfo de México Tormenta Tropical "Allison"	Formación de tormenta tropical rápida partiendo de una perturbación tropical, aproximándose a 390 km al noroeste de Matamoros, Tamps.	05 al 06 de junio.
Mar/2004	05	F. frío	Frente frio en la costa caribe, direccionada desde el sur.	Presencia del extremo sur de un frente frío, el cual ocasionó sobre el centro y sur del mar caribe y litoral caribe colombiano, aumentos moderados en la altura del oleaje con presencia del fenómeno de marejada.	2 al 6 de marzo.
Ene/2005	02	F. frío	Suroeste de la Isla de Cuba.	Mar de leva en los Archipiélago de San Andrés de Providencia.	8 y 9 de enero.

Entre la Península de Yucatán y la Isla de Cuba. Incremento en la nubosidad, precipitaciones e intensidad de los vientos alisios y altura de la ola sobre el Mar Caribe y litoral Caribe.

Ene/2006	02	F. frío	Entre la península de Yucatán y oeste de la isla de Cuba.	Incremento en la nubosidad, intensidad y precipitación de los vientos alisios y altura de la ola sobre el Mar Caribe y litoral Caribe.	29 y 30 de enero.
Ene/2007	01	F. frío	Entre la península de Yucatán y oeste de la isla de Cuba.	Incremento en la nubosidad, precipitaciones e intensidad de los vientos alisios y altura de la ola sobre el Mar Caribe y litoral Caribe.	3 de enero.
Mar/2009	04	F. frío	San Andrés y Providencia, litoral Caribe colombiano, y noreste del Mar Caribe.	Generó aumentos en la altura del oleaje y en la velocidad de los vientos, principalmente en San Andrés y Providencia durante la primera semana del mes, asimismo del 05 al 10 de marzo se extendió este fenómeno al litoral Caribe colombiano.	7,8,9,10 de marzo.

				La altura del oleaje osciló entre 2.0 a 4.5 metros, máximo 5.8 metros, de igual manera los vientos oscilaron entre 15 a 25 nudos, máximo 30 nudos.	
Mar/2009	04	Sistema de alta presión de las Azores	Noreste del mar Caribe 20°N	Generó aumentos en la velocidad de los vientos sobre todo el Mar Caribe con velocidades entre 10 a 25 nudos, ráfagas de 30 nudos. Asimismo, hubo incrementos en la altura del oleaje con valores entre 1.5 a 3.5 metros, máximo 4.0 metros.	7,8,9,10 de marzo.

Tabla 3. Estadísticas de los frentes fríos del mar Caribe colombiano desde el año 1999 al 2009. Fuente Propia

5.3 Condiciones meteorológicas del mes de diciembre en el año 1999.

5.3.1 Fenómenos meteorológicos sobre el mar Caribe durante el mes de diciembre en el año 1999.

En el año 1999 en el mes de diciembre se presentaron dos eventos considerables los cuales ocasionaron altas precipitaciones sobre la costa del Caribe Colombiano, uno de los dos eventos se presentó Nor-oeste a causa del acercamiento de un frente frío (Ltda & Volumen, 2005).

El segundo evento presentado fue la formación de una vaguada estacionaria afectando gravemente al estado de Vargas en Venezuela además también se vieron afectados algunos sectores de Cúcuta.

Estos dos eventos de altas precipitaciones conllevan a una presencia muy insistente de una vaguada sobre la costa del Caribe Colombiano, teniendo una duración de 20 días del respectivo mes (Ltda & Volumen, 2005).

5.4 Condiciones meteorológicas del mes de junio en el año 2001.

5.4.1 Fenómenos meteorológicos sobre el mar Caribe durante el mes de junio en el año 2001.

A partir de los datos obtenidos se identifica que en el año 2001 se presentó un ciclón tropical a principios del mes de junio, específicamente en los días 5 y 6 de junio.

Este ciclón se empieza a evidenciar sobre el medio día y viene en sentido Noroeste del Golfo de México, fue llamado tormenta tropical Allison, este se formó rápidamente a causa de una perturbación tropical aproximadamente a 390 km al Noreste de Matamoros, Tamps (Matamoros et al., 2001).

La velocidad de vientos máximos sostenidos de 90km/h rachas de 110 km/h y presión mínima de 1004 hPa, durante el transcurso de la noche después de haber presentado un desplazamiento predominante hacia el Norte, se sostenía semiestacionaria a unos 385 km al Noreste de Matamoros Tamps (Matamoros et al., 2001), con la velocidad de vientos de 95 km/h y rachas de 110 km/h.

La tormenta Allison entro a tierra el día 6 de junio en las primeras horas del día y se localizó en las cercanías de Houston, Texas a unos 505 km al Nornoreste de Matamoros, Tamps., con vientos máximos de 75 km/h, rachas de 95 km/h y desplazamiento hacia el Norte a 10 km/h (Matamoros et al., 2001).

Recorrido total	230 km
Tiempo de duración	14 horas
Velocidad máxima del viento	95 km/h
Presión mínima	1002 hpa
Costas cercanas	Noreste de Matamoros, Tamps.
Afectación en la zona	Ninguna en México Directa en Texas y Lousiana.

Tabla 4. Características de la tormenta tropical Allison en el 2001. Fuente (Matamoros et al., 2001)

5.5 Condiciones meteorológicas del mes de marzo en el año 2004.

5.5.1 Fenómenos meteorológicos sobre el mar Caribe durante el mes de marzo en el año 2004.

En los primeros días del mes de marzo del año 2004 se presentó un frente frio direccionado desde el sur, el cual debido a su magnitud ocasiono sobre el sur y el centro del mar caribe y el litoral colombiano aumentos moderados de la altura del oleaje, con presencia del fenómeno de marejada (CIOH, 2004).

A causa de estos eventos se vio afectada la navegación costera y el flujo de bañistas sobre mas costas, cabe destacar que el flujo de vientos alisios del noreste se intensifico moderadamente, alcanzando valores promedio entre 15 y 20 nudos.

A mediados de la segunda quincena del mes de marzo se presentó una influencia ejercida por dos centros de presión, el primero de ellos se presentó sobre el atlántico central, el cual obtuvo valores máximos de 1040 mb.

El segundo centro de presión se presentó con mayor intensidad sobre el sureste del Golfo de México, Archipiélago de San Andrés y Providencia y el litoral Caribe, ocasionando el flujo constante de vientos alisios provenientes del noreste y el incremento en la altura del oleaje, de acuerdo al modelo NEDWAM (Netherland Wave Model) los valores máximos de ola son 2.0 a 3.5 metros de altura.

Además de este sistema de alta presión tuvo una interacción con un frente frio que transito sobre las islas Bahamas, este conlleva a un efecto indirecto en el mar caribe, este sirvió como una barrera térmica, obteniendo un desvío de los vientos alisios hacia Ecuador.

A causa de lo presentado se obtuvo el cierre de las líneas isobáricas creando una corriente de vientos muy fuertes, parte de los frentes fríos que trascienden sobre la época del año transitan desde los polos y hacia las zonas ecuatoriales. no se presentaron como fenómenos que alteraron en gran parte las condiciones atmosféricas, debido a que su tránsito normal se vio frenado por los sistemas de alta presión, permitiendo que ocluyeran a su paso sobre las Antillas mayores (CIOH, 2004).

Durante este mes también se presentó un continuo desplazamiento de sistemas nubosos que se dirigían sobre el interior del país, a consecuencia de una acción indirecta ejercida por la Zona de Convergencia Intertropical, esta genero el desplazamiento de nubosidad media baja de tipo alto

cúmulos, sobre el centro y sur del litoral Caribe colombiano, sobre todo en horas de la noche y la madrugada.

Además, observaron la reactivación del sistema de baja presión sobre el área del tapón de Darién, no hubo presencia de aumentos de nubosidad y generando flujos de viento en el sector del sureste y suroeste, teniendo en cuenta el presagio de la finalización de la época seca sobre el mar caribe colombiano (CIOH, 2004).

5.5.2 Análisis de los parámetros meteorológicos de Cartagena (marzo) del año 2004.

5.5.2.1 Régimen de vientos en superficie (marzo) del año 2004.

A partir de los datos horarios obtenidos con el anemógrafo realizan graficas sobre la rosa de los vientos con el programa WRPOLT, permitiendo analizar mensualmente el comportamiento del viento. En la Figura 21 se puede observar la rosa de viento para el mes de enero del año 2004.

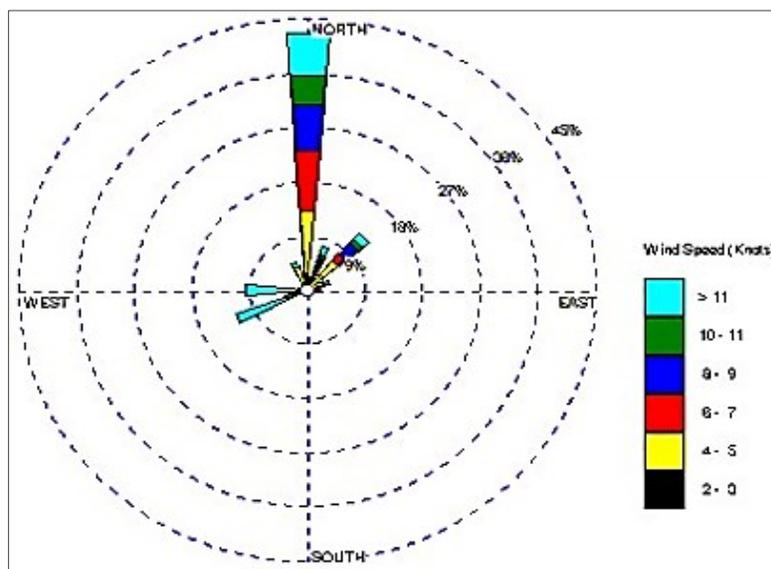


Figura 21. Rosa de viento en superficie en la ciudad de Cartagena en marzo de 2004. Fuente:(CIOH, 2004)

El régimen del viento que se presenta en la Tabla 5 describe la dirección y velocidad del viento que se presentó en el mes de enero.

Dirección del viento	Velocidad del viento
Sistema de Alta Presión del Atlántico Norte y un pequeño sistema de alta presión que se ubicó sobre el golfo de México.	Velocidades en los vientos entre 15 a 20 nudos y ráfagas de 28 nudos de componente norte noreste.
Flujo sinóptico de los vientos alisios del noreste, puesto que un 42% del viento provino del norte.	Valores mayores de 11 nudos, mientras que un 12% del viento provino del noreste y un 10% del norte noreste con valores mayores de 11 nudos respectivamente.

Tabla 5. Régimen de vientos en superficie (marzo) del año 2004. Fuente Propia

5.6 Condiciones meteorológicas del mes de enero en el año 2005.

5.6.1 Fenómenos meteorológicos sobre el mar Caribe durante el mes de enero en el año 2005.

En el mar Caribe durante la transición del mes de enero las condiciones océano – atmosféricas se presentaron de manera estable, por lo tanto, se pudieron ejecutar las diferentes actividades marítimas, teniendo en cuenta que durante este tiempo ocurrió el ingreso de dos frentes fríos al mar Caribe (CIOH, 2005).

El primer evento produjo un mar de leva en el litoral Caribe colombiano y en el archipiélago de San Andrés y Providencia.

El segundo produjo un incremento en la velocidad de los vientos y en la altura de la ola, principalmente sobre el litoral Caribe norte (entre la Guajira y Santa Marta), como consecuencia del cierre de los campos isobáricos.

El sistema de Alta Presión del Atlántico central influyo en las condiciones océano – atmosféricas, ocasionando un incremento en la altura de ola, intensidad en vientos alisios y una disminución de la nubosidad sobre el Caribe.

En los días 6 al 9 del mismo mes se produjo un incremento en la altura de ola de 4.0 metros en el mar Caribe centro, a causa del aumento del sistema de alta presión de Azores (1032 mb) desencadenando un fetch desde el océano Atlántico hasta el litoral Caribe centro (CIOH, 2005).

5.6.2 Análisis de los parámetros meteorológicos de Cartagena (enero) del año 2005.

5.6.2.1 Régimen de vientos en superficie (enero) del año 2005.

A partir de los datos horarios obtenidos con el anemógrafo realizan graficas sobre la rosa de los vientos con el programa WRPOLT, permitiendo analizar mensualmente el comportamiento del viento. En la

Figura 22 se puede observar la rosa de viento para el mes de enero del año 2005.

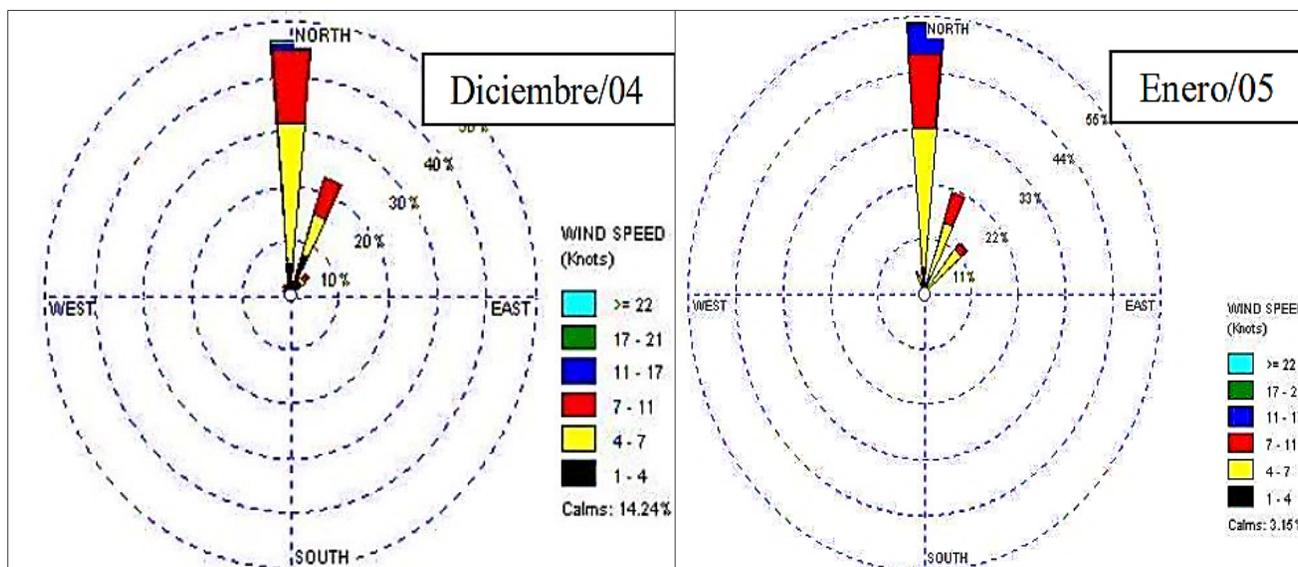


Figura 22. Rosa de viento en superficie en la ciudad de Cartagena de diciembre 2004 a enero 2005. Fuente: (CIOH, 2005)

El régimen del viento que se presenta en la Tabla 6 describe la dirección y velocidad del viento que se presentó en el mes de enero.

Dirección del viento	Velocidad del viento
El viento en superficie tuvo una tendencia norte en un 53.9%.	Las velocidades mayores entre 11 y 21 nudos con 6.3% y velocidades predominantes entre 7 y 11 nudos con un porcentaje 23.6%.
En dirección norte – noreste en 21.1%, en dirección noreste en un 13% y en calma en un 3.15%.	Las velocidades mínimas entre 1 y 4 nudos con un 14.51%.

Tabla 6. Régimen de vientos en superficie (enero) del año 2005. Fuente Propia

Nombre del Ciclón tropical	Nivel en que afecto al Mar Caribe	Vientos máximos sobre el mar Caribe	Zonas del Mar Caribe que afectó	Afectación en las costas colombianas	Costas afectadas sobre el Mar Caribe	Días en el Mar Caribe
Tormenta tropical. Arlene	Tormenta tropical.	40 nudos con ráfagas de 60	Noroeste del área.	No.	Oeste de Cuba Península de Yucatán.	Del 8 al 9 de junio.
Tormenta tropical. Cindy	Depresión tropical.	35 nudos máximo 50	Noroeste del área.	No.	Península de Yucatán.	04 de julio
Huracán catg.4 Dennis	Huracán catg cuatro.	135 nudos	Este, centro y Noroeste del Mar Caribe.	En forma indirecta con lluvias e incremento en la nubosidad.	Haití, Republica Dominicana y Cuba.	Del 5 al 9 de julio.
Huracán catg 4 Emily	Huracán catg cuatro.	135 nudos	Este, centro y Noroeste del Mar Caribe.	En forma indirecta con lluvias e incremento de la	Península de Yucatán, Cozumel, Grand Cayman, Jamaica, Donaire, Curazao,	Del 14 al 17 de julio.

nubosidad sobre la costas de Venezuela, Antillas
península de la Guajira. Menores.

Huracán catg 4 Wilman	Huracán catg cuatro.	150 nudos	Noroeste del Mar Caribe.	En la isla Serranilla con vientos menores de 35 nudos.	Sur y Oeste de Cuba, Península de Yucatán, Gran Cayman, Jamaica.	Del 16 al 19 de octubre.
Tormenta tropical Alpha	Tormenta tropical.	45 nudos máximo 55	Norte del Mar Caribe.	No.	Noroeste de Haití e isla La Española.	22 y 23 de octubre.
Huracán categoría tres Beta	Huracán catg tres.	115 nudos	Oeste del Mar Caribe.	En forma directa con vientos de tormenta sobre Providencia y Santa Catalina y en San Andrés.	Nicaragua y Honduras.	Del 27 al 30 de octubre.
Tormenta tropical Gamma	Tormenta tropical.	35 nudos	Centro del Mar Caribe y Noroeste del área.	No.	Antillas Menores, Península de Yucatán, Sur de Jamaica.	Del 13 al 20 de noviembre.

Tabla 7. Sistemas ciclónicos que afectaron al mar Caribe en el año 2005. Fuente: (CIOH, 2005)

5.7 Condiciones meteorológicas del mes de enero en el año 2006.

5.7.1 Fenómenos meteorológicos sobre el mar Caribe durante el mes de enero en el año 2006.

En el mar Caribe y el litoral Caribe colombiano durante la transición del mes de enero las condiciones océano – atmosféricas se presentaron de manera estable, debido al desplazamiento de la zona de convergencia intertropical hacia el centro y sur del país (CIOH, 2006). Debido a la influencia de los sistemas de alta presión en el Atlántico Norte, se produjo un aumento en la intensidad de vientos alisios sobre el mar Caribe que generan la época seca en la zona Caribe.

En los días 29 y 30 del mismo mes el mar Caribe se vio influenciado por los sistemas de altas presiones al norte y noroeste de las Antillas Mayores, ocasionando una fuerte subsidencia en el área, lo cual produjo condiciones estables para el Caribe.

Debido a la influencia de la zona de convergencia intertropical y la baja presión del Darien, en donde se originaron sistemas nubosos hacia el litoral centro en horas de la madrugada, se produjeron precipitaciones extremas ocasionando tormentas eléctricas en el litoral Caribe Sur (Golfo de Urabá) (CIOH, 2006).

5.7.2 Análisis de los parámetros meteorológicos de Cartagena (enero) del año 2006.

5.7.2.1 Régimen de vientos en superficie (enero) del año 2006.

A partir de los datos horarios obtenidos con el anemógrafo realizan graficas sobre la rosa de los vientos con el programa WRPOLT, permitiendo analizar mensualmente el comportamiento del viento. En la

Figura 23 se puede observar la rosa de viento para el mes de enero del año 2006.

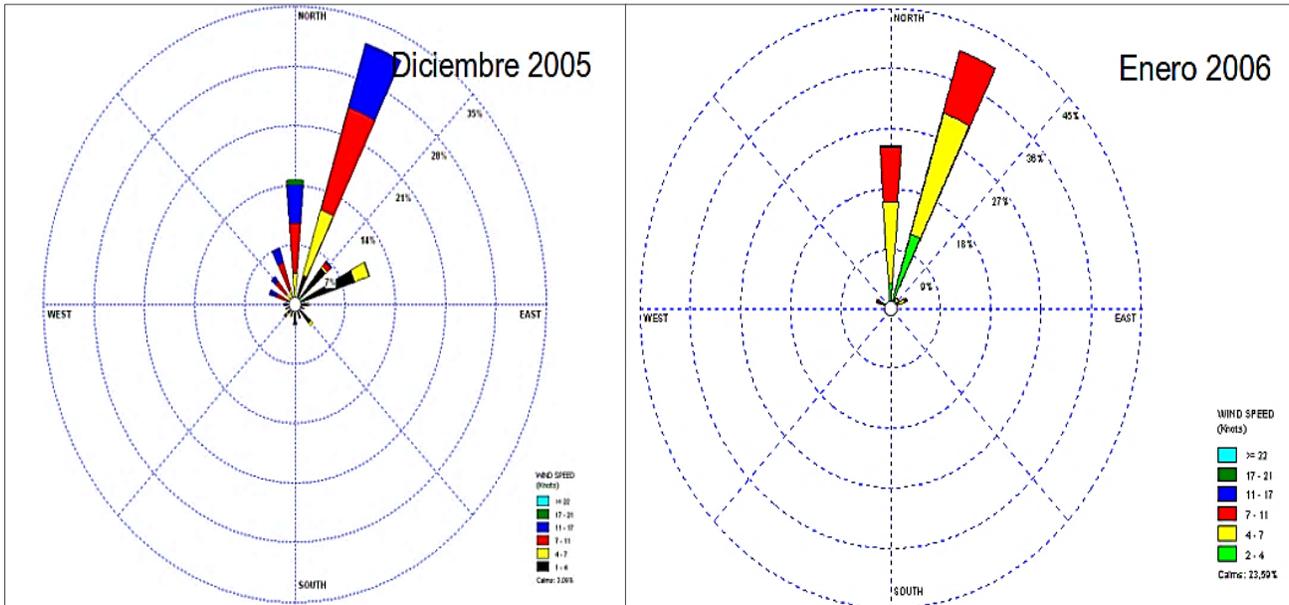


Figura 23. Rosa de viento en superficie en la ciudad de Cartagena de diciembre 2005 a enero 2006. Fuente: (CIOH, 2006)

El régimen del viento que se presenta en la Tabla 8 describe la dirección y velocidad del viento que se presentó en el mes de enero.

Dirección del viento	Velocidad del viento
En dirección Norte se presentó en un 21.8 %.	Las velocidades máximas se mantuvieron en dirección norte y nor-noreste entre 11 y 17 nudos con un predominio del 0,3%.

En dirección Noreste se presentó en un 35.3%. Las velocidades mínimas mantuvieron entre 4 – 7 nudos con un 38 % y del 2 al 4 en un 11.5%.

El viento en calma marcó un porcentaje 23.2 %.

Tabla 8. Régimen de vientos en superficie (enero) del año 2006. Fuente Propia

Nombre del Ciclón		Fecha	Vientos	Muertos	Categoría	Presión mínima	Afectó la zona	
tropical	máximos		(mb)			Caribe		
Tormenta	tropical	Del 10 al 14 de junio.	70 nudos	*	-	995 mb	Si	
Alberto								
Tormenta	tropical	Del 18 al 21 de julio.	60 nudos	0	-	1001 mb	No	
Beryl								
Tormenta	tropical	Del 1 al 5 de agosto.	65 nudos	0	-	-	No	
Chris								
Tormenta	tropical	Del 21 al 27 de agosto.	50 nudos	0	-	1000 mb	No	
Debby								
Huracán	catg	1	Del 24 de agosto al 02 de	75 nudos	2	1	850 mb	Si
Ernesto		septiembre.						
Huracán	catg	1	Del 03 al 12 de septiembre.	90 nudos	0	1	972 mb	No
Florence								
Huracán	catg	3	Del 10 al 20 de septiembre	120 nudos	0	3	955 mb	No
Gordon								

Huracán	catg 3	Del 12 al 24 de septiembre.	125 nudos	0	3	954 mb	No
Helene							
Huracán catg 1	Isaac	Del 27 de septiembre al 02 de octubre.	85 nudos	0	1	985 mb	No

Tabla 9. sistemas ciclónicos de la temporada ciclónica del año 2006. Fuente: (CIOH, 2006)

Nombre del Ciclón tropical	Nivel en que afecto al Mar Caribe	Vientos máximos sobre el mar Caribe	Zonas del Mar Caribe que afectó	Costas afectadas sobre el Mar Caribe	Afectación en las costas colombianas	Días en el Mar Caribe
Tormenta tropical Alberto	Depresión Tropical.	35 nudos	Noroeste.	Península de Yucatán y Cuba.	No.	10 de junio.
Huracán Ernesto	Huracán.	75 nudos	Este y centro del Mar Caribe.	La Española Cuba.	El caribe centro y norte (La Guajira) con cobertura nubosa y lluvias moderadas.	Del 24 al 29 de agosto.

Tabla 10. Sistemas ciclónicos que afectaron al Mar Caribe. Fuente: (CIOH, 2006)

5.8 Condiciones meteorológicas del mes de enero en el año 2007.

5.8.1 Fenómenos meteorológicos sobre el mar Caribe durante el mes de enero en el año 2007.

Enero, mes que se encuentra, en la categoría de época seca del Mar Caribe para dicho año, evidencia, una gran cantidad de vientos, disminuyendo la temperatura, esto, entre las latitudes 15°N a 11°N, es decir, coordenada entre la península de Yucatán hasta el centro del Mar Caribe, por donde avanzan los frentes fríos, para esta época del año (Ospina Vallejo et al., 2007).

Durante la última semana de diciembre, la franja de bajas presiones, por donde confluyen los Vientos Alisios del sureste y del noreste, mejor llamada, la Zona de Convergencia Intertropical, genero un valor de 08°N lo cual incremento la nubosidad, sin embargo, para los meses entre enero y marzo este valor disminuyo hasta los 04°N.

Como se mencionó anteriormente, para el mes de enero, la gran cantidad de vientos, aumentaron debido a un sistema de alta presión en la Zona de Convergencia dirección norte del Caribe por lo cual los vientos alisios, se encontraron en gran medida en esta zona presentando intensidades con valores máximos de 35 nudos.

Como fenómeno significativo para esta época seca, sobre el litoral Caribe colombiano, cabe resaltar la permanencia semicontinua de la baja presión del Darién sobre el litoral Caribe sur, lo que generó un incremento en la nubosidad y algunas lluvias aisladas hacia el Golfo de Urabá (Ospina Vallejo et al., 2007).

5.8.2 Análisis de los parámetros meteorológicos de Cartagena (enero) del año 2007.

5.8.2.1 Régimen de vientos en superficie (enero) del año 2007.

A partir de los datos horarios obtenidos con el anemógrafo realizan graficas sobre la rosa de los vientos con el programa WRPOLT, permitiendo analizar mensualmente el comportamiento del viento. En la Figura 24 se puede observar la rosa de viento para el mes de enero del año 2007.

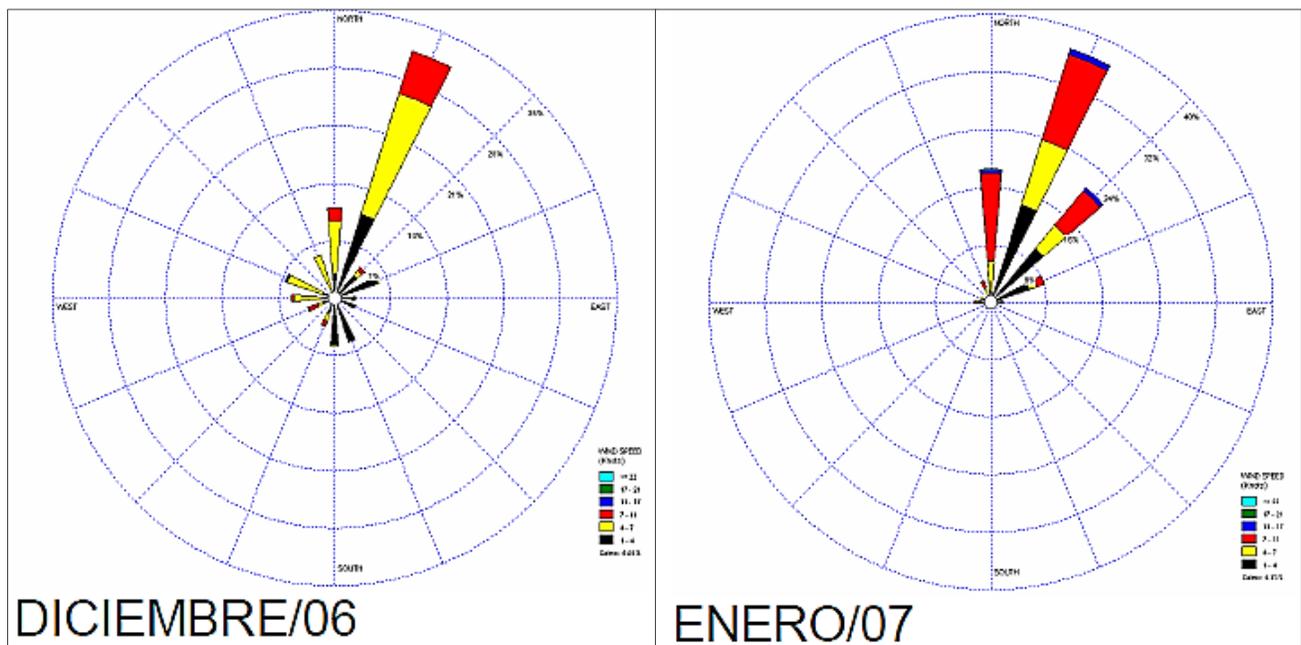


Figura 24. Rosa de viento en superficie en la ciudad de Cartagena de diciembre 2005 a enero 2006. Fuente: (Ospina Vallejo et al., 2007)

El régimen del viento que se presenta en la Tabla 11 describe la dirección y velocidad del viento que se presentó en el mes de enero.

Dirección del viento	Velocidad del viento
El viento en superficie predominó en dirección nor-noreste con un 38%.	La velocidad se encuentra de 1 a 11 nudos presentando máximas de 17 nudos.

También se encontraron vientos en dirección noreste en un 21% y norte en un 18.5%.

La velocidad del viento que más predominó en este mes se encuentra entre 1 y 4 nudos con una frecuencia del 38.7%, seguido en orden descendente vientos de 7 a 11 nudos en un 33.5%, de 4 a 7 nudos en un 21.1%, de 11 a 17 nudos en un 1.8% y en un 0.2% vientos de 22 o mayores.

Tabla 11. Régimen de vientos en superficie (enero) del año 2007. Fuente Propia

5.8.2.2 Condiciones oceánicas presentadas sobre el Mar Caribe Colombiano en el mes de enero del 2007.

En base al modelo SPOD que funciona como un sistema de pronóstico de los parámetros oceánicos, realizaron un estudio sobre la corriente y temperatura superficial del mar.

En la Tabla 12 se describen los parámetros oceánicos obtenidos por medio del modelo SPOD.

Temperatura superficial del mar (TSM)	Corrientes
La temperatura superficial del mar en el norte del litoral colombiano fue de 26.0 a 28.0°C.	La corriente superficial del mar para el litoral Caribe colombiano sobre el sur del litoral la corriente predominó con dirección hacia el este-noreste.
Para el centro y sur del litoral la TSM fue entre 28.5°C y 31.0°C.	para el centro de la región predominó hacia el noreste, con intensidades de 0.4 a 1.3 m/s.
Al fin de mes el centro y sur del litoral presentó valores de 28.5°C a 31.0°C.	Al noroeste del litoral colombiano, predominó con mayor intensidad.

Para el norte del litoral se registraron los Al sur del litoral (Golfo de Urabá), predominio con valores más bajos entre 26.0°C y 27.5°C, menor intensidad.

especialmente al norte de la Guajira.

Tabla 12. Comportamiento de la corriente y la temperatura superficial del mes de enero de 2007. Fuente Propia

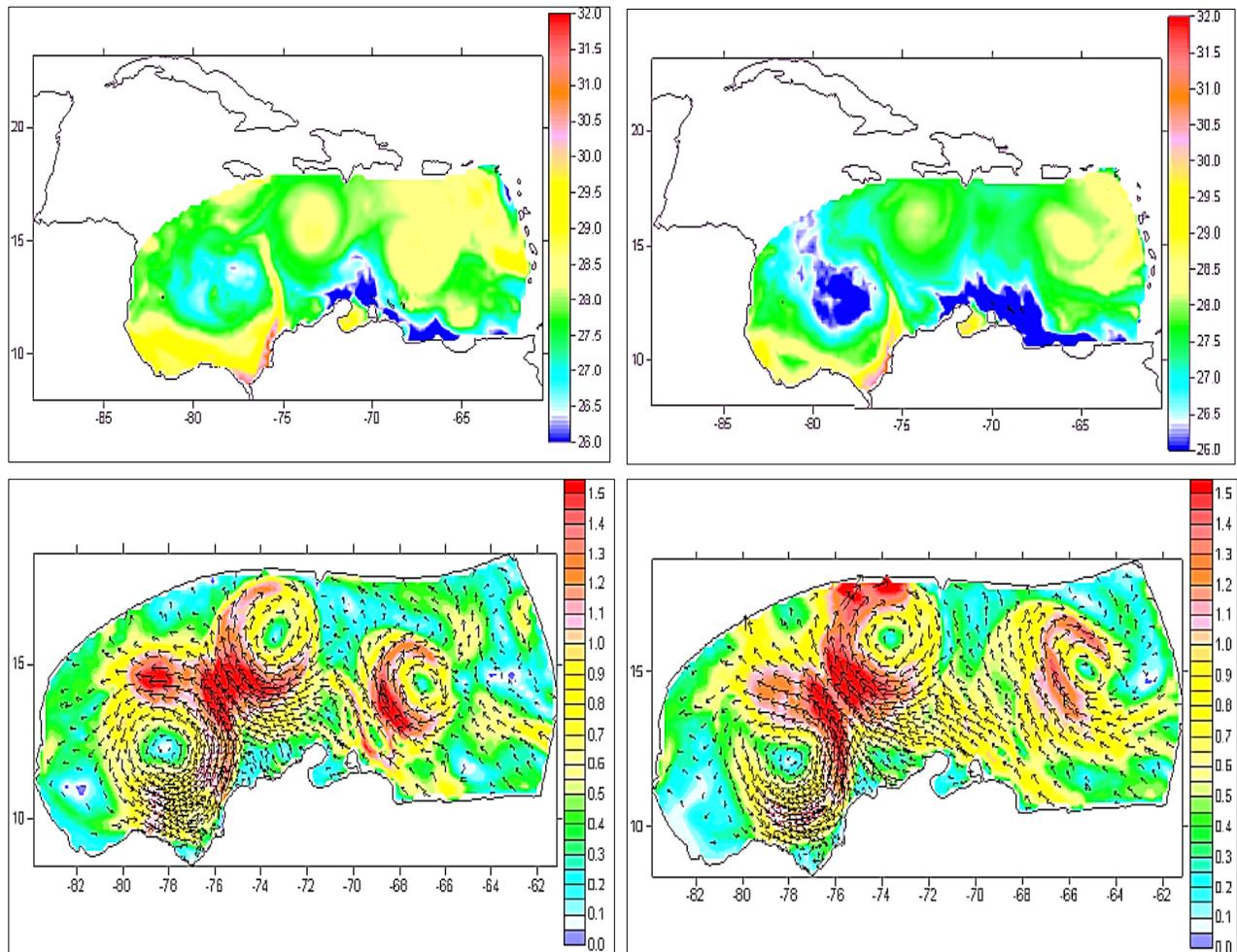


Figura 25. Panel superior el Comportamiento de la TSM y en el panel inferior la corriente del mes de enero de 2007. Fuente:(Ospina Vallejo et al., 2007)

Nombre del Ciclón tropical	Fecha	Vientos máximos	Categoría	Presión mínima (mb)	Afectó la zona Caribe
T ST Andrea	Del 06 al 14 de junio.	65 nudos	-	998 mb	No
Tormenta tropical Berry	Del 31 de junio al 06 de julio.	50 nudos	-	990 mb	No
Tormenta tropical Chantal	Del 31 de junio al 05 de agosto.	60 nudos	-	964 mb	No
Huracán catg 5 Dean	Del 17 al 21 de agosto.	160 nudos	5	914 mb	Si
Tormenta tropical Erin	Del 15 al 16 de agosto.	35 nudos	-	1005 mb	No
Huracán catg 5 Félix	Del 31 de agosto al 12 de septiembre.	160 nudos	5	935 mb	Si
Tormenta tropical Gabriel	Del 8 al 11 de septiembre.	50 nudos	-	1004 mb	No
Huracán catg 1 Humberto	Del 13 al 14 de septiembre.	75 nudos	1	990 mb	No

Tormenta tropical Ingrid	Del 12 de septiembre al 18 de octubre.	40 nudos	-	1002 mb	No
Depresión tropical Diez	21 de agosto.	25 nudos	-	1005 mb	No
Tormenta tropical Jerry	Del 23 al 25 de septiembre.	35 nudos	-	1003 mb	No
Tormenta tropical Karen	Del 25 al 29 de septiembre.	45 nudos	-	1001 mb	No
Huracán catg 1 Lorenzo	Del 25 al 29 de septiembre.	70 nudos	1	990 mb	No
Tormenta tropical Mellisa	Del 06 de agosto al 28 de septiembre.	35 nudos	-	1005 mb	No
Depresión tropical Quince	Del 11 al 18 de octubre.	45 nudos	-	996 mb	No
Huracán catg 1 Noel	Del 28 de octubre al 02 de noviembre.	70 nudos	1	980 mb	Si
Tormenta tropical Olga	Del 11 al 12 de diciembre.	52 nudos	-	1003 mb	No

Tabla 13. sistemas ciclónicos de la temporada ciclónica del año 2007. Fuente: (Ospina Vallejo et al., 2007)

Nombre del Ciclón tropical	Nivel en que afecto al Mar Caribe	Vientos máximos sobre el mar Caribe	Zonas del Mar Caribe que afectó	Costas del Caribe afectadas	Días en el Mar Caribe
Huracán catg 5 Dean	Huracán	135 nudos, ráfagas de 160.	Tránsito por todo el mar Caribe desde las Antillas Menores hasta la Península de Yucatán.	Afectó de forma indirecta al litoral Caribe norte y centro, y archipiélago de San Andrés y Providencia con fuertes lluvias tormentas eléctricas e incremento moderado en la velocidad del viento.	05
Huracán catg 5 Félix	Huracán	135 nudos, ráfagas de 160.	Tránsito por todo el mar Caribe desde las Antillas Menores hasta Honduras y Nicaragua.	Afectó de forma indirecta al litoral Caribe norte y centro, y archipiélago de San Andrés y Providencia con fuertes lluvias tormentas eléctricas e incremento moderado en la velocidad del viento. Y de manera directa a los cabos de Serrana y Serranilla.	05

Huracán catg 1 Noel	Huracán	50 nudos, ráfagas de 60.	Al norte del Mar Caribe, Isla la Española y Cuba.	Afectó de forma indirecta al litoral Caribe norte y centro, con moderadas lluvias y tormentas.	02
------------------------	---------	-----------------------------	---	--	----

Tabla 14. Sistemas ciclónicos que afectaron al Mar Caribe. Fuente: (Ospina Vallejo et al., 2007)

5.9 Condiciones meteorológicas del mes de marzo en el año 2009.

5.9.1 Fenómenos meteorológicos sobre el mar Caribe durante el mes de marzo en el año 2009.

Para este año, durante la época seca se presentan 15 frentes fríos, que incrementan la velocidad de los vientos, por lo cual también se incrementa la altura de los oleajes con valores entre 15 y 25 nudos, ráfagas de 30 nudos y entre 2.0 y 3.0 metros, máximo 4.0 metros, principalmente sobre el archipiélago de San Andrés y Providencia, y el litoral Caribe centro (Cabeza Durango et al., 2009).

Para la primera semana de enero, la Zona de Confluencia Intertropical presento un comportamiento atípico, puesto que, hubo una disminución latitudinal provocando un flujo de vientos alisios en el litoral colombiano, disminución en la en la nubosidad y la precipitación, mientras que, un incremento en la presión atmosférica.

El sistema de baja presión de Panamá afecto el litoral Caribe en el mes de diciembre, puesto que, este, favoreció las precipitaciones y el aumento de la nubosidad. Además de esto, el sistema de alta presión de las Azores se mantuvo por encima de los 30° (...) asimismo a partir del mes de enero se posicionó sobre los 20° y 25° norte contribuyendo al aumento en la velocidad del viento y en la altura del oleaje sobre el área (Cabeza Durango et al., 2009).

Con respecto al viento, este parámetro, incremento para el mes de enero con velocidades de 15 a 25 nudos, con algunas ráfagas de 35 nudo para mar abierto, su dirección se mantuvo de este a noroeste, cambiando un poco en el mes de diciembre hacia el suroeste; por otro lado, la nubosidad disminuyo.

5.9.2 Análisis de los parámetros meteorológicos de Cartagena (marzo) del año 2009.

5.9.2.1 Régimen de vientos en superficie (marzo) del año 2009.

Durante el mes de marzo no obtuvieron datos de viento.

5.9.2.2 Condiciones oceánicas presentadas sobre el Mar Caribe Colombiano en el mes de marzo del 2009.

En base al modelo SPOD que funciona como un sistema de pronóstico de los parámetros oceánicos, realizaron un estudio sobre la corriente y temperatura superficial del mar.

En la Tabla 15 se describen los parámetros oceánicos obtenidos por medio del modelo SPOD.

Temperatura superficial del mar (TSM)	Corrientes
La temperatura superficial del mar sobre el norte del litoral fue de 26.5°C y 27.5°C.	Al norte del litoral la corriente predominó hacia el este-noreste, con intensidades de 0.3 a 0.7 m/s.
En el centro y sur del litoral predominó entre 28.0°C y 29.0°C.	Sobre el centro del litoral predominó hacia el noreste, con intensidad entre 0.4 a 0.7 m/s.
Sobre el norte del litoral predominó los valores entre 27.5°C a 28.5°C.	Al sur de la región prevaleció la corriente Panamá-Colombia hacia el este-noreste, con intensidades de 0.2 a 0.5 m/s.
En el centro y sur del litoral se encuentran los valores más altos entre 28.5°C y 29.0°C.	Además, se presentaron algunas circulaciones ciclónicas y anticiclónicas, al centro y este del Mar Caribe.

Tabla 15. Comportamiento de la corriente y la temperatura superficial del mes de marzo de 2009. Fuente Propia

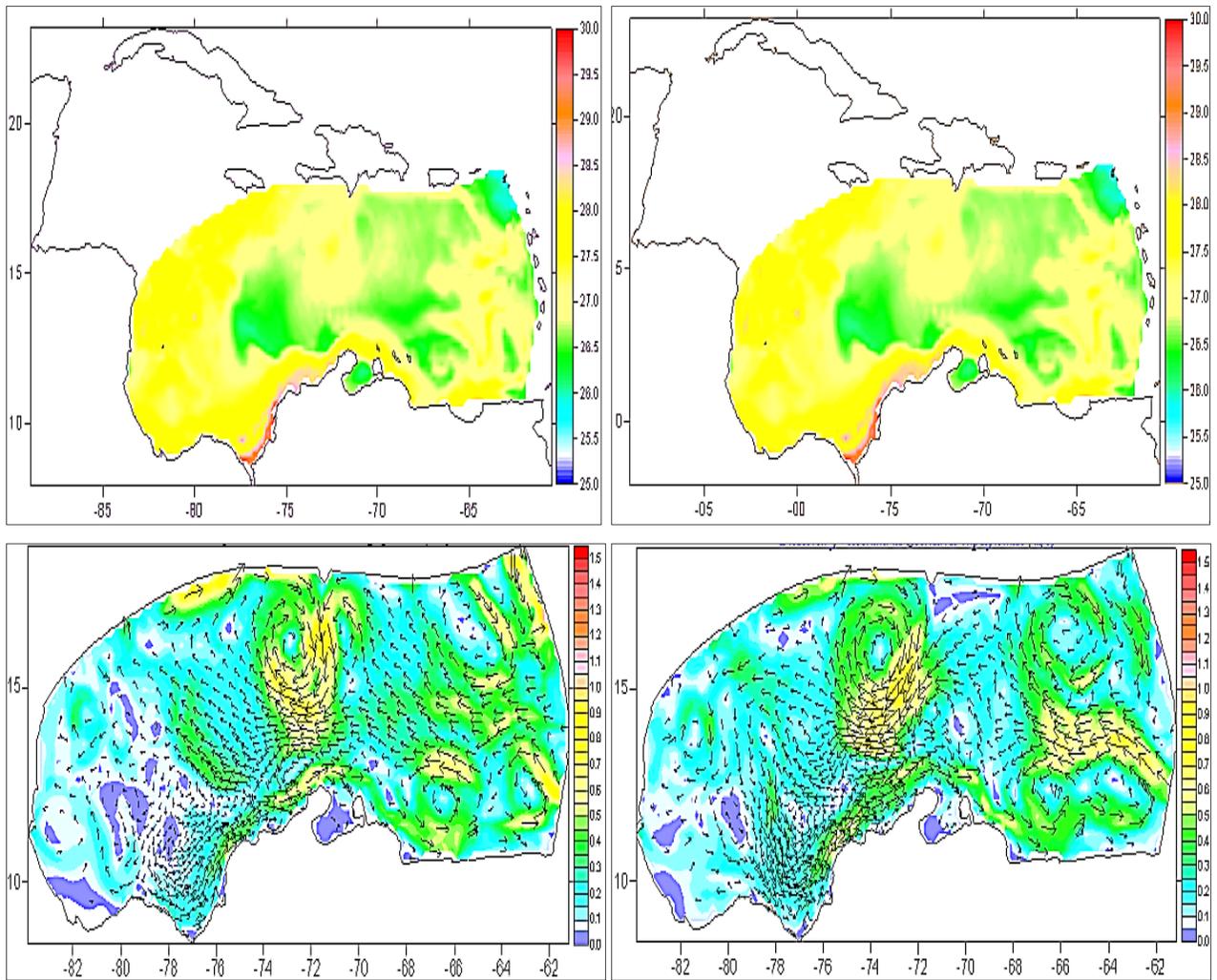


Figura 26. Panel superior el Comportamiento de la TSM y en el panel inferior la corriente del mes de marzo de 2009. Fuente: (Cabeza Durango et al., 2009)

Nombre del Ciclón tropical	Fecha	Vientos máximos	Categoría	Presión mínima (mb)	Afectó la zona Caribe
Depresión tropical Uno	Del 28 al 30 de mayo.	30 nudos	-	1006 mb	No
Tormenta tropical Ana	Del 11 al 17 de agosto.	35 nudos	-	1004 mb	Si
Huracán Bill	Del 15 al 24 de agosto.	120 nudos	H4	943 mb	No
Claudette	Del 16 al 17 de agosto.	45 nudos	-	1006 mb	No
Tormenta tropical Danny	Del 26 al 29 de agosto.	45 nudos	-	1006 mb	No
Tormenta tropical Erika	Del 1 al 4 de septiembre.	50 nudos	-	1004 mb	Si
Huracán Fred	Del 7 al 12 de septiembre.	105 nudos	H3	960 mb	No
Depresión tropical ocho	Del 25 al 26 de septiembre.	30 nudos	-	1008 mb	No
Tormenta tropical Grace	Del 5 al 6 de octubre.	60 nudos	-	986 mb	No
Tormenta tropical Henri	Del 6 al 8 de octubre.	45 nudos	-	1005 mb	No
Huracán Ida	Del 4 al 10 de noviembre.	90 nudos	H2	976 mb	Si

Tabla 16. sistemas ciclónicos de la temporada ciclónica del año 2009. Fuente: (Cabeza Durango et al., 2009)

Nombre del ciclón tropical	Vientos máximos sobre el mar Caribe	Zonas del Mar Caribe que afectó	Costa del litoral Caribe colombiano afectada	Días en el mar Caribe
Tormenta tropical Ana	35 nudos	Noreste del Mar Caribe, Dominica, Islas de Vírgenes Británicas, Islas de Vírgenes de E.U, sureste de Puerto Rico.	No afecto la costa del litoral Caribe colombiano.	02
Tormenta tropical Ana	50 nudos	Noreste del Mar Caribe, Guadeloupe islas St. Croix, Vírgenes Británicas, Vírgenes de E.U y Puerto Rico.	No afecto la costa del litoral Caribe colombiano.	03
Huracán catg 2 Ida	78 nudos	Oeste del Mar Caribe, Archipiélago de San Andrés y Providencia, Costa este de Nicaragua, Honduras y península Yucatán (México).	Afecto de manera indirecta el Archipiélago de San Andrés y Providencia, ocasionando precipitaciones moderadas.	05

Tabla 17. Sistemas ciclónicos que afectaron al Mar Caribe. Fuente: (Cabeza Durango et al., 2009)

6 Metodología

La metodología de este proyecto se basa en la modelación y análisis de los eventos ocurridos en el año 2004 de vientos extremos, ya que fue uno de los eventos reportado con más incidentes en la zona costera, debido a que genero una gran cantidad de fenómenos naturales como tormentas, ondas tropicales y fenómenos tropicales afectando a la zona Caribe colombiana como se observa en la Figura 27.

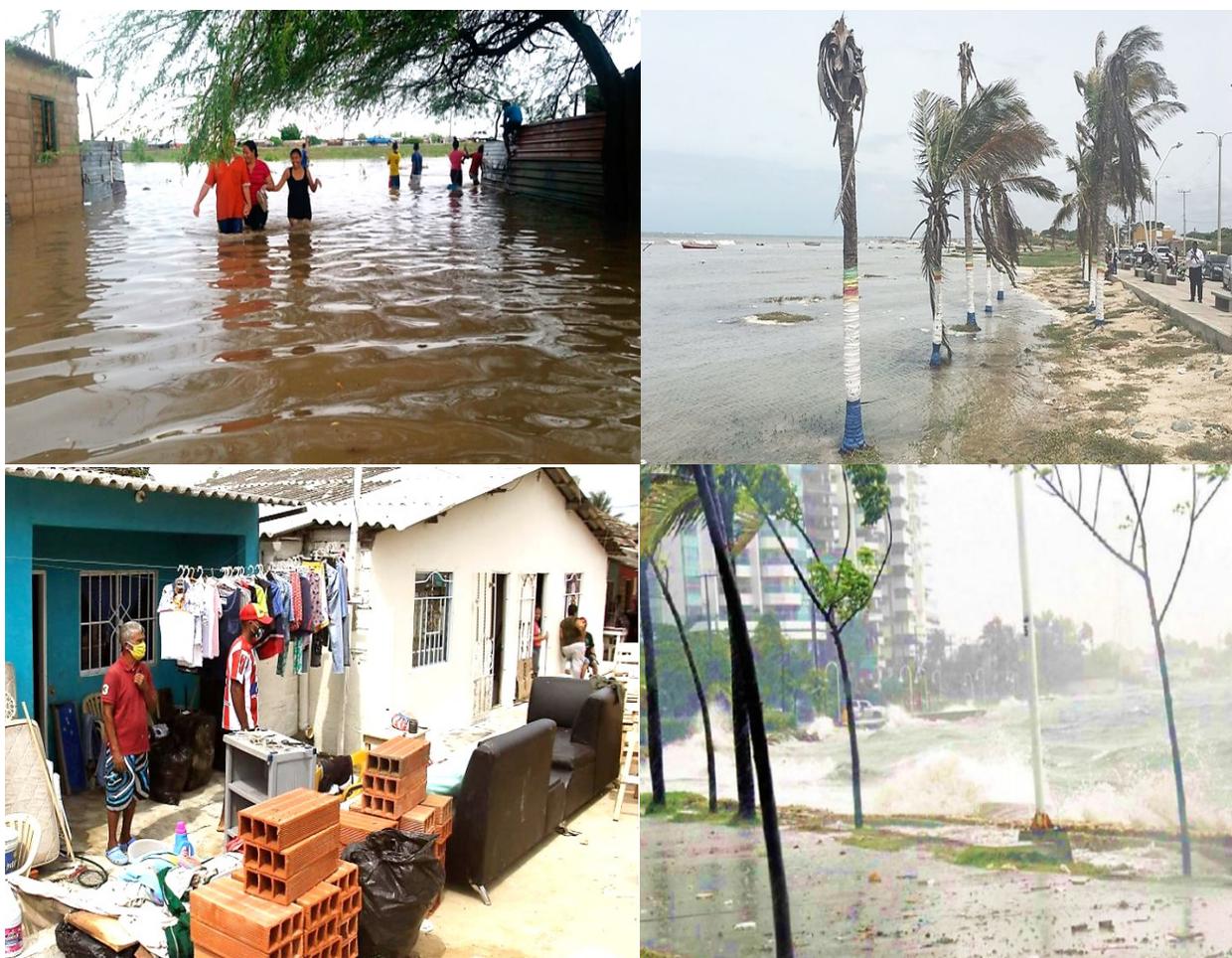


Figura 27. Afectaciones a causa de los eventos ocurridos en el 2004. Fuente: El Pílon
Figura superior izquierda. Inundación en la Guajira a causa de las fuertes lluvias. **Figura superior derecha.** Incidencia de fenómenos tropicales en el Caribe con vientos de intensidad variada. **Figura inferior izquierda.** Fenómenos como tormentas y ondas tropicales causan fuertes inundaciones en Barranquilla. **Figura inferior derecha.** Onda tropical produce fuertes lluvias en Cartagena causando algunas emergencias.

La metodología se compone de cuatro pasos.

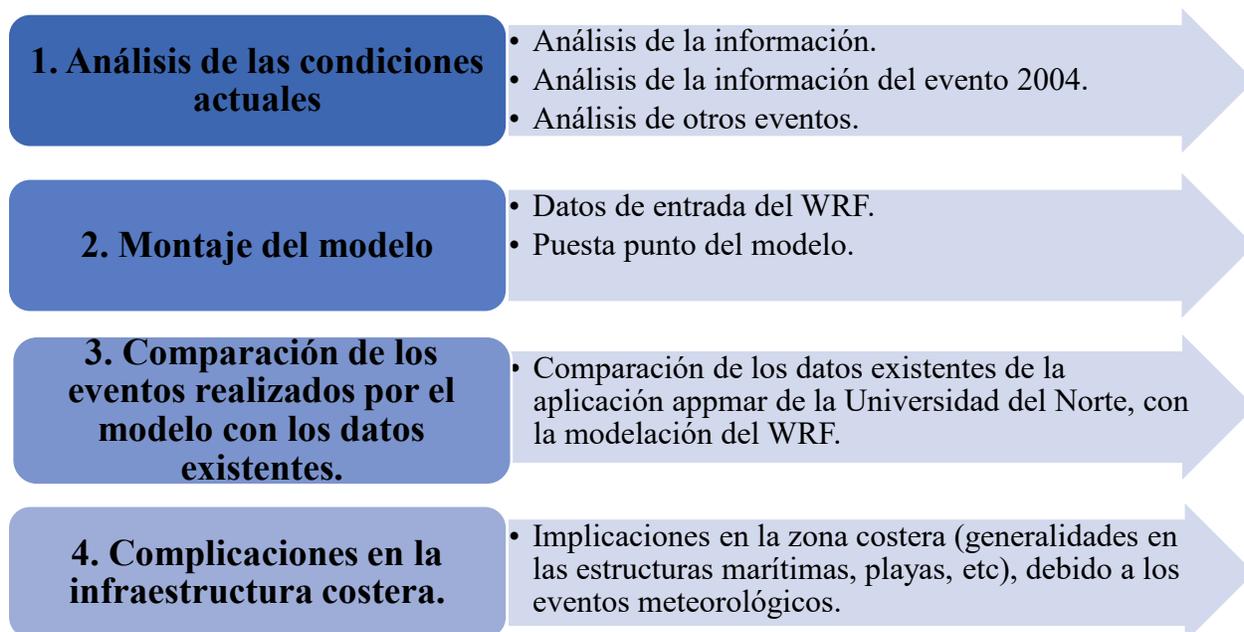


Figura 28. Metodología del proyecto. Fuente Propia

6.1 Análisis de las condiciones actuales.

6.1.1 Análisis de la información.

Los datos de los frentes fríos sucedidos en la zona del Caribe colombiano (1999-2009) fueron brindados por el Invermar, en el cual se pudo analizar que en el día 3 de marzo del año 2004 se produjo la mayor altura de ola significativa con un valor de 1,72m.

Año	Mes	Día	Hora	Hs (m)
2004	Marzo	03	0	1,55
2004	Marzo	03	3	1,57
2004	Marzo	03	6	1,63
2004	Marzo	03	9	1,68
2004	Marzo	03	12	1,72

2004	Marzo	03	15	1,70
2004	Marzo	03	18	1,67
2004	Marzo	03	21	1,63

Tabla 18. Datos del año 2004 sobre los frentes fríos. Los datos de color rojo representan la mayor altura de ola.
Fuente: Invemar

Los datos que se observan en la Tabla 18 los obtuvieron a partir del reanálisis de datos y algunos modelos.

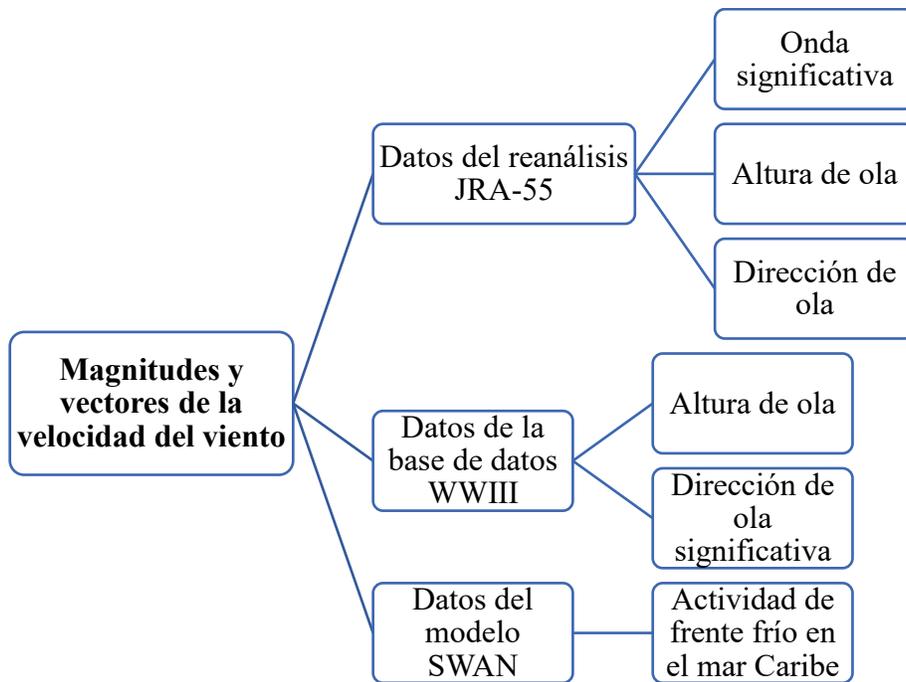


Figura 29. Datos sobre las magnitudes y vectores de la velocidad del viento brindados por la Invemar. Fuente Propia

A partir del modelo de oleaje Wave Watch IIITM, el Invemar pudo evaluar la velocidad del viento (m/s), teniendo como dominio la zona Caribe colombiana como se observa en la Figura 30.

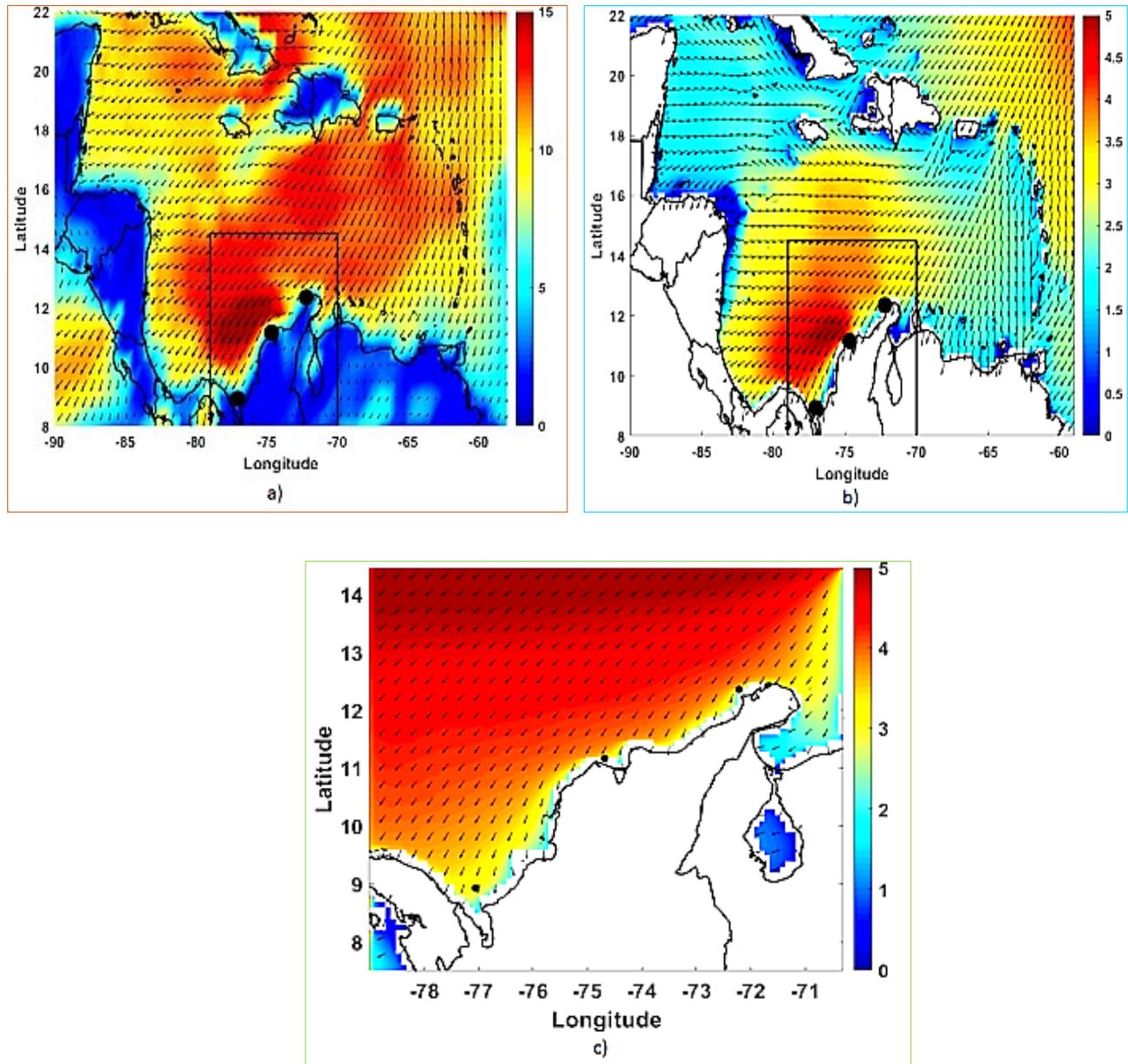


Figura 30. Velocidad del viento (m/s) desde 1999 al 2009. Los tonos indican el valor de la velocidad en m/s, en este caso la escala de color empieza desde 0 m/s (azul) hasta 5 m/s (rojo). En la figura (a), (b) y (c) se observa que el dominio es la zona Caribe colombiana. Fuente: Invemar

6.1.2 Análisis de la información del evento 2004.

En el mes de marzo del año 2004 se produjo el mayor evento de altura de ola significativa con un valor de 1,72 m, como se observa en la Tabla 18. Debido a que se presentó el valor de H_s más

alto en este año, se realizara un análisis más profundo sobre los vientos extremos producidos en la zona costera.

Para este año los vientos se vieron influenciados por el sistema de alta presión del Atlántico Norte, generando velocidades entre los 15 a 20 nudos y ráfagas de 28 nudos con una componente norte-noreste.

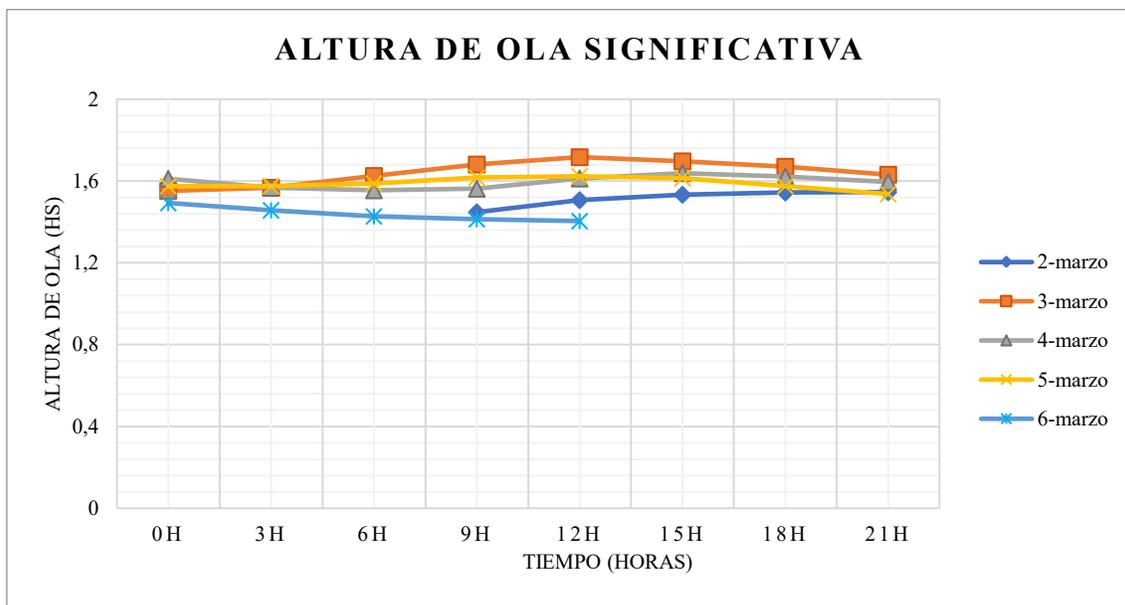
Los vientos más importantes fueron en Cartagena, estos datos fueron tomados por medio del lanzamiento de globos piloto, realizado por el CIOH, en donde describen el comportamiento del viento en altura por medio de la presión, como se muestra en la Tabla 19.

Presión (Mb)	Velocidad (m/s)	Descripción
925	2 - 4	El flujo de viento mantuvo una dirección noreste este en superficie, hasta los 400 de altura y luego en dirección sureste.
850	2 - 4	El flujo de viento mantuvo una dirección sureste sur hasta la atmosfera y luego desde la superficie la tendencia fue noreste sureste.
700	2 - 4	El flujo de viento conserva la dirección sureste.
500	2 - 8	El flujo de viento sigue conservando la dirección sureste, con un aumento de velocidad.
200	20	En los 12 km de columna de aire ubicándose en la troposfera alta, el flujo de viento mantiene la dirección sureste y noreste, incrementándose la velocidad de forma súbita.

Tabla 19. Vientos extremos del año 2004. (CIOH, 2004)

En resumen, la dirección predominante fue en el sector noreste sureste, coincidiendo con el flujo de los vientos alisios. Así mismo, la velocidad del viento se incrementó a medida que la columna de aire ascendía, logrando valores de 36 nudos.

Con base a los datos brindados por el Inveemar desde el año 1999 al 2009 se realizó una gráfica sobre la altura específica del año 2004, como se mencionaba anteriormente se escogió este año ya que fue donde se presentó la mayor cantidad de eventos. En la Gráfica 1 se puede observar el comportamiento de la altura de ola significativa en el año 2004, en el cual se puede inferir que en el mes de marzo fue donde se produjeron las mayores alturas, específicamente en el día 3 de marzo del 2004 a las 12 horas.



Gráfica 1. Altura de ola significativa de marzo del año 2004. Fuente Propia

De acuerdo a los datos que se encuentran en el atlas de viento del IDEAM, en la zona Caribe se encuentran 3 estaciones de gran importancia, las cuales han tomado datos desde el año 1981 al 2010. Ver la Tabla 20.

Código	Estación	Departamento	Municipio	Corriente	Latitud	Longitud	Período
14015010	Galerazamba	Bolívar	Santa Catalina	mar Caribe	10,79	-75,26	1981-2009
14015020	Apto. Rafael Núñez	Bolívar	Cartagena	mar Caribe	10,45	-75,52	1981-2010
15015050	Apto. Simón Bolívar	Magdalena	Santa Marta	mar Caribe	11,13	-74,23	1981-2010

Tabla 20. Estaciones meteorológicas ubicadas en el mar Caribe colombiano. Fuente: (IDEAM, 2015)

Para las tablas de frecuencias sobre la dirección y velocidad del viento se utilizaron los registrados tomados por las estaciones anteriormente mencionadas. Además, solo se tuvo en cuenta la corriente del mar Caribe.

De acuerdo a los datos arrojados por la estación de Galerazamba en la Tabla 21, se puede inferir que en la dirección Noroeste (NE) se presentó la mayor velocidad con un valor de 37 m/s con un total de 54 m/s, mientras que la velocidad más baja se presentó en la dirección suroeste (SW) que tuvo un valor total de 3 m/s.

Vel-Dir	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	VRB	Calma	Total
0.5-1.5	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	4
1.5-2.5	1	2	3	3	2	1	1	1	0	0	14
2.5-3.5	2	3	3	2	1	1	1	1	0	0	14
3.5-4.5	2	5	2	1	1	1	1	1	0	0	14
4.5-5.5	1	6	1	0	0	0	1	1	0	0	10
>=5.5	2	37	3	0	0	0	1	0	0	0	43
Calma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Total	8	54	13	7	5	3	5	4	0	1	100

Tabla 21. Dirección y velocidad del viento de la estación Galerazamba. Fuente: (IDEAM, 2015)

Como se puede ver en la Tabla 22, los datos arrojados por la estación de Apto. Rafael Núñez se puede inferir que el valor más alto de velocidad total se presentó en la dirección Norte (N) con un valor de 28 m/s, en cambio la velocidad más baja se presentó en dirección suroeste (SW) con un valor de 3 m/s.

Vel-Dir	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	VRB	Calma	Total
0.5-1.5	4	5	4	2	1	1	1	1	0	0	19
1.5-2.5	5	5	4	2	2	1	3	3	0	0	25
2.5-3.5	7	4	1	1	1	1	3	3	0	0	21
3.5-4.5	6	2	0	0	0	0	1	1	0	0	10
4.5-5.5	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4
>=5.5	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Calma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	17
Total	28	18	9	5	4	3	8	8	0	17	100

Tabla 22. Dirección y velocidad del viento de la estación Apto. Rafael Núñez. Fuente: (IDEAM, 2015)

Como se puede ver en la Tabla 23, la última estación registro que la velocidad más alta ocurrió en la dirección Norte (N) con un valor de 23 m/s, mientras que la velocidad más baja se presentó en dirección Este con un valor de 6 m/s.

Vel-Dir	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	VRB	Calma	Total
0.5-1.5	4	5	5	4	4	2	2	1	0	0	27
1.5-2.5	3	3	1	2	4	4	3	2	0	0	22
2.5-3.5	3	2	0	1	3	3	3	2	0	0	17
3.5-4.5	4	2	0	0	2	1	1	1	0	0	11
4.5-5.5	3	1	0	0	1	0	0	1	0	0	6
>=5.5	6	3	0	0	1	0	0	1	0	0	11
Calma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6
Total	23	16	6	7	15	10	9	8	0	6	100

Tabla 23. Dirección y velocidad del viento de la estación Apto. Simón Bolívar. Fuente: (IDEAM, 2015)

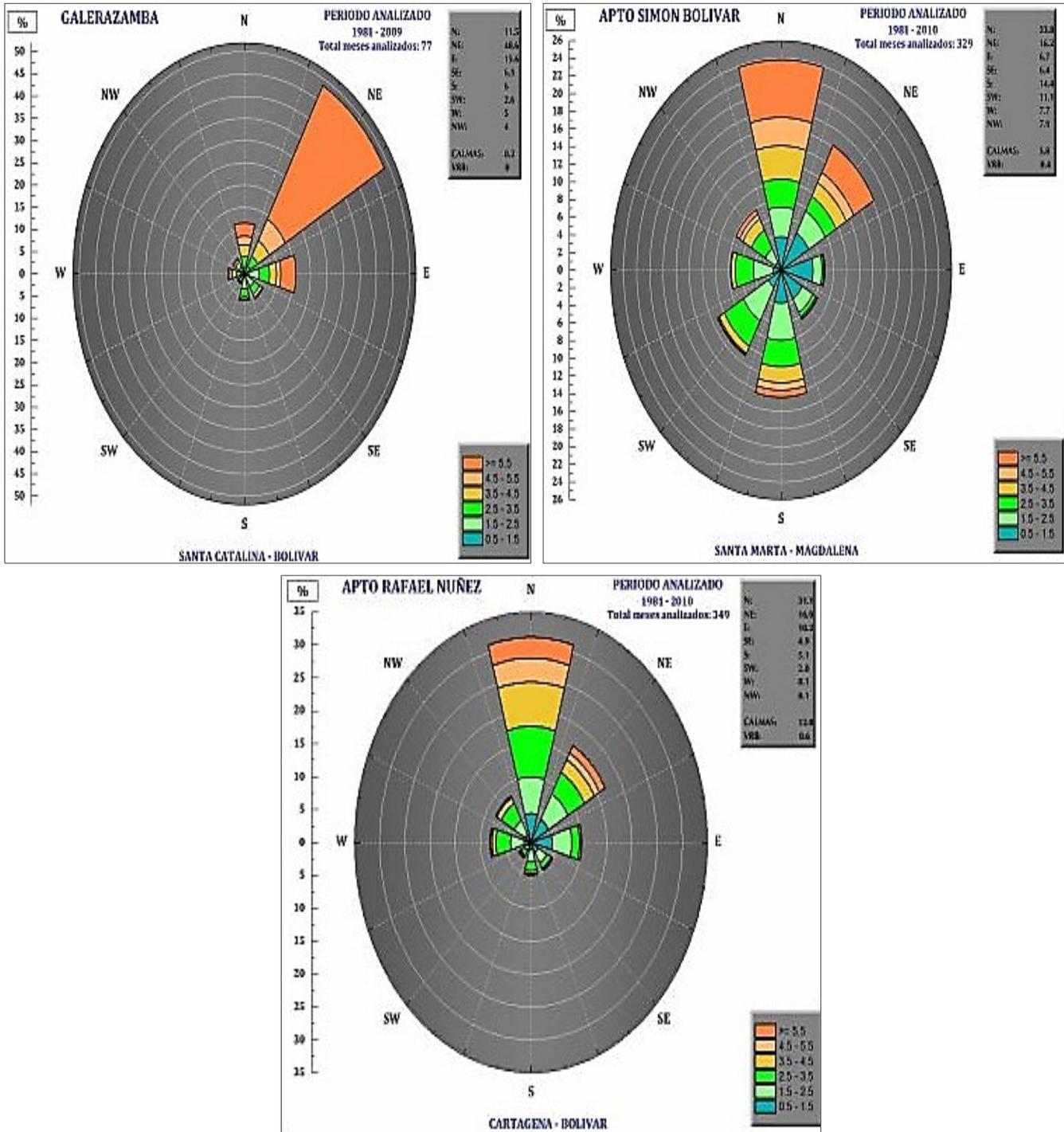
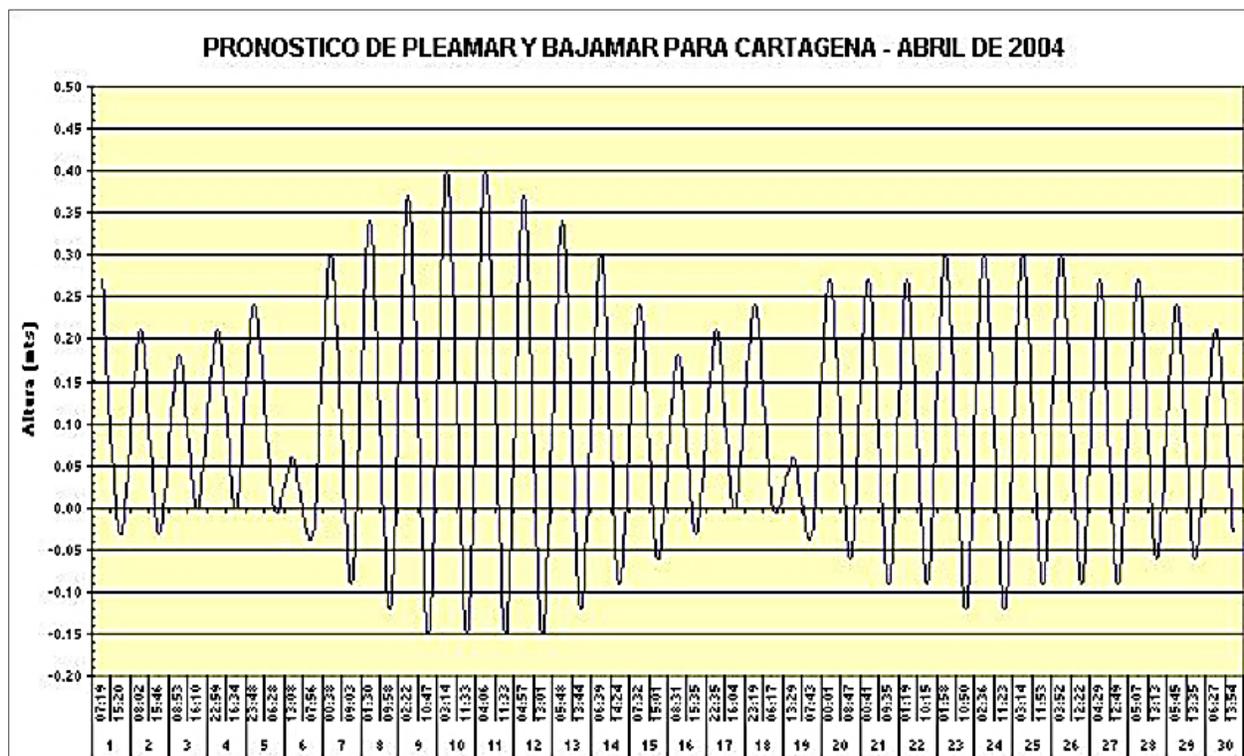


Figura 31. Rosa de viento en superficie en la corriente del mar Caribe desde el año 1981 al 2010. Fuente: (IDEAM, 2020)

El comportamiento del oleaje en la costa Caribe lo realizan por medio de la red nacional de estaciones mareográficas del IDEAM. Esta red se encarga de obtener información sobre el comportamiento del nivel del mar en las costas colombianas.

El territorio colombiano cuenta con 980,000 km^2 de aguas marítimas, de los cuales 64 mil kilómetros cuadrados corresponden al mar territorial, el cual bordea con un ancho de doce millas, los 3000 kilómetros de línea costera, en el mar Caribe (1700 Km.); en donde las mareas juegan un papel importante debido a la influencia que tiene en los ecosistemas marinos, transporte marítimo y la pesca.

Gracias a los datos registrados por las estaciones mareográficas el CIOH ha podido realizar diversos análisis sobre el comportamiento del oleaje para el año 2004, como se puede ver en la Gráfica 2.



Gráfica 2. Oleaje del año 2004. Fuente: (CIOH, 2004)

6.1.3 Análisis de otros eventos ocurridos en la zona.

Como se mencionó anteriormente los datos se obtuvieron gracias al Invermar, en donde se realizó un previo análisis de los eventos para los años 1999, 2001, 2004 ,2005, 2006, 2007 y 2009, que se encuentra en la Página 35.

6.2 Montaje del modelo.

6.2.1 Datos de entrada del WRF.

El evento seleccionado para realizar esta modelación corresponde a los vientos extremos registrados en el año 2004 por la presencia de los frentes fríos sobre la zona Caribe colombiana, lo cual produjo lluvias extraordinarias, inundaciones, tormentas, ondas tropicales, etc.

El modelo numérico utilizado es el WRF (Weather Research and Forecasting model), que es una herramienta de mesoescala para la predicción numérica de las condiciones meteorológicas de la atmósfera (William C Skamarock et al., 2008).

Los datos de entrada utilizados en esta modelación fueron descargados de la página de la NOAA (https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/free_data.html), los cuales son de acceso libre. Estos datos de pronóstico y análisis operacional global NCEP FNL (final) están formados por cuadrículas de 1 grado por 1 grado con intervalos de 6 horas, y se emplean para la Predicción del Medio Ambiente (National Center for Environmental Prediction, NCEP) (Rodríguez Rincón, 2016).

Los datos incluyen los siguientes parámetros: presión superficial, presión a nivel del mar, altura geopotencial, temperatura, temperatura de la superficie del mar, valores del suelo, capa de hielo, humedad relativa, vientos en U y V, movimiento vertical, vorticidad y ozono (UCAR, 2020a).

Conjunto de datos	Resolución espacial	Resolución temporal	Disponibilidad temporal	Vtable
NCEP Final Analysis (GFS-FNL) ds083.2	1 grado	Cada 6 horas	1999-07-30 hasta la actualidad	Vtable.GFS

Tabla 24. Datos de entrada para la modelación (WRF). Fuente: (WRF, 2020)

6.2.2 Puesta punto del modelo.

El WRF es el modelo numérico utilizado a lo largo de esta modelación, el cual es una herramienta de mesoescala que sirve para la predicción numérica de las condiciones meteorológicas de la atmósfera.

Se denominan modelo de mesoescala, debido a la manera en que representan los procesos físicos en escalas espaciales más pequeñas a través de parametrizaciones físicas. Las parametrizaciones físicas de menor escala toman la forma de sub-modelos dentro de dominios anidados a uno principal.

Las opciones físicas del WRF están divididas en cinco categorías, las cuales se pueden elegir o modificar. El software ofrece diversas opciones de la física que se pueden combinar de varias formas. Estas opciones varían con cada versión del WRF, a continuación, se presentan las más importantes (Rodríguez Rincón, 2016).

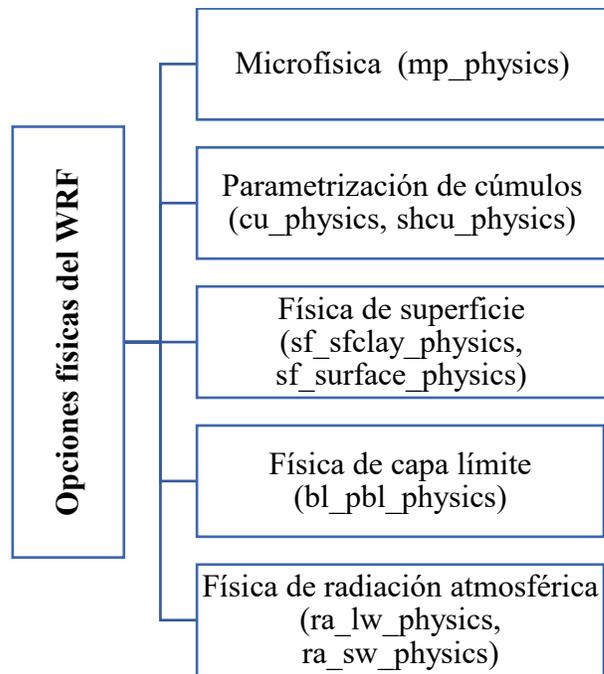


Figura 32. Opciones físicas del WRF. Fuente: (Rodríguez Rincón, 2016)

6.2.2.1 Ejecución del modelo.

En la Figura 33 se puede ver la descripción del flujo del programa durante la ejecución de un modelo.

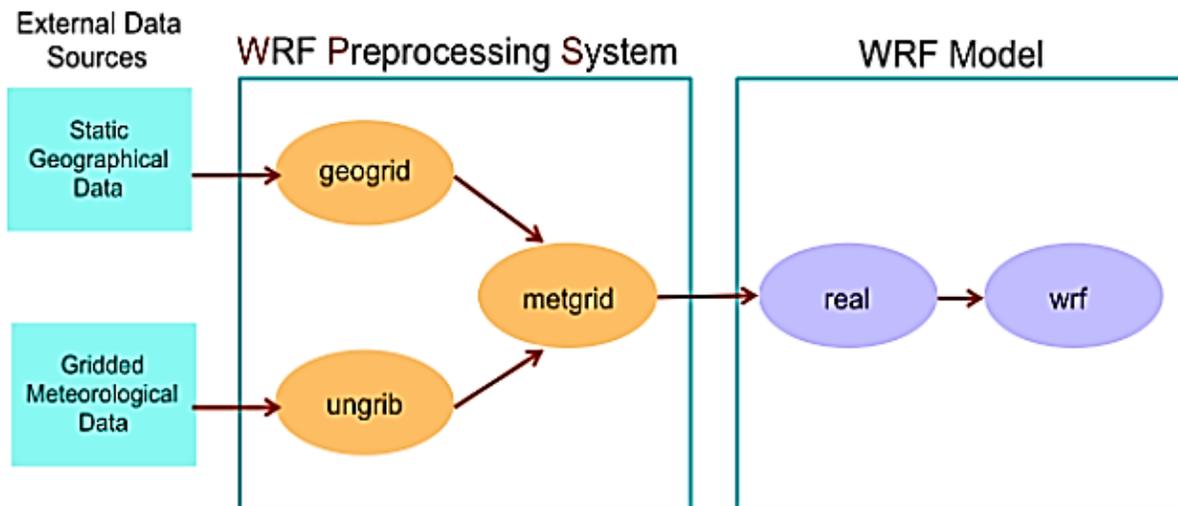


Figura 33. Proceso de ejecución del modelo. Fuente: (UCAR, 2020b)

La ejecución del modelo se divide en dos partes fundamentales:

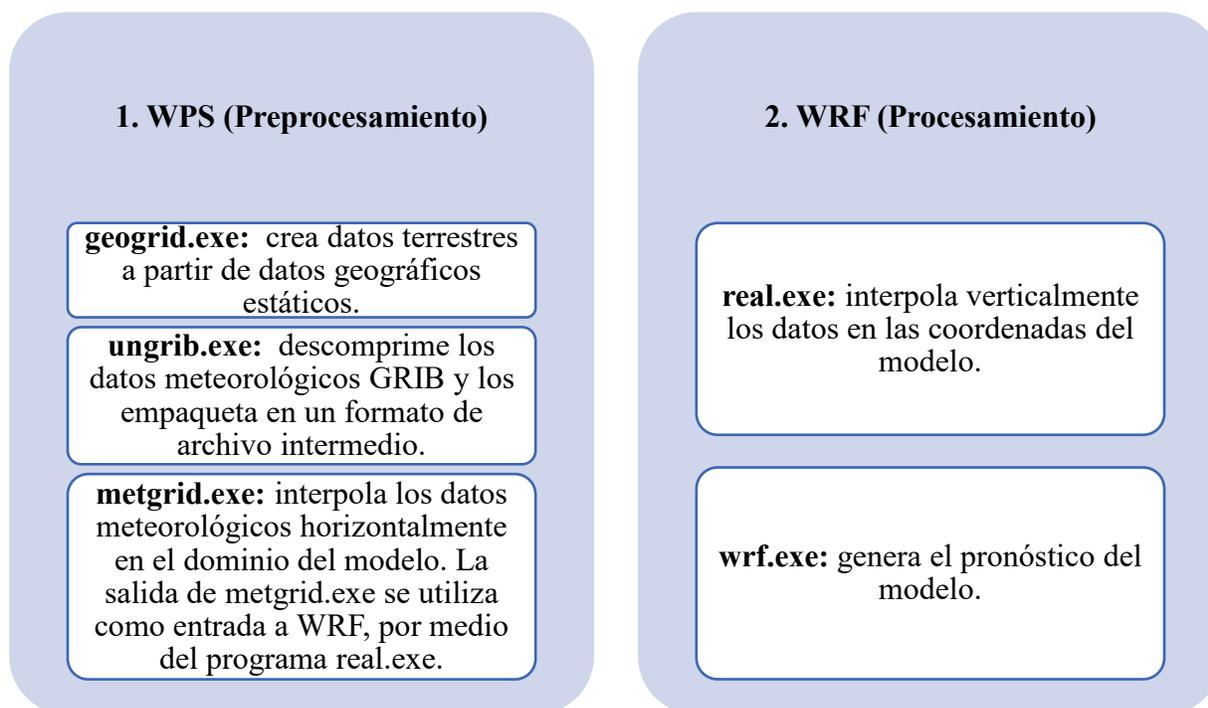


Figura 34. Descripción del proceso de ejecución del modelo. Fuente: (UCAR, 2020b)

6.2.2.2 Descripción de los dominios.

Para esta modelación se estableció un juego de dos dominios anidados centrados en la zona Caribe colombiana, el dominio número uno cubre la mayor parte del territorio colombiano con una resolución espacial de (19,4 km), mientras que el dominio número dos tiene una menor resolución espacial de (6,47 km) que abarca principalmente la zona costera (Arango & Ruiz, 2011).

En la Figura 35 se presenta la adecuación de la malla numérica utilizada para este estudio. Se utilizaron dominios anidados de diferente resolución a fin de generar una resolución espacial más fina, dado que los eventos físicos de mesoescala seleccionados son (frentes fríos, tormentas tropicales, etc) producidos por los vientos extremos de la zona costera (Rodríguez Rincón, 2016).

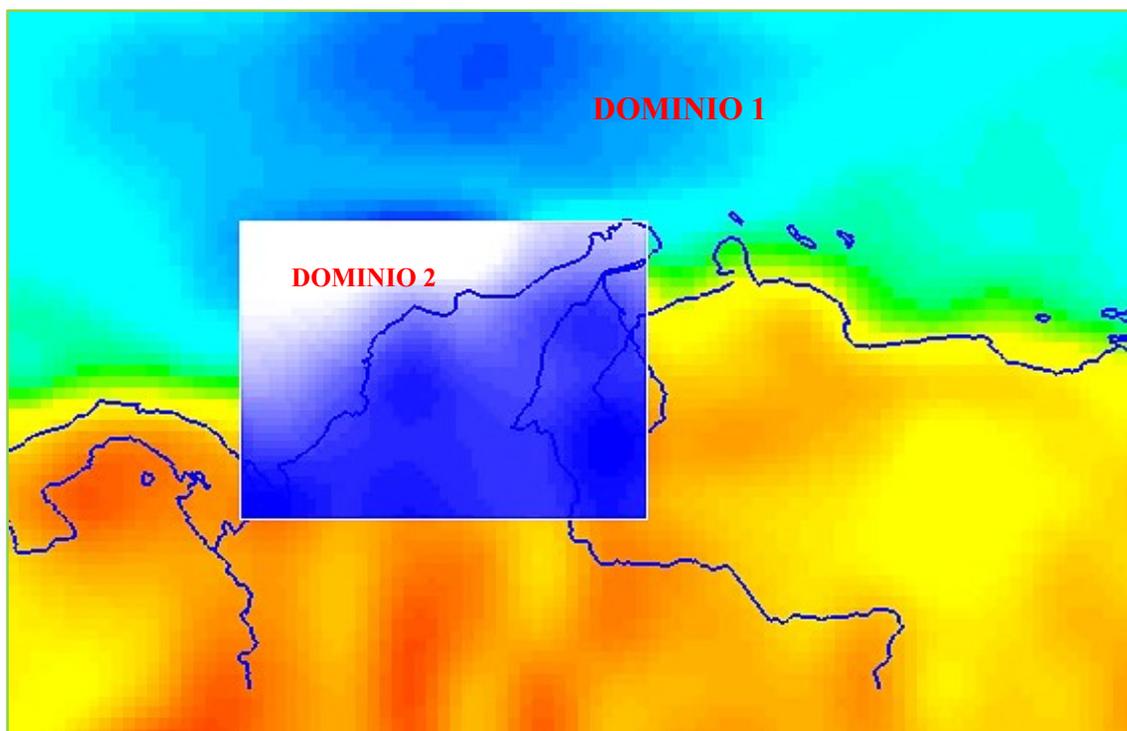


Figura 35. Dominios anidados ubicados en el territorio colombiano. Fuente Propia

6.2.2.3 Configuración del modelo.

La configuración del modelo (dominio 1 y dominio 2) se describe en los siguientes ítems.

Tiempo de ejecución del modelo.

A continuación, se describe en cuanto tiempo se ejecutará el modelo como se puede ver en la Tabla 25.

Tiempo de ejecución		Hora de inicio de los dominios		Hora de finalización de los dominios	
run_days	4	start_year	2004	end_year	2004
run_hours	12	start_month	3	end_month	3
run_minutes	0	start_day	2	end_day	6
run_seconds	0	start_hours	12	end_hour	18

Tabla 25. Tiempo de ejecución del modelo. Fuente Propia

Características del dominio.

Las características de los dominios anidados se describen en la Tabla 26. Estos datos se obtuvieron a partir de la configuración y ejecución del modelo.

Descripción	Características	Opción (Variables)	Valor
Número de dominios	Cantidad de dominios anidados usados en el modelo.	Max_dom	2
Dimensión oeste-este y sur-norte	Son las dimensiones o espacio de cuadrícula de cada uno de los dominios.	E_we	100, 106
		e_sn	77, 82
Número de niveles verticales	Este valor debe ser el igual para cada dominio.	E_vert	35
Presión	Es la presión usado en este modelo.	P_top_requested	5000 Pa
Número de niveles verticales entrantes	Este valor está determinado por los datos de entrada WPS.	Num_metgrid_levels	27
Resolución de los dominios	Distancia o resolución de la cuadrícula del dominio en la dirección x e y.	dx	19400, 6466.667
		dy	19400, 6466.667
Grosor de la cuadrícula	La cuadrícula con mayor grosor debe colocarse en el dominio 1 o el de mayor tamaño.	Grid_id	1, 2
Coordenadas x e y	Las coordenadas se ubican en la esquina inferior izquierda del nido en el dominio principal.	I_parent_start	1, 22
		j_parent_start	1, 26

Tabla 26. Características del dominio. Fuente Propia

Características de las opciones físicas del modelo.

Se realiza la descripción de las opciones microfísicas utilizadas en el modelo según la Tabla 27.

Opción (Variables)	Descripción	Características	Valor
mp_physics (max_dom)	Opción de microfísica.	<ul style="list-style-type: none"> • Lluvia cálida, sin hielo • Microfísica idealizada • Lluvia dividida en el tiempo 	2*5, 9*0
ra_lw_physics (max_dom)	Opción de radiación de onda larga	Determinación del cálculo de flujos de radiación	2*1, 9*0

		ascendentes y descendentes en cielo despejado y nubes.	
ra_sw_physics (max_dom)	Opción de radiación de onda larga	Determinación del cálculo de los flujos solares con cielo despejado y nublado.	2*1, 9*0
radt (max_dom)	Minutos entre llamadas de física de radiación	Minutos entre llamadas de física de radiación. Recomendar 1 min por km de dx (por ejemplo, 10 por 10 km)	2*30.00000 9*0.0000000E+00
sf_sfclay_physics (max_dom)	Opción física de la capa superficial.	Teoría de la similitud para determinar el intercambio coeficientes y diagnósticos = cs de 2m T yq y Vientos de 10 m	2*1, 9*0
sf_surface_physics (max_dom)	Opción de modelo de superficie terrestre (LSM).	Modelo de suelo simple de 5 capas Sin vegetación o predicción de cobertura de nieve, solo difusión térmica en las capas del suelo.	2*2, 9*0
num_soil_layers	Número de capas de suelo	Número de capas de suelo en el modelo de superficie terrestre.	4
bl_pbl_physics (max_dom)	Opción de capa límite planetaria (PBL)	Se utiliza para distribuir los flujos superficiales con flujos parásitos de la capa límite y permitir el crecimiento de PBL por arrastre.	2*1, 9*0
cu_physics (max_dom)	Opción de parametrización de cúmulos	Parametrización de cúmulos	2*1, 9*0
cutd	Minutos entre llamadas de física de cúmulos	Tiempo entre llamadas al esquema de cúmulos	2*5.000000 9*0.0000000E+00
isfflx	Opción que determina los flujos de calor y humedad de la superficie	Determina los flujos de calor y humedad de la superficie	1
icloud	Opción para calcular la fracción de nubes para la radiación	Cálculo de fracción de nubes para la radiación	1

Surface_input_source	Uso de la tierra y la categoría del suelo	De dónde provienen los datos sobre el uso de la tierra y la categoría del suelo. 1 = WPS / geomalla 2 = datos GRIB	3
num_land_cat	Categorías de tierra en los datos estáticos / geomallas	El número de categorías de tierra en los datos estáticos / geomallas de entrada. Esto debe coincidir con lo que se produce en WPS / geomalla.	21
sf_urban_physics (max_dom)	Opción que determina que efectos urbanos se utilizan	Determinación de efectos urbanos que se utilizan.	11*0

Tabla 27. Características físicas del modelo. Fuente Propia

6.3 Comparación de los eventos realizados por el modelo con los datos existentes.

Se utiliza los datos existentes por la Universidad del Norte, los cuales se encuentran basados en una aplicación llamada Appmar 2.0 que se está constituida en un entorno de Python. Esta aplicación fue creada con la finalidad de realizar la descarga, tratamiento y análisis de información meteorológica y marina.

Para este análisis se ubicaron 6 puntos en la dirección noroeste en la zona Caribe colombiana.

Punto	Latitud (Norte)	Longitud (Oeste)
1	11.513740	73.735600
2	11.330540	74.401260
3	11.152070	74.870790
4	10.414490	75.632620
5	10.316340	76.196540
6	9.623840	76.086680

Tabla 28. Coordenadas de la zona de análisis. Fuente Propia

Como se mencionaba anteriormente, los datos se descargaron por medio de la aplicación Appmar 2.0, teniendo en cuenta las coordenadas de los puntos anteriores. Una vez se descargaron los datos se procedió a realizar el proceso de filtración de los datos seleccionando los días y las horas de estudio. En la Figura 36 se puede evidenciar la ubicación de los puntos en el dominio 2.

En el dominio 2 se puede ver la escala de colores la cual representa los valores de la velocidad de la zona, en donde los valores negativos son de color rojo y se encuentran dentro de la zona de estudio, mientras que los valores positivos de color azul se encuentran por fuera de la zona costera.

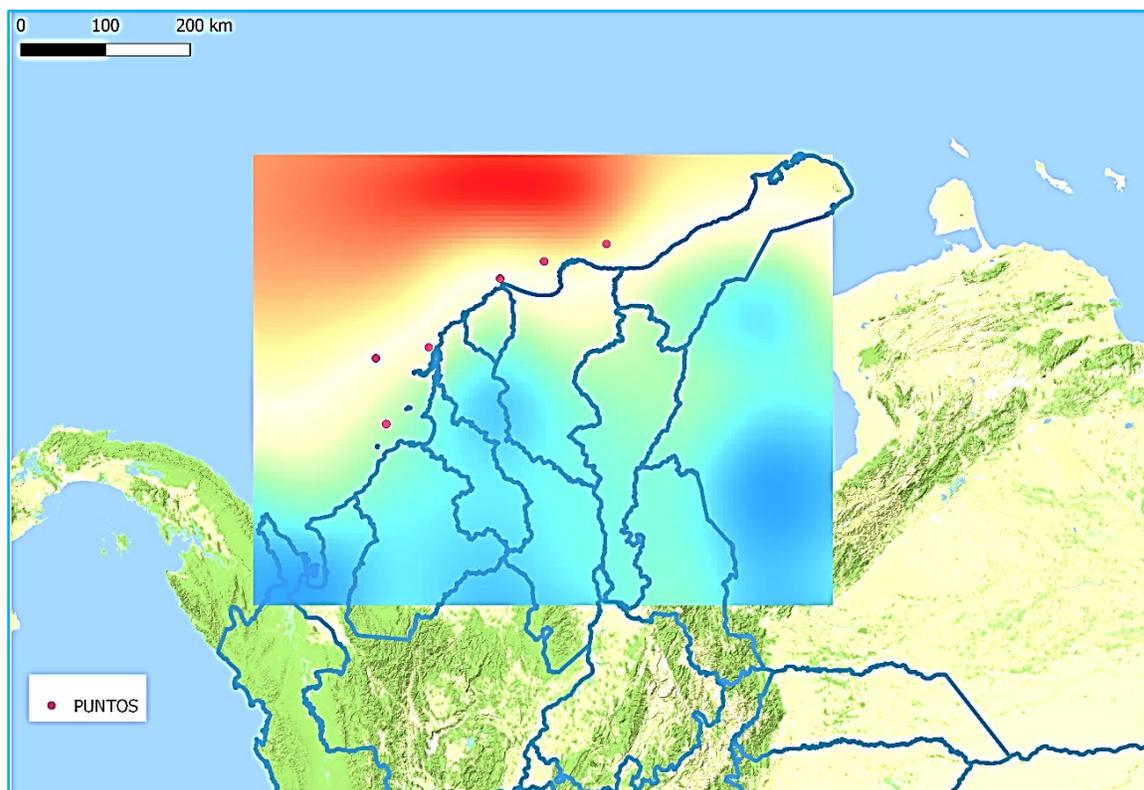


Figura 36. Ubicación de los puntos sobre el dominio 2. Fuente Propia

6.4 Complicaciones en la infraestructura.

Las implicaciones en la zona costera se relacionan con los eventos meteorológicos presentados en los diferentes meses del año, por otra parte, hay que tener en cuenta que al pasar de los años nos estamos viendo afectados por el cambio climático (El Heraldo, 2020).

Los eventos meteorológicos presentados tales como las tormentas eléctricas, lluvias intensas, mini tornados, incrementos de fuertes vientos con mayor intensidad, vendavales, incremento de marea alta, inundaciones, erosiones y demás eventos generan daños en las infraestructuras que pueden ser de mayor impacto y generan afectación a la población.

Los daños en las infraestructuras ocasionados por los diferentes eventos meteorológicos se evidencian constantemente en las casas destechadas, grietas en las paredes, muros caídos, incendios y ruptura de ventanales, entre otros (El Heraldo, 2020; Oas, 2000).



Figura 37. Daños en la infraestructura a causa de los fenómenos meteorológicos. Fuente: (El Heraldo, 2020)

En la Tabla 29 se puede ver la relación entre la velocidad del viento y los daños generales a una infraestructura.

Velocidad del viento	Daños
22-35 m/s	Menores
36-45 m/s	Intermedios (pérdida de ventanas)
> 45 m/s	Estructurales

Tabla 29. Relación entre la velocidad del viento y los daños en la infraestructura. Fuente: (Oas, 2000)

Entre los diferentes eventos encontramos la erosión, corresponde a un proceso natural que se hace responsable de realizar una reducción significativa de las playas, todo esto bajo un causante de dunas y acantilados, producido por fuertes vientos que conllevan a grandes olas y también a una marea alta.

La consecuencia de estos eventos se puede determinar en las playas y cerca de las urbanizaciones que se encuentran en alrededor, debido a que por su ubicación acantilada y los ataques de ola en base a los taludes produce desestabilización por lo tanto genera desprendimiento de bloques y masas de terrenos, partiendo de esto la infraestructura urbana se encuentra en peligro de colapso de igual forma su vegetación (Invemar, 2008).



Figura 38. Se observa parte de la infraestructura urbana muy cerca del talud y afectada por la acción del mar. Fuente: (Invemar, 2008)

7 Análisis de resultados

En este capítulo, se presentan los resultados de la aplicación de la metodología descrita para llevar a cabo el análisis meteorológico. Una vez ejecutado el modelo, se procede a verificar los resultados, en el cual se pueden ver las salidas de la modelación del WRF en donde se encuentran datos de las siguientes variables.

Tipo de variable	Unidad
Temperatura	K
Precipitación	kg m ⁻² s ⁻¹
Presión	Pensilvania
Humedad	1
Velocidad el viento	m s ⁻¹
Radiación solar	W m ⁻²
Evapotranspiración	kg m ⁻² s ⁻¹
Viento en U de 10 metros	m s ⁻¹
Viento en V de 10 metros	m s ⁻¹

Tabla 30. Salidas del modelo WRF. Fuente: (Cordex WRF, 2020)

Para la validación del modelo del año 2004 el cual registro el oleaje más alto, se realizó la verificación de los datos de viento en la zona costera, el cual consiste en la comparación de las variables U-10, V-10 y la resultante.

Para este comparativo se tuvo en cuenta en cuenta los puntos de la Tabla 28, estas coordenadas se ubicaron con el fin de obtener las rachas viento y validar el modelo. Además, para los 6 puntos se realizaron 3 gráficas sobre el comportamiento de $U_{superficial}$, $V_{superficial}$ y la resultante.

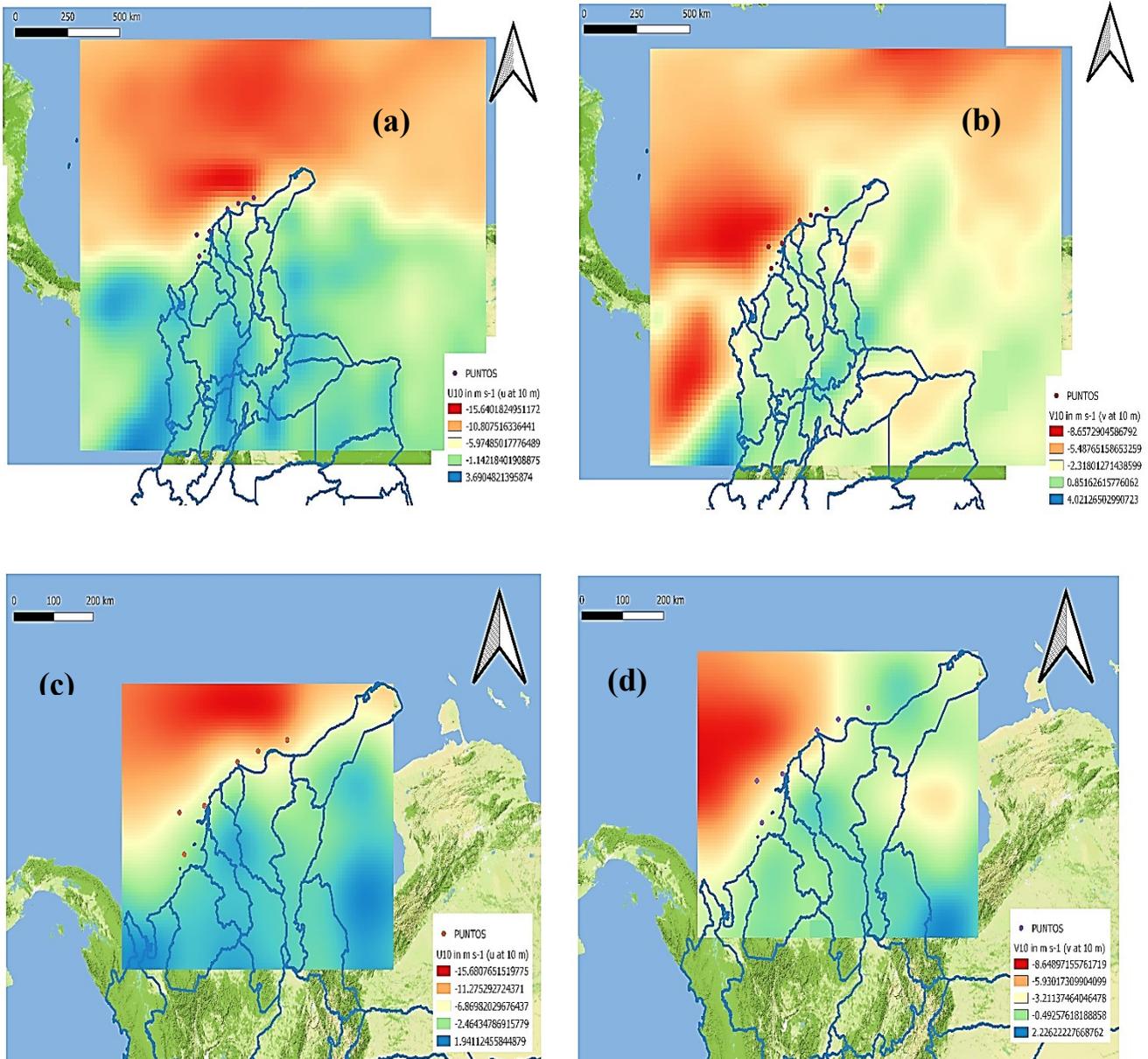


Figura 39. Resultado del dominio anidado 1 y 2. Los tonos indican el valor de la velocidad en (m/s), en este caso la escala de color empieza desde 1 m/s (azul) hasta -16 m/s (rojo). Fuente Propia

Figura superior izquierda. Velocidad (m/s) en U del dominio 1. **Figura superior derecha.** Velocidad (m/s) en V del dominio 1. **Figura inferior izquierda.** Velocidad (m/s) en U del dominio 2. **Figura inferior derecha.** Velocidad (m/s) en V del dominio 2.

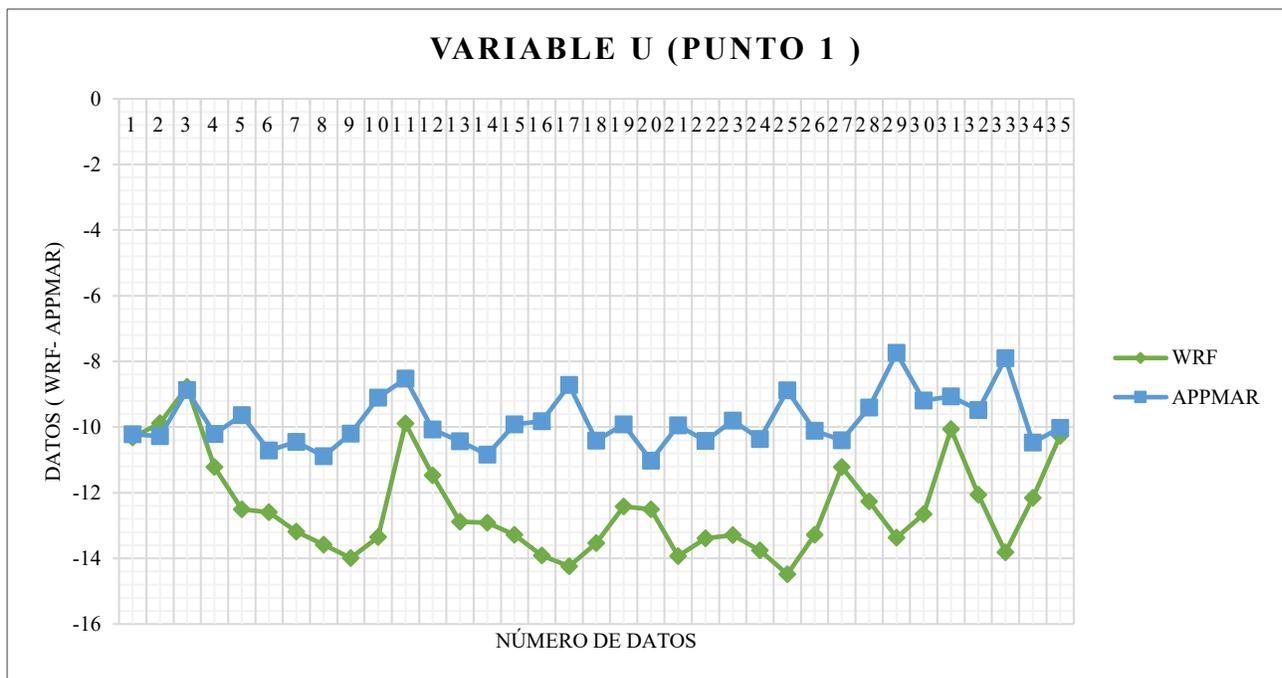
En la Figura 39 se observa la escala de los valores de velocidad del dominio 1 y dominio 2, sobre las variables U y V. En la escala de colores se presenta los valores máximos con signo negativo y de color (rojo), mientras que los valores mínimos se encuentran de color (azul) y su signo es positivo. El signo de la velocidad depende de la ubicación de cada uno de los puntos. Se puede inferir que la zona con las velocidades máximas se encuentra en el noroeste de la zona costera del territorio colombiano.

7.1 Resultados de la variable U-10.

Para la variable U-10 se encontraron los siguientes resultados, permitiendo validar el modelo. A continuación, se describe el comportamiento de cada uno de los puntos.

Punto 1 (11°30'49.5"N 73°44'08.2"W)

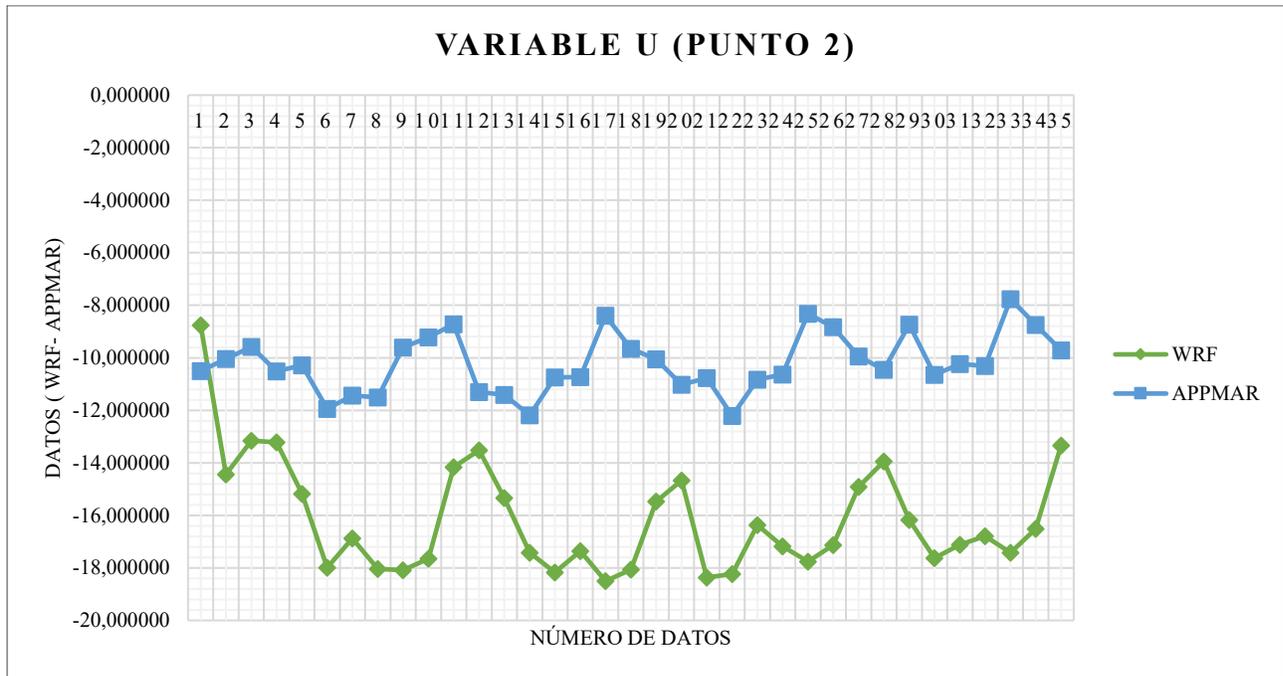
En la Gráfica 3. Se puede observar que hasta el dato tres los datos tienen una tendencia similar, pero a partir del dato siguiente se pierde la tendencia y se vuelve a recuperar en el último punto.



Gráfica 3. Variable U (Punto 1). Fuente Propia

Punto 2 (11°19'49.9"N 74°24'04.5"W)

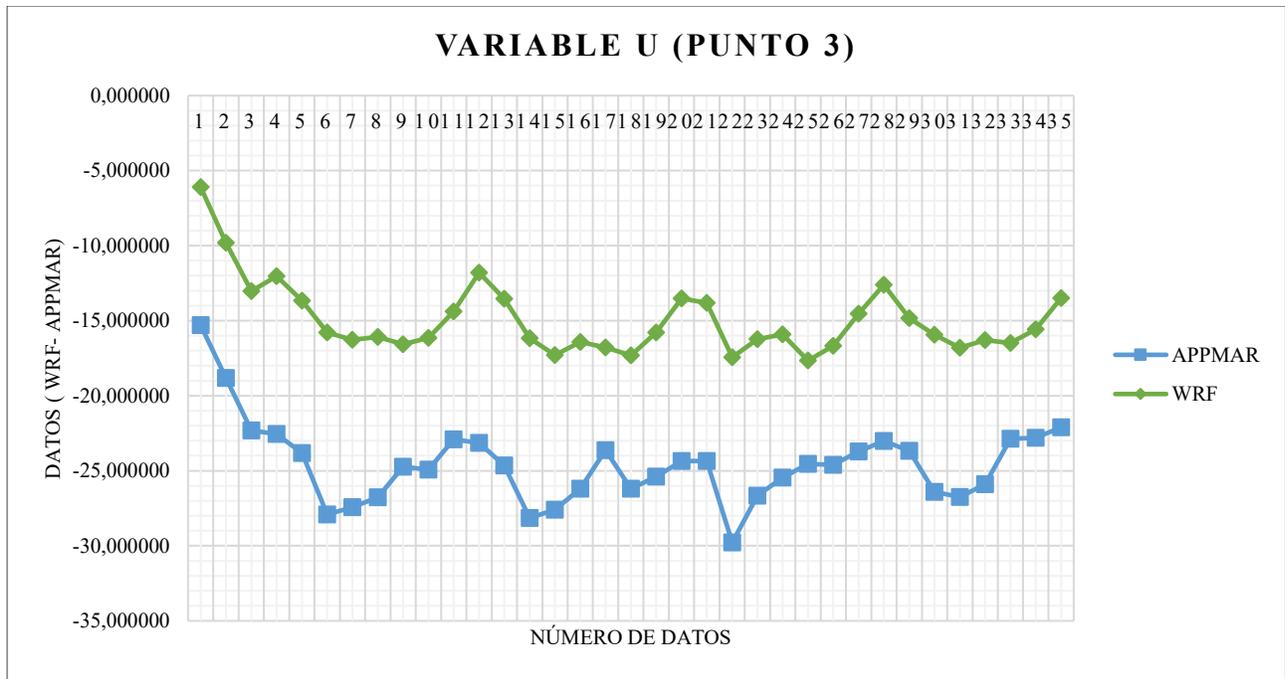
En la Gráfica 4. Se evidencia que los datos no tienen una tendencia similar, debido a que sus valores máximos y mínimos no coinciden.



Gráfica 4. Variable U (Punto 2). Fuente Propia

Punto 3 (11°09'07.5"N 74°52'14.8"W)

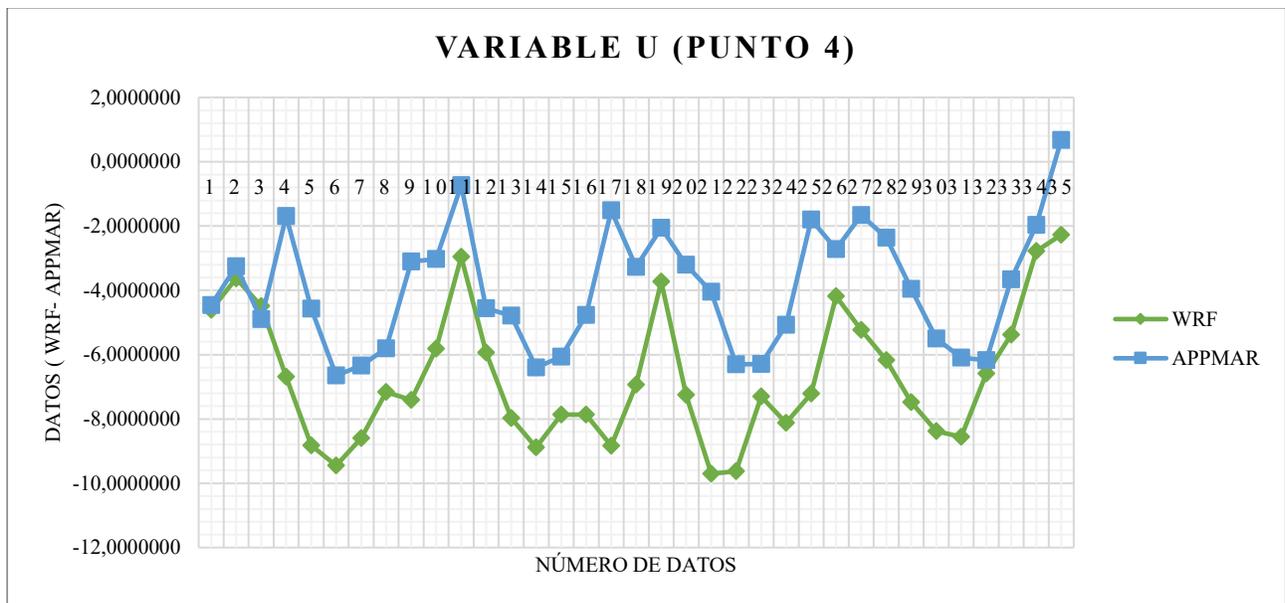
En la Gráfica 5. Se observa que los datos conservan la misma tendencia, pero el comportamiento de sus máximos y mínimos son diferentes. Los valores del modelo WRF son superiores a los de la aplicación Appmar 2.0.



Gráfica 5. Variable U (Punto 3). Fuente Propia

Punto 4 (10°24'52.2"N 75°37'57.4"W)

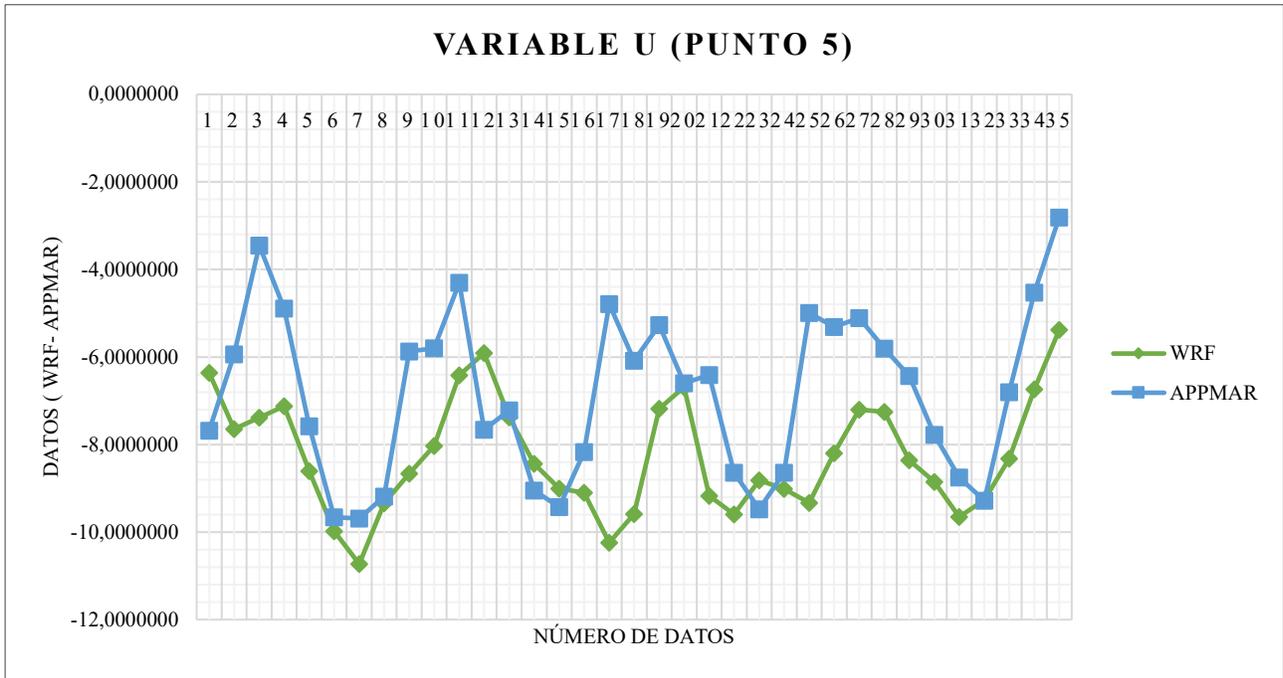
En la Gráfica 6. Los datos conservan la misma tendencia, aunque se sobreestiman los valores de los máximos, como se puede ver en el último punto con valor de 0,68.



Gráfica 6. Variable U (Punto 4). Fuente Propia

Punto 5 (10°18'58.8"N 76°11'47.5"W)

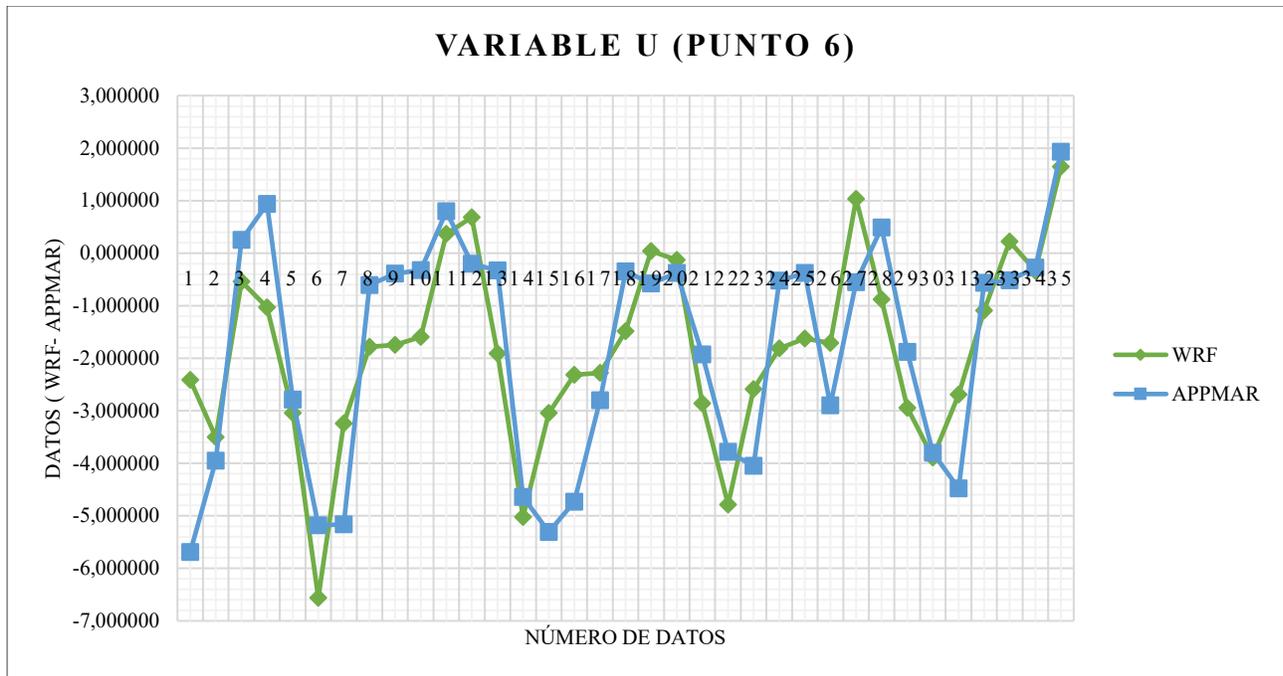
En la Gráfica 7. Se puede evidenciar la tendencia en algunos datos; además algunos datos tienen una correlación similar. En este caso los valores máximos se presentan en Appmar, el cual su punto máximo es -2,81, mientras que el WRF se observa su valor en mínimo en -10,73.



Gráfica 7. Variable U (Punto 5). Fuente Propia

Punto 6 (9°37'25.8"N 76°05'12.1"W)

En la Gráfica 8. Se observa claramente la tendencia de los vientos en el variable U; encontrándose sus valores máximos en 1,93 para Appmar y 1,64 para WRF.



Gráfica 8. Variable U (Punto 6). Fuente Propia

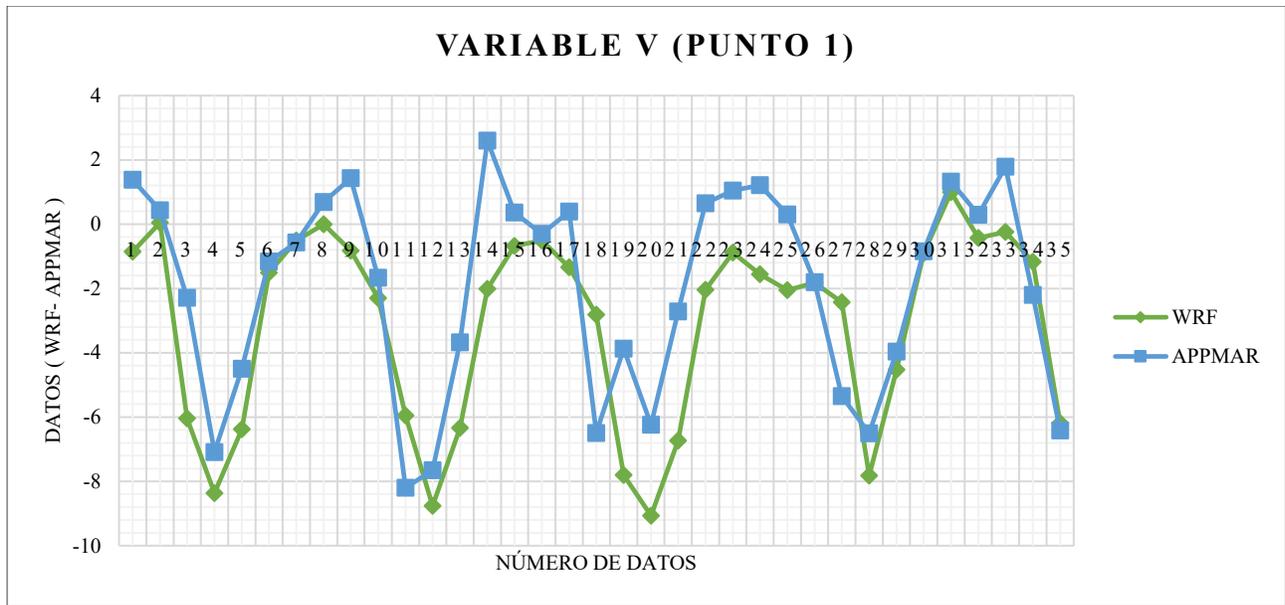
7.2 Resultados de la variable V-10.

Para la variable V-10 se encontraron los siguientes resultados, permitiendo validar el modelo.

A continuación, se describe el comportamiento de cada uno de los puntos.

Punto 1 (11°30'49.5"N 73°44'08.2"W)

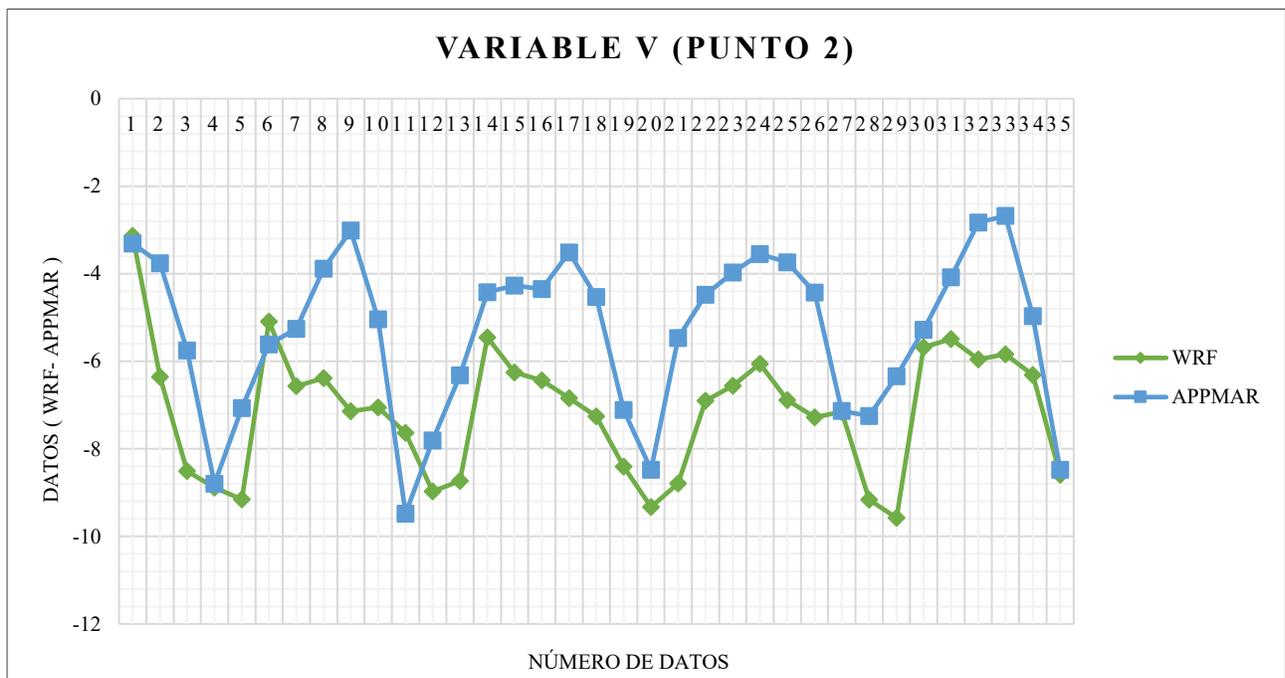
En la Gráfica 9. Se puede observar que la tendencia se mantiene, y que los datos máximos se sobreestiman específicamente en Appmar. Además, que en el WRF los valores mínimos de igual forma se sobreestiman.



Gráfica 9. Variable V (Punto 1). Fuente Propia

Punto 2 (11°19'49.9"N 74°24'04.5"W)

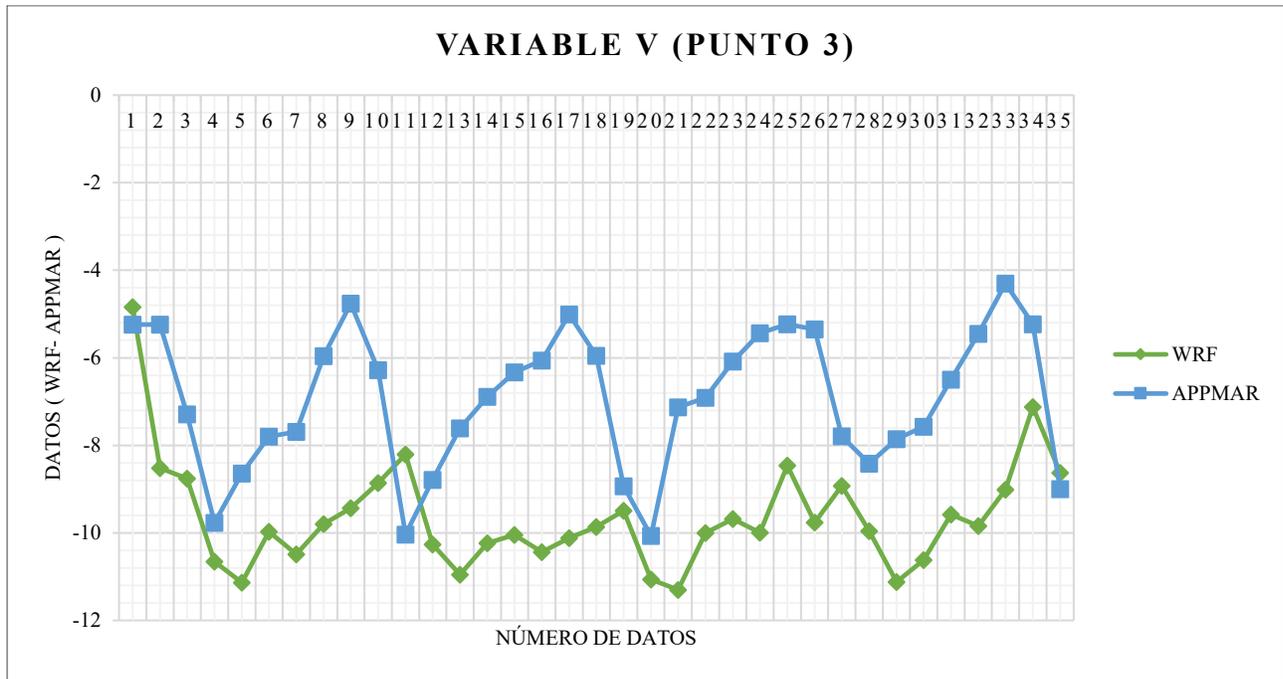
En la Gráfica 10. No se evidencia tendencia alguna, y se sobrestiman sus valores máximos; por lo tanto, su correlación tendrá que ser más alta.



Gráfica 10. Variable V (Punto 2). Fuente Propia

Punto 3 (11°09'07.5"N 74°52'14.8"W)

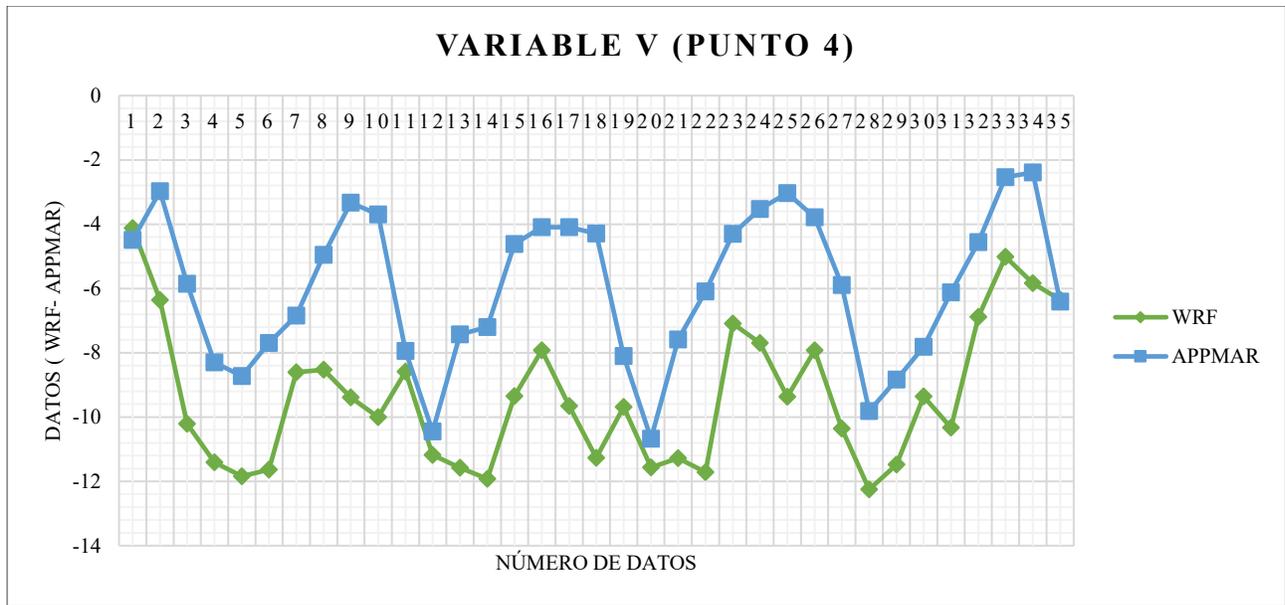
En la Gráfica 11. No se evidencia tendencia alguna, y los valores máximos se evidencian en Appmar.



Gráfica 11. Variable V (Punto 3). Fuente Propia

Punto 4 (10°24'52.2"N 75°37'57.4"W)

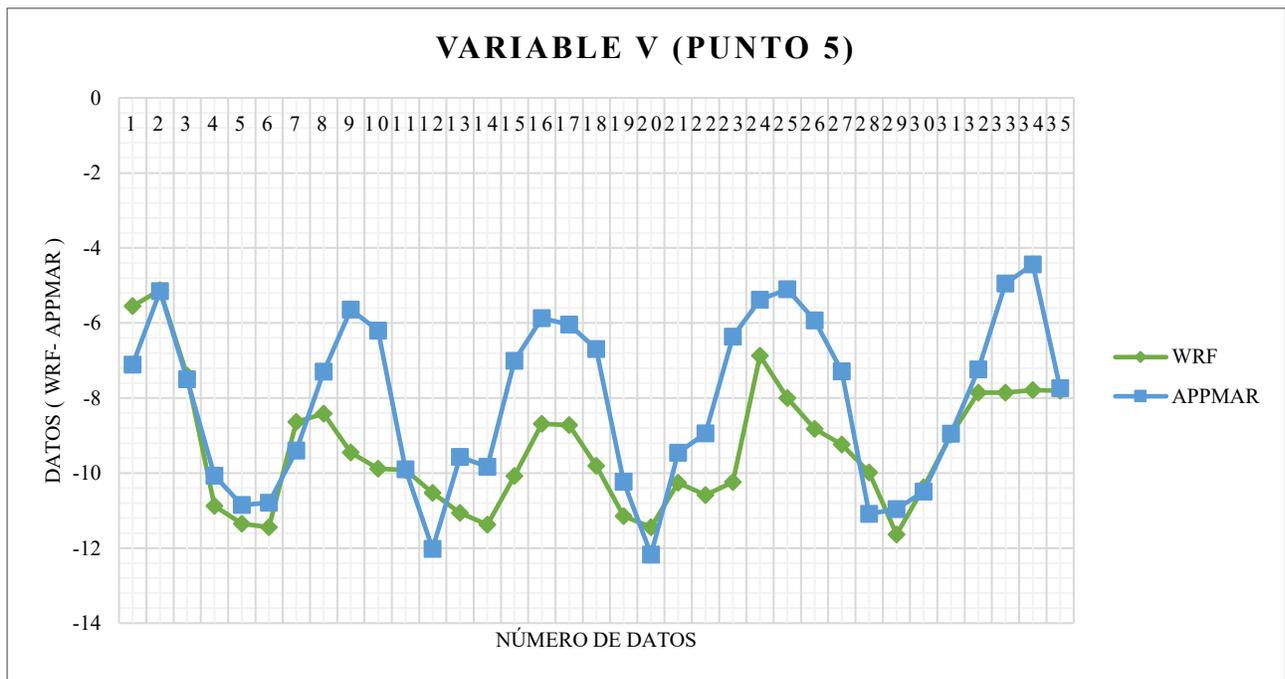
En la Gráfica 12. Se observa una leve tendencia, en el cual sus máximos y mínimos se encuentran en posiciones diferentes.



Gráfica 12. Variable V (Punto 4). Fuente Propia

Punto 5 (10°18'58.8"N 76°11'47.5"W)

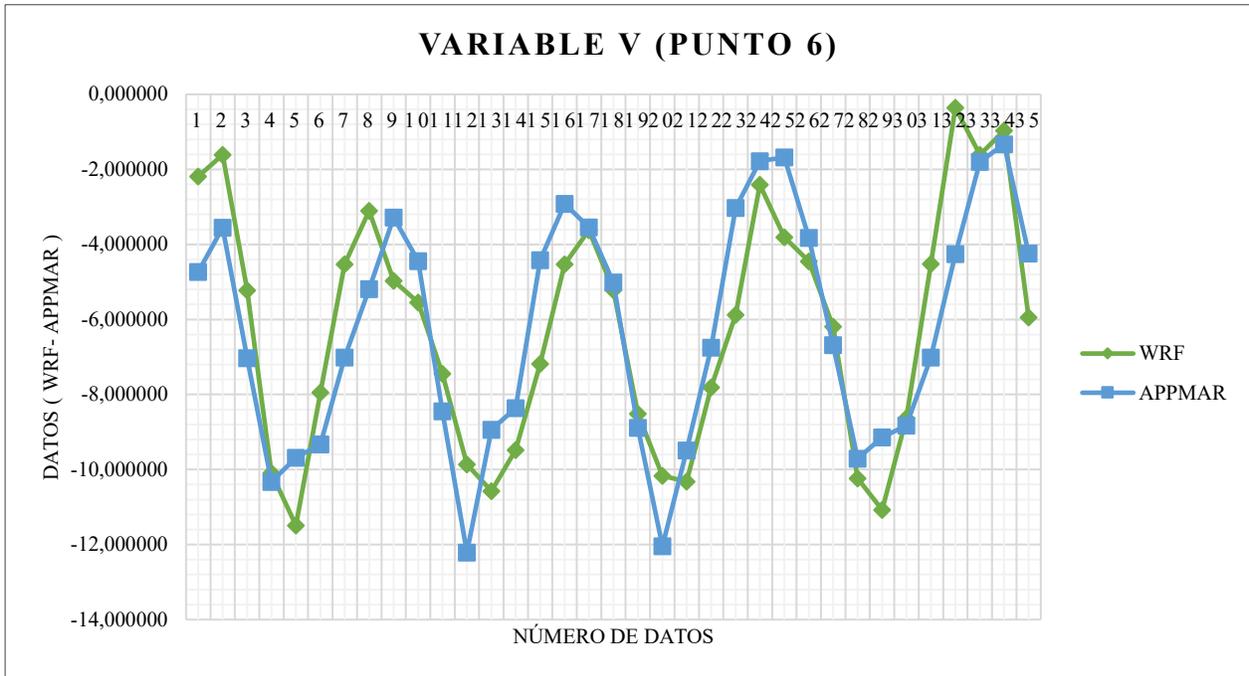
En la Gráfica 13. Se puede evidenciar que en algunos datos se conserva la tendencia, y hay una similitud en los primeros y últimos datos.



Gráfica 13. Variable V (Punto 5). Fuente Propia

Punto 6 (9°37'25.8"N 76°05'12.1"W)

En la última gráfica de la variable V, se puede observar que se conserva una tendencia en la totalidad de datos. Además, la aplicación Appmar maneja unos valores mínimos superior a los del modelo WRF.



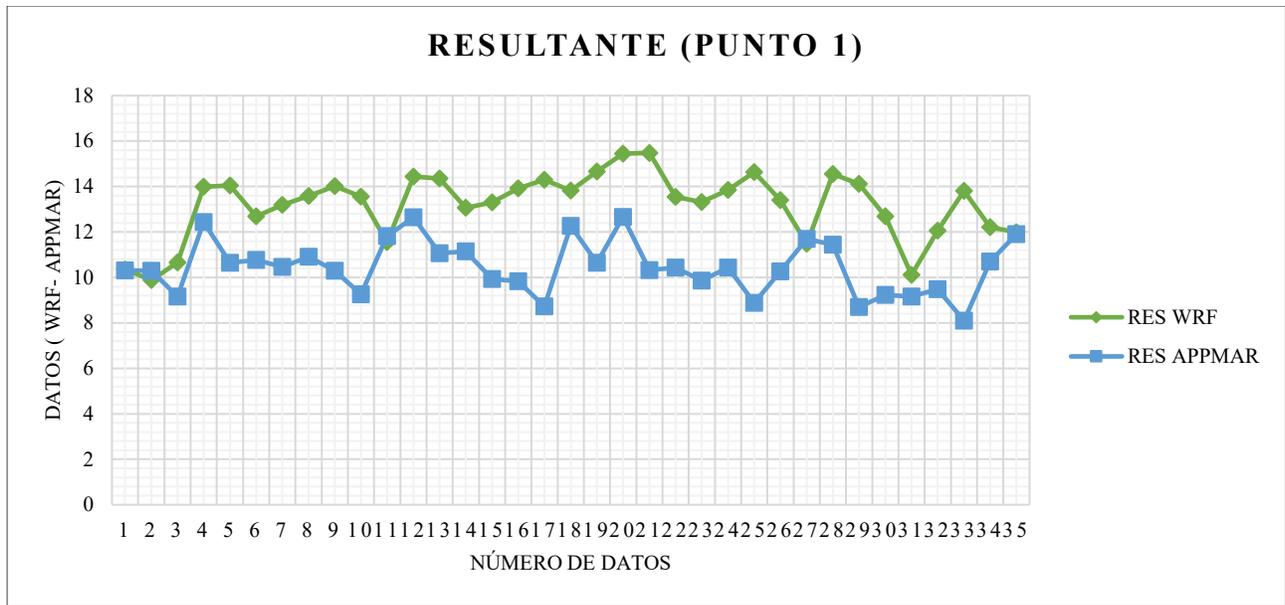
Gráfica 14. Variable V (Punto 6). Fuente Propia

7.3 Resultados de la variable resultante.

Para la variable resultante se encontraron los siguientes resultados, permitiendo validar el modelo. A continuación, se describe el comportamiento de cada uno de los puntos.

Punto 1 (11°30'49.5"N 73°44'08.2"W)

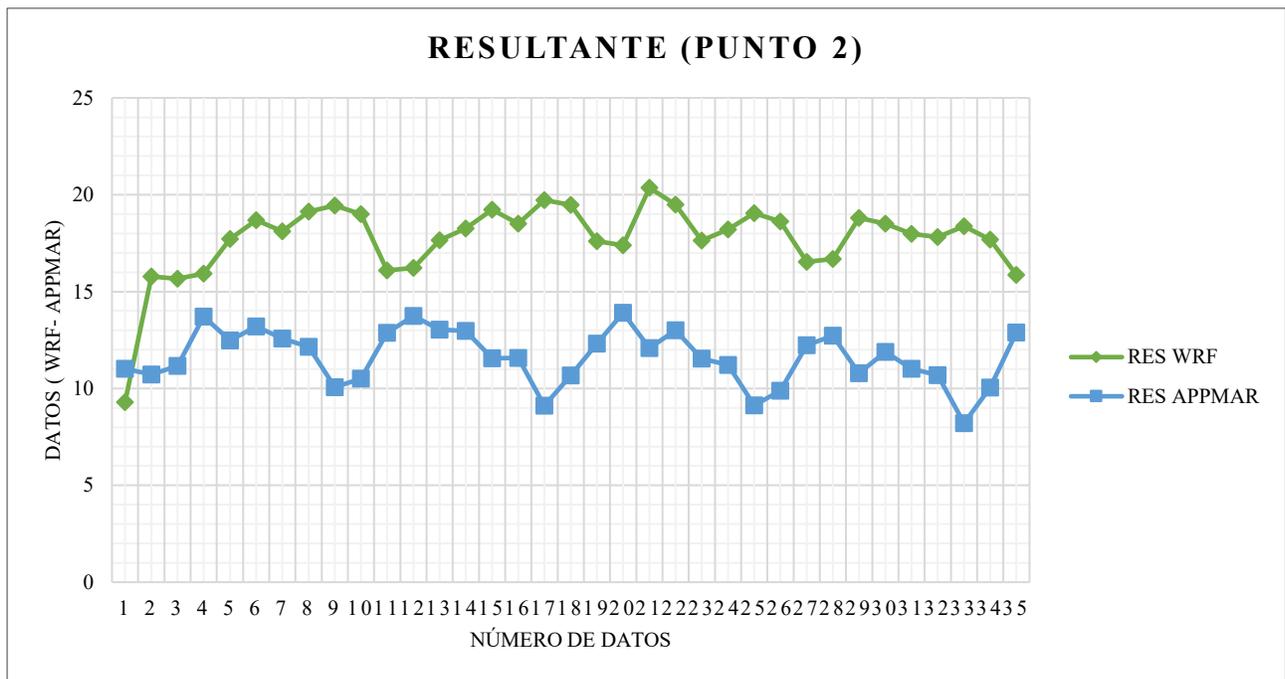
En la Gráfica 15. Se evidencia una leve tendencia en algunos valores de la resultante, se mantienen los máximos y mínimos para este punto.



Gráfica 15. Resultante (Punto 1). Fuente Propia

Punto 2 (11°19'49.9"N 74°24'04.5"W)

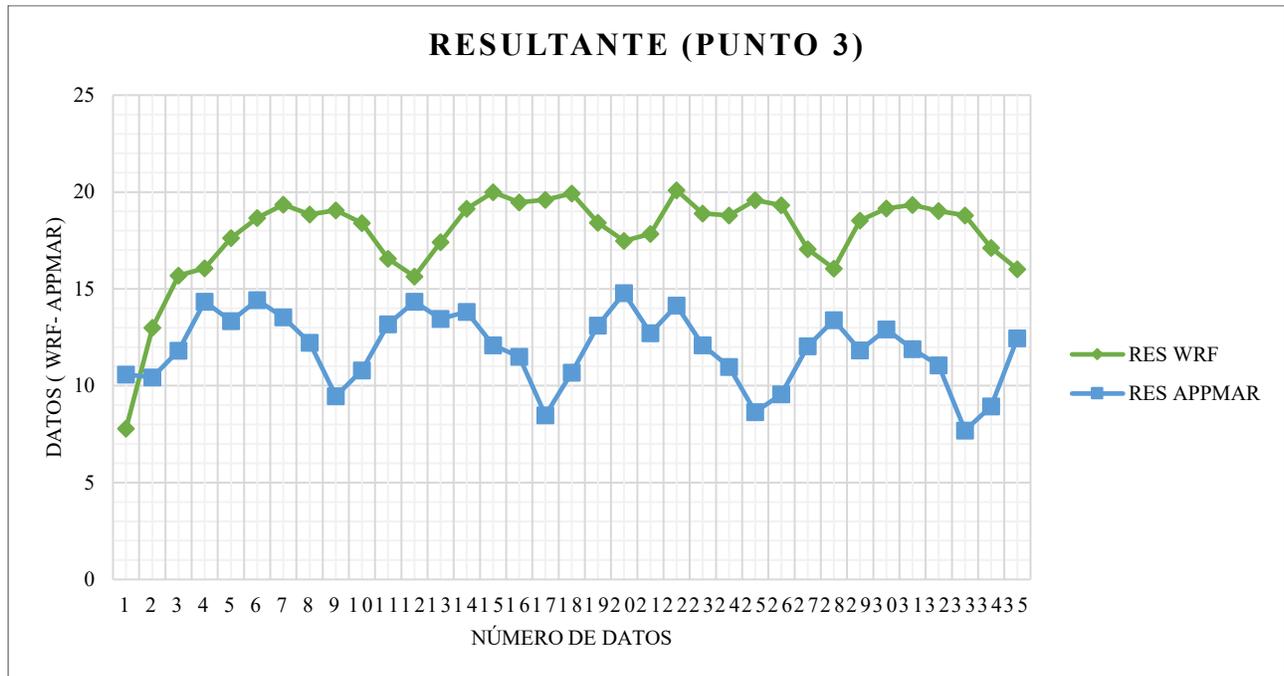
En la Gráfica 16. Se observa una tendencia en ambas resultantes, pero en los valores iniciales y finales se observa una leve dispersión.



Gráfica 16. Resultante (Punto 2). Fuente Propia

Punto 3 (11°09'07.5"N 74°52'14.8"W)

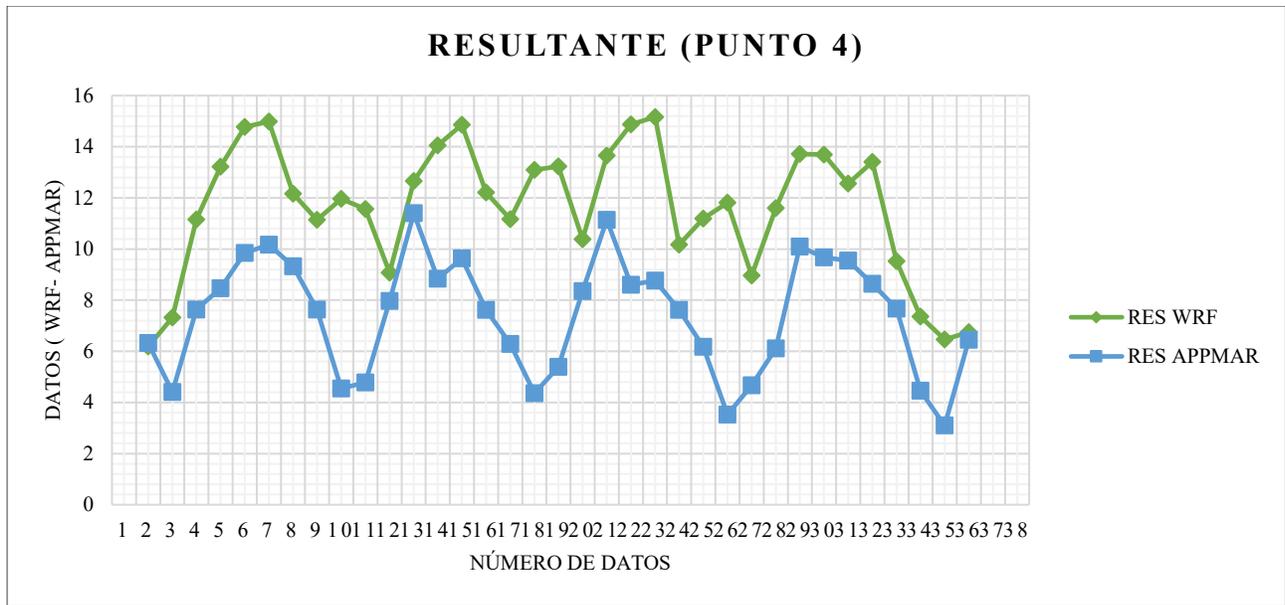
En la Gráfica 17. Se observa que los valores mínimos de Appmar son inferiores a los valores de la resultante del WRF. Además, se evidencia que no hay una tendencia estable.



Gráfica 17. Resultante (Punto 3). Fuente Propia

Punto 4 (10°24'52.2"N 75°37'57.4"W)

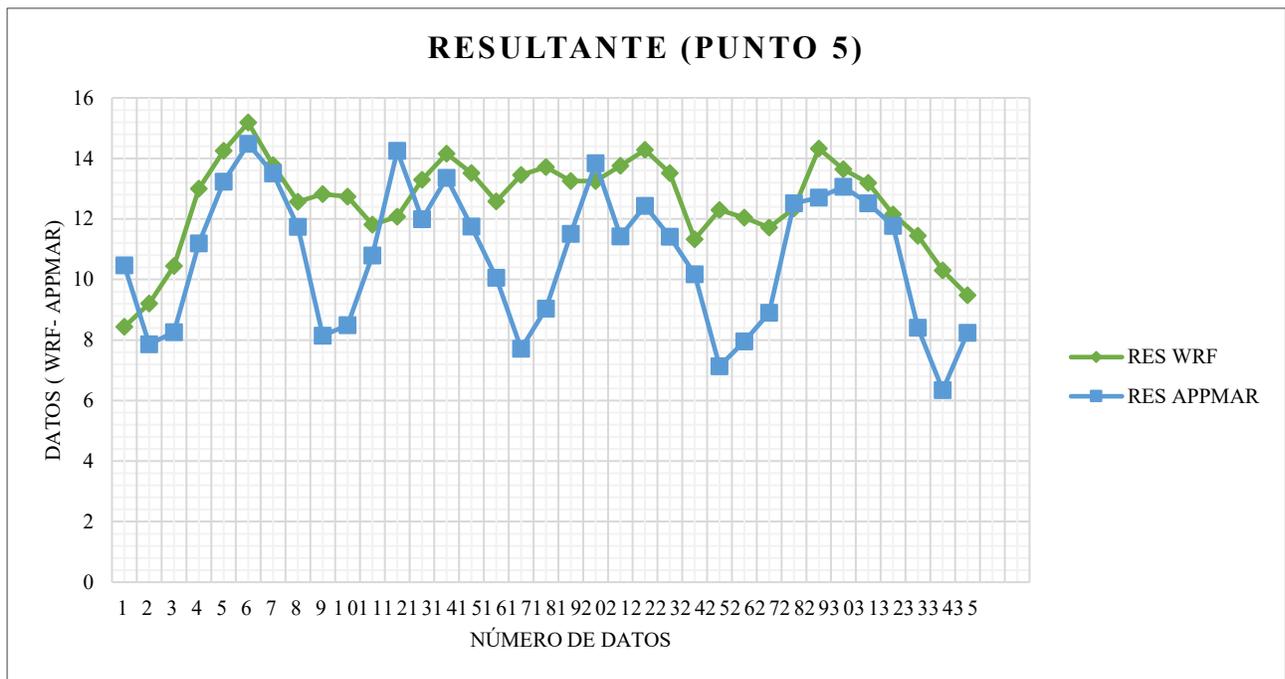
En la Gráfica 18. Se evidencia una tendencia estable en los vientos, pero hay una sobreestimación de los valores máximos en ambas resultantes. Además, su valor inicial y final coinciden.



Gráfica 18. Resultante (Punto 4). Fuente Propia

Punto 5 (10°18'58.8"N 76°11'47.5"W)

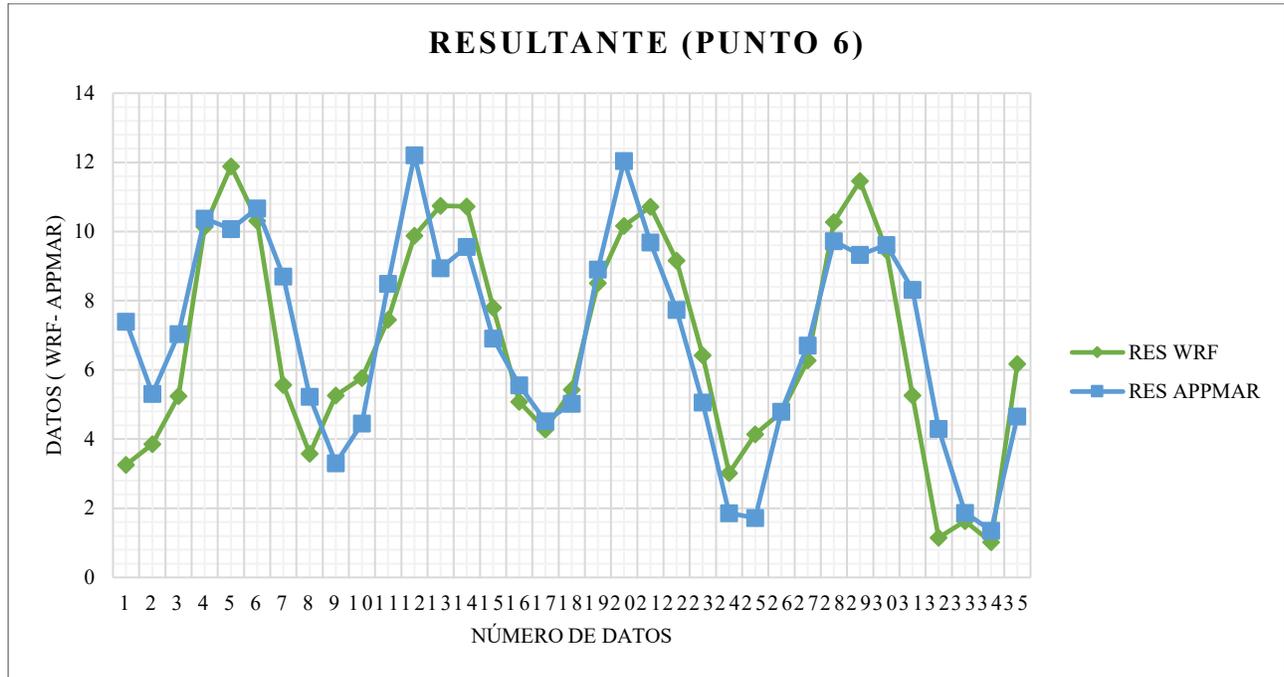
En la Gráfica 19. Se evidencia una tendencia poco pronunciada, estableciendo los valores mínimos en el modelo WRF.



Gráfica 19. Resultante (Punto 5). Fuente Propia

Punto 6 (9°37'25.8"N 76°05'12.1"W)

En la última gráfica de la resultante, se evidencia una tendencia de vientos clara, en donde sus valores máximos no se sobrestiman de igual manera que en las gráficas anteriores.



Gráfica 20. Resultante (Punto 6). Fuente Propia

De acuerdo a las diferentes representaciones de las condiciones atmosféricas obtenidas por el modelo, permite realizar un análisis sobre los límites de confiabilidad e incertidumbre asociada al proceso de la predicción de las variables del viento.

En la siguiente sección se presenta una descripción detallada de este procedimiento para el caso de estudio del evento 2004.

7.4 Métricas para la evaluación del error.

El ejercicio de comparar los resultados provenientes de un modelo numérico contra aquellas mediciones provenientes de la aplicación Appmar 2.0 desarrollada por la Universidad del Norte,

permite realizar una evaluación de confiabilidad de los resultados de las variables (U, V y la resultante).

En el caso de este proyecto de investigación se evalúan los resultados por medio del cálculo de las siguientes métricas de error: error medio absoluto (MAE), BIAS (sesgo), coeficiente de correlación (Cor), error cuadrático medio (RMSE).

La definición particular de las diferentes métricas del error es:

- **Error medio absoluto (MAE):** Calcula la función de error absoluto medio para el pronóstico y los resultados posibles, este error es una medida común del error de pronóstico en análisis de series de tiempo (Mohamad, 2016).

$$MAE = \frac{SAE}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N |F_i - \bar{O}_i|}{N} \quad (1)$$

- **Coefficiente de correlación lineal (Co):** es una función que indica la relación y proporcionalidad que existe entre dos variables cuantitativas. Así el coeficiente evalúa si el comportamiento de ambas variables es similar (un valor de 1) en este coeficiente indica una correlación positiva perfecta, ambas variables crecen y disminuyen con la misma velocidad, por el contrario, si el valor es 0 significa que no existe relación lineal. Por otro lado, si correlación es igual a -1, existe una correlación negativa perfecta, lo que señala que cuando una de las variables aumenta, la otra disminuye en igual proporción (Rodríguez Rincón, 2016).

$$Cor = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F}) * (O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (2)$$

- **BIAS o sesgo:** es la diferencia entre la esperanza matemática del valor pronosticado y el valor observado del parámetro que estima, un estimador cuyo sesgo es nulo se llama insesgado o centrado.

$$BIAS = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i} \quad (3)$$

- **Error cuadrático medio (RMSE):** Calcula la función de raíz del error cuadrático Medio, conocida como desviación media cuadrática (RMSD) (Mohamad, 2016).

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (4)$$

Donde: F: es el valor pronosticado (WRF), O: el valor observado (Appmar), en un tiempo t. Std es la desviación estándar, N: número de datos.

A continuación, se muestra el análisis de las diferentes métricas del error para los 6 puntos de estudio, correspondientes a los resultados arrojados por las variables U y V.

Punto	Coordenada	U-10				V-10			
		Cor	BIAS	RMSE	MAE	Cor	BIAS	RMSE	MAE
1	11°30'49.5"N 73°44'08.2"W	0,028	0,2	3,11	2,7	0,822	0,539	2,16	1,73
2	11°19'49.9"N 74°24'04.5"W	0,701	0,021	2,23	1,96	0,003	0,20	6,40	6,04
3	11°09'07.5"N 74°52'14.8"W	- 0,110	0,052	6,07	5,49	0,346	0,39	3,15	2,85

4	10°24'52.2"N 75°37'57.4"W	0,645	0,155	3,20	2,76	0,667	0,14	3,86	3,43
5	10°18'58.8"N 76°11'47.5"W	0,568	0,508	2,12	1,70	0,714	0,34	1,99	1,58
6	9°37'25.8"N 76°05'12.1"W	0,786	0,351	1,32	1,11	0,850	0,05	1,71	1,43

Tabla 31. Resultados arrojados por la variable (U-V). Fuente Propia

Para el primer caso la variable U, la correlación de los puntos del 1 al 3 no dan un acercamiento correcto, ya que la configuración del modelo sobreestimo los valores máximos, esto se puede evidenciar en los diferentes errores métricos calculados.

Para el segundo caso la variable V, la correlación de los puntos del 2 y 3 no dan un acercamiento correcto, ya que la configuración del modelo sobreestimo los valores máximos, esto se puede evidenciar en los diferentes errores métricos calculados. Para los puntos 5 y 6 se evidencia similitud en el resultado de los datos.

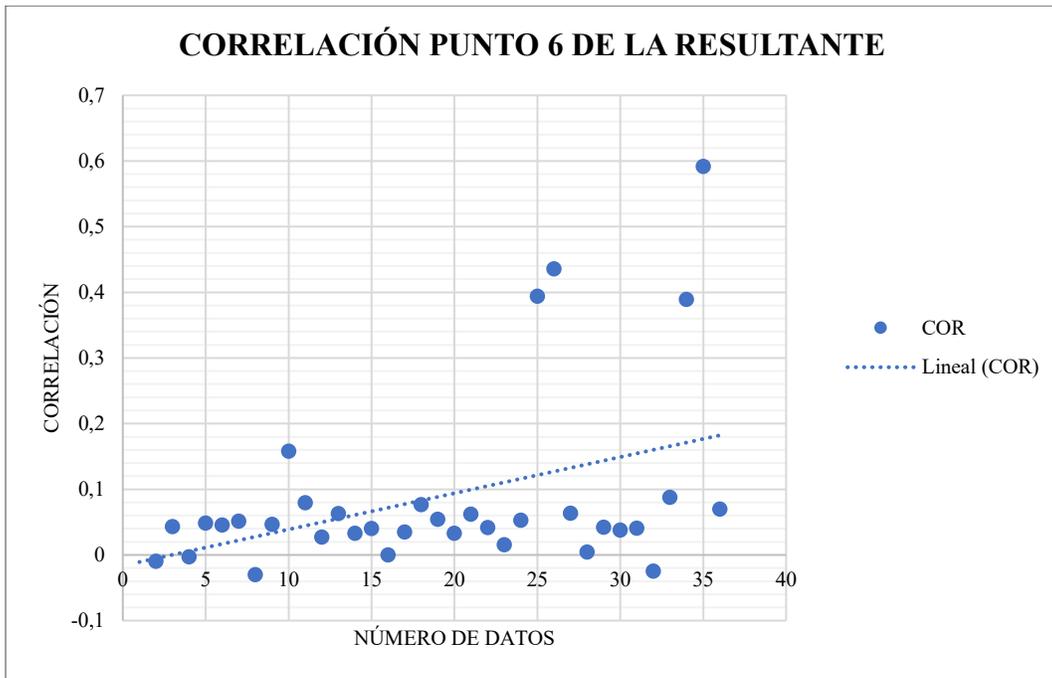
En la Tabla 32 que pertenece a la variable de la resultante entre WRF y Appmar, se evidencia que al igual que las variables anteriormente descritas, existe la correlación en los puntos del 4 al 6 brindando un acercamiento correcto de los datos.

Punto	Coordenada	RESULTANTE WRF – APPMAR			
		Cor	BIAS	RMSE	MAE
1	11°30'49.5"N 73°44'08.2"W	0,132	0,051	3,24	2,80
2	11°19'49.9"N 74°24'04.5"W	-0,199	0,029	6,63	6,21
3	11°09'07.5"N 74°52'14.8"W	-0,048	0,178	6,64	6,07
4	10°24'52.2"N 75°37'57.4"W	0,604	0,047	4,71	4,21
5	10°18'58.8"N 76°11'47.5"W	0,592	0,692	2,55	2,07

6	9°37'25.8"N 76°05'12.1"W	0,849	0,103	1,68	1,36
---	-----------------------------	-------	-------	------	------

Tabla 32. Resultados arrojados por la variable (resultante). Fuente Propia

En los datos de la variable resultante también se pueden verificar que en el punto 6 fue el que tuvo un mayor acercamiento correcto, generando una tendencia en el viento, como se puede ver en la Gráfica 21.



Gráfica 21. Correlación punto 6 de la resultante. Fuente Propia

7.5 Implicaciones en la zona costera debido a los eventos meteorológicos.

De acuerdo a la investigación realizada se pudo determinar que en la zona costera se han generado un gran número de eventos meteorológicos, que año tras año han presentado diferentes daños especialmente en la infraestructura urbana ocasionando casas destechadas, grietas en las paredes, muros caídos, incendios y ruptura de ventanales, entre otros.

Debido a que estos fenómenos se producen en las diferentes épocas del año, a causa de la variedad en la velocidad y/o dirección del viento, de manera que en el transcurso de los años se han presentado diferentes eventos meteorológicos como se evidencia en la siguiente Tabla 33.

Año	Fenómeno	Causa
14 y 15 de enero de 2014	Frente frío con viento de hasta 25 y 30 nudos.	Incremento en altura de ola, además de daños en residencias urbanas con desprendimiento de cubiertas.
28 de marzo de 2015	Frente frío con viento de hasta de 20 nudos.	Presencia de marejada e incremento en la altura de ola
29, 30 y 31 de diciembre de 2016	Frente frío aumento significativo de la velocidad del viento.	Este frente frío no afectó la infraestructura.
19 de agosto de 2017	Tormenta tropical.	Incremento de lluvias, inundaciones, daños en cubiertas.
14 de enero de 2018	Frente frío con vientos hasta de 25 nudos.	Afectaciones leves a embarcaciones, desprendimiento de cubiertas en viviendas e inundaciones.
26 y 27 de mayo de 2018	Tormenta tropical con vientos hasta de 34 nudos.	
24 de diciembre de 2019	Frente frío con vientos entre los 20 y 30 nudos	Incremento de lluvias, inundaciones, daños en cubiertas.

Tabla 33. Daños debido a los eventos meteorológicos del 2014 al 2019. Fuente Propia

Actualmente la zona costera se está viendo afectada por el huracán llamado “Iota” de categoría 5 el cual transita por el mar Caribe ubicándose sobre los 13.3°N 78.8°W, con una presión mínima de 978 mbar y vientos de 80 nudos (148 km/h) con ráfagas de 90 nudos (167 km/h) (CIOH, 2020).

Por otra parte, Iota se encuentra tomando la condición del tiempo con una fuerte intensidad de lluvias sobre la cuenca. Por lo tanto las bandas de este sistema generan una alta precipitación a lo largo del centro del litoral Caribe colombiano (CIOH, 2020). Se pueden identificar vientos de dirección este y noreste sobre el este de la cuenca Caribe, con velocidades de 20 a 25 nudos.

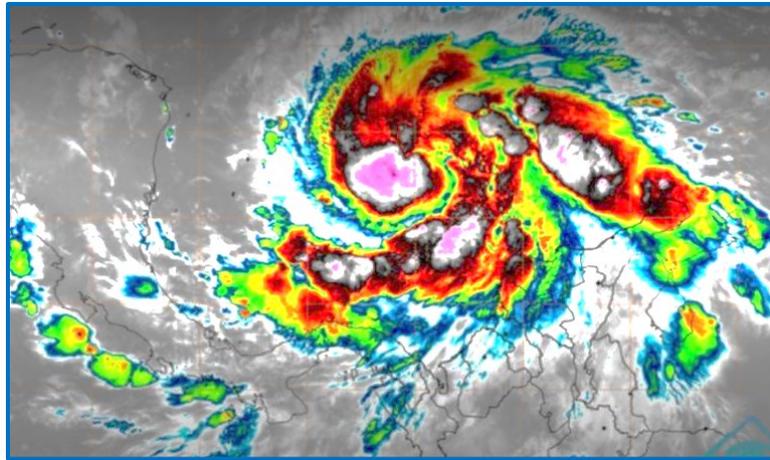


Figura 40. Huracan ETA categoría 5. Fuente: (CIOH, 2020)

Al paso por la tormenta tropical Iota se evidencian diferentes afectaciones por las fuertes lluvias, se vieron afectadas más de mil viviendas por los desbordamientos de arroyos y fuertes vientos que generaron tormentas eléctricas, daños estructurales en las estructuras metálicas y viviendas (Infobae, 2020).

Los habitantes del archipiélago de San Andrés y Providencia han sido los más afectados, dejando al menos 8,000 personas damnificadas a causa de las inundaciones y deslizamientos causados por las fuertes e intensas lluvias.



Figura 41. Daños en San Andrés Isla. Fuente: (Infobae, 2020)

Las olas y fuertes vientos han golpeado principalmente el suroeste del Archipiélago. El sector que presentó mayor afectación fue el Hoyo Soplador, donde además de restaurantes y negocios, 21 personas que habitaban en la zona fueron evacuadas. Esto dejó unos 3.000 millones de pesos en pérdidas y 40 familias afectadas por el clima (El Tiempo, 2020). En la Figura 42 se puede ver los daños causados por el huracán Iota.



Figura 42. Daños en San Andrés y Providencia por el huracán Iota. Fuente: (Jiménez, 2020)

8 Conclusiones

El trabajo de investigación consistió en el desarrollo de análisis de un evento de vientos extremos en el Caribe Colombiano; la metodología utilizada tiene la base en la modelación numérica a mesoescala para la validación de los datos del viento, a través del modelo numérico WRF. Con el objetivo que provean datos más confiables y útiles para el estudio de los vientos extremos de la zona caribe colombiana. Todo el proceso de modelación incluyó la validación del modelo a través de datos de la NOAA.

La metodología utilizada se compone de un modelo de predicción numérica del tiempo de mesoescala, el cual se aplica para representar el evento meteorológico extremo del año 2004 que por su gran impacto generó diferentes afectaciones a causa de los fuertes vientos en la zona costera. Esto ofrece la oportunidad de evaluar los vientos extremos provocados por los diferentes eventos meteorológicos a gran escala (frente frío). El uso de la modelación meteorológica a mesoescala permite tener una percepción más amplia sobre los resultados del modelo y generar una escala más fina de las rachas viento (Rodríguez Rincón, 2016).

A partir del estudio realizado en la zona costera y los datos validados se pudo determinar que el año 2004 fue donde se presentó la mayor cantidad de eventos meteorológicos afectando esta población. Por ese motivo se decidió realizar un análisis entre los datos obtenidos por la modelación WRF y la aplicación Appmar 2.0.

Una vez realizada la modelación por el WRF se procedió a realizar la verificación de las salidas del modelo, comparando las variables U_{10} , V_{10} , y la resultante.

El comparativo entre los datos obtenidos por la modelación y la aplicación Appmar, se realiza en 6 puntos de la zona de estudio. De los resultados se puede determinar que hay una sobreestimación de los valores máximos; al parecer el modelo reproduce muy bien la distribución temporal, pero no muy bien los valores máximos. En consecuencia, la tendencia de los vientos se produce de forma adecuada.

La evaluación de los datos anteriormente descritos, se lleva a cabo a través de la estimación de los índices de acierto, el cual consiste en definir como se propaga el error. Por lo tanto, se seleccionaron métricas que permiten una comparación directa de sus valores en cada una de las etapas generando unos límites de confianza, que determinan la mejor aceptación del fenómeno. Dentro de las métricas valoradas se determinaron la Cor, MAE, RMSE, BIAS para cada punto, teniendo en cuenta las variables U_{10} , V_{10} y la resultante.

Según la comparación de los resultados el modelo tiene una buena correlación. Además, se puede decir que cerca a la costa el modelo arroja buenos resultados, por lo tanto, es factible utilizar todos estos resultados en toda la costa y no solamente para los puntos estudiados.

Este tipo de estudios sirven para analizar los diferentes fenómenos meteorológicos presentados en la zona costera, debido a que los datos obtenidos por el modelo WRF sirven para la construcción de (Puentes, edificios, estructuras marítimas, etc.).

9 Referencias

- Alejandro, D., & Sarrazola, R. (2015). *Metodología para simular la dinámica marina en el Mar Caribe usando DELFT3D* [Universidad EAFIT].
<https://core.ac.uk/download/pdf/47250593.pdf>
- Aragón, G., Torres, C., Lomas, G., Arango, C., Gomez, D., Suárez, D., León, G., & Muñoz, A. (2012). Validación Del Modelo De Pronóstico Numérico Wrf Para Su Uso Operativo En La Universidad Nacional De Colombia. *Foreign Affairs*, 91(5), 1689–1699.
- Arango, C., & Ruiz, J. F. (2011). Implementación del modelo WRF para la sabana de Bogotá. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*, 16.
http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21132/Modelo_WRF_Bogota.pdf/fld34638-e9f8-4689-b5f4-31957c231c46
- Bastidas Salamanca, M., & Ricaute Villota, C. (2017). Regionalización oceanográfica, una visión dinámica del Caribe. In *Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives De Andrés (INVEMAR). Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR # 14*.
http://www.invemar.org.co/documents/10182/14479/regionalizacion_oceanografica_baja.pdf
- Bitesize. (2020). *Circulación atmosférica global*. GCSE Edexcel.
<https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/zpykxsg/revision/1>
- Cabeza Durango, L., Castro Mercado, I. F., Gaitán, S., Otero Díaz, L., & Uribe Alzate, E. (2009). SEGUIMIENTO DE LAS CONDICIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS EN EL CARIBE COLOMBIANO 2009. In *CIOH*.
https://www.google.com/search?q=SEGUIMIENTO+DE+LAS+CONDICIONES+METEOROLÓGICAS+Y+OCEANOGRÁFICAS+EN+EL+CARIBE+COLOMBIANO+2009&rlz=1C1CHBF_esCO910CO910&oq=SEGUIMIENTO+DE+LAS+CONDICIONES+METEOROLÓGICAS+Y+OCEANOGRÁFICAS+EN+EL+CARIBE+COLOMBIANO+2009&aqs=chrome
- Cannon, F., Carvalho, L. M. V., Jones, C., Hall, T., Gomberg, D., Dumas, J., & Jackson, M. (2017). WRF simulation of downslope wind events in coastal Santa Barbara County. *Atmospheric Research*, 191, 57–73. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.03.010>
- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M., & Silva Santos, C. (2014). Comparison of reanalyzed, analyzed, satellite-retrieved and NWP modelled winds with buoy data along the Iberian Peninsula coast. *Remote Sensing of Environment*, 152, 480–492.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.017>
- Carvalho, David, Rocha, A., Gómez-Gesteira, M., & Santos, C. (2012). A sensitivity study of the WRF model in wind simulation for an area of high wind energy. *Environmental Modelling and Software*, 33, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.01.019>
- Castaño Sánchez, M. (2011). “ *Sistema De Monitorización Y Generación De Energía Undimotriz* .” 120. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12799/Memoria.pdf>

-
- Centre, T. H. (n.d.). The Hadley Centre regional climate modelling system PRECIS Providing Regional Climates for Impacts Studies. *Carbon*, 3.
- CEUPE. (2020). *¿Qué es la circulación atmosférica?* Universidad de Alcalá. <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-circulacion-atmosferica.html>
- CIOH. (2004). BOLETÍN METEOMARINO DEL CARIBE COLOMBIANO No.107-MARZO 2004. In *Centro de Pronosticos metereologicos y oceanograficos*. https://www.cioh.org.co/dev/proserv/boletines/2004/BOL_MAR_04.pdf
- CIOH. (2005). SEGUIMIENTO DE LAS CONDICIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS EN EL CARIBE COLOMBIANO 2005. In *CIOH*. <http://www.cioh.org.co/meteorologia/pdfcaracterizacion/consultacaracterizacion.php?year=2006>
- CIOH. (2006). SEGUIMIENTO DE LAS CONDICIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS EN EL CARIBE COLOMBIANO. In *CIOH*. <http://www.cioh.org.co/meteorologia/pdfcaracterizacion/consultacaracterizacion.php?year=2006>
- CIOH. (2020). *PRONÓSTICO DE LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS Y OCEANOGRÁFICAS*. Situación Sinoptica Tiempo Presente Del 2020-11-15. <https://www.cioh.org.co/meteorologia/PreCaAltamar.php>
- Cordex WRF. (2020). *Variables de salida WRF Wiki*. <http://www.meteo.unican.es/wiki/cordexwrf/OutputVariables>
- Daniel, I., Higgins, A., Ayala, C., Martinez, P., Tigreros, P., & Muñoz, A. (2015). Caracterización del Régimen del Viento y el Oleaje en el Litoral del Departamento del Atlántico, Colombia. *Boletín Científico CIOH*, 231–244. <https://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/ResumenBarranquilla4.php>
- Darrera. (2019). *Boya de Oleaje*. Darrera. <https://www.darrera.com/wp/es/producto/3r-edb100-boya-oleaje/>
- Di, Z., Ao, J., Duan, Q., Wang, J., Gong, W., Shen, C., Gan, Y., & Liu, Z. (2019). Improving WRF model turbine-height wind-speed forecasting using a surrogate-based automatic optimization method. *Atmospheric Research*, 226, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.04.011>
- Díaz et al. (2017). *Modelado y simulación de sistemas naturales*. <https://www.utadeo.edu.co/es/publicacion/libro/editorial/235/modelado-y-simulacion-de-sistemas-naturales>
- Dong, H., Cao, S., Takemi, T., & Ge, Y. (2018). WRF simulation of surface wind in high latitudes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 179, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.06.009>
- El Heraldo. (2020, September 7). *Vientos causan destrozos en viviendas del sur de Córdoba* | *El Heraldo*. <https://www.elheraldo.co/cordoba/vientos-causan-destrozos-en-viviendas-del-sur-de-cordoba->

756812?utm_source=ELHERALDO&utm_medium=articulo&utm_campaign=recirculacion
&utm_term=mas-de-temas-tratados

- El Tiempo. (2020). *Reabrió su negocio tras cuarentena en San Andrés y huracán se lo llevó*.
<https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/damnificados-por-huracan-eta-en-san-andres-y-providencia-547362>
- Emmert, J. T., Drob, D. P., Shepherd, G. G., Hernandez, G., Jarvis, M. J., Meriwether, J. W., Niciejewski, R. J., Sipler, D. P., & Tepley, C. A. (2008). DWM07 global empirical model of upper thermospheric storm-induced disturbance winds. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113(A11), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2008JA013541>
- Energy data. (2020). *Global Wind Atlas*. <https://globalwindatlas.info/en/about/ReleaseNotes>
- Gholami, S., Ghader, S., Khaleghi-Zavareh, H., & Ghafarian, P. (2021). Sensitivity of WRF-simulated 10 m wind over the Persian Gulf to different boundary conditions and PBL parameterization schemes. *Atmospheric Research*, 247(July 2020), 105147.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105147>
- Gómez Reali, M. Á. (2013). *REHABILITACIÓN Y ADECUACIONES DE UNA BOYA OCEANOGRÁFICA* [Universidad Nacional Autónoma de México].
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/6350/1/tesis.pdf>
- González-Alonso de Linaje, N., Mattar, C., & Borvarán, D. (2019). Quantifying the wind energy potential differences using different WRF initial conditions on Mediterranean coast of Chile. *Energy*, 188, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116027>
- Hedin, A. E., Biondi, M. A., Burnside, R. G., Hernandez, G., Johnson, R. M., Killeen, T. L., Mazaudier, C., Meriwether, J. W., Salah, J. E., Sica, R. J., Smith, R. W., Spencer, N. W., Wickwar, V. B., & Viridi, T. S. (1991). Revised global model of thermosphere winds using satellite and ground-based observations. *Journal of Geophysical Research*, 96(A5), 7657.
<https://doi.org/10.1029/91ja00251>
- Holland, G. J. (1980). An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Monthly Weather Review*, 108(8), 1212–1218. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1212:AAMOTW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1212:AAMOTW>2.0.CO;2)
- IDEAM. (2014). *Pronóstico de lluvia con el modelo WRF*.
<http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/wrf/semanal18/h07.html>
- IDEAM. (2015). *Tablas de frecuencias de viento*. IDEAM.
<http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Tablas-de-Frecuencias---Viento.pdf>
- IDEAM. (2020). *Atlas Interactivo - Vientos - IDEAM*. Atlas de Viento de Colombia.
<http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>
- Infobae. (2020). *Iván Duque evalúa los daños del huracán Eta en San Andrés*.
<https://www.infobae.com/america/colombia/2020/11/09/ivan-duque-evalua-los-danos-del-huracan-eta-en-san-andres/>
- Invemar. (2008). Diagnóstico de la erosión en la Zona Costera del Caribe Colombiano. *INVEVAR, Serie de Publicaciones Especiales*, 13, 1–124.

-
- Jiménez, L. (2020). *Iota deja devastación a su paso*. El Heraldo.
<https://www.elheraldo.co/region-caribe/iota-deja-devastacion-su-paso-773239>
- Jung, C., & Schindler, D. (2020). Integration of small-scale surface properties in a new high resolution global wind speed model. *Energy Conversion and Management*, 210, 112733.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112733>
- Kibona, T. E. (2020a). Application of WRF mesoscale model for prediction of wind energy resources in Tanzania. *Scientific African*, 7, e00302.
<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00302>
- Kibona, T. E. (2020b). Application of WRF mesoscale model for prediction of wind energy resources in Tanzania. *Scientific African*, 7, e00302.
<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00302>
- Komen, G. J., L. Cavaleri, M. D., Hasselmann, K., Hasselmann, S., & Janssen, P. A. E. M. (1994). Dynamics and Modelling of Ocean Waves. *Cambridge University Press*, 532.
<https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/wavewatch.shtml>
- Liston, G. E., & Pielke, R. A. (2001). A climate version of the regional atmospheric modeling system. *Theoretical and Applied Climatology*, 68(3–4), 155–173.
<https://doi.org/10.1007/s007040170043>
- Ltda, G., & Volumen, C. (2005). *VOLUMEN 2 : Meteorología e Información Hidrológica*.
- Lumen. (2020). *Circulaciones atmosféricas globales*. Geografía Física.
<https://courses.lumenlearning.com/geophysical/chapter/global-atmospheric-circulations/>
- Luo, W., Taylor, M. C., & Parker, S. R. (2008). A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales. *International Journal of Climatology*, 28(7), 947–959.
<https://doi.org/10.1002/joc.1583>
- Márquez Pérez, C. I. (2018). *Inicio de temporadas de huracanes*.
http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Circulares/Circular_033_mayo_17_de_2018-Inicio_Temporada_de_Huracanes.PDF
- Matamoros, N. De, Matamoros, D., Houston, N. De, & Matamoros, N. De. (2001). *Ciclón Tropical Allison*. 1–3.
- McAllister, M. L., & van Den Bremer, T. S. (2020). Experimental study of the statistical properties of directionally spread ocean waves measured by Buoys. *Journal of Physical Oceanography*, 50(2), 399–414. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-19-0228.1>
- McSweeney, C. F., Jones, R. G., & Booth, B. B. B. (2012). Selecting Ensemble Members to Provide Regional Climate Change Information. *Journal of Climate*, 25(20), 7100–7121.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00526.1>
- Mitrani Arenal, I., Martínez Castro, D., Alonso Díaz, Y., Arenal, I. M., Casablanca, L. De, & Habana, L. (2012). Aplicación de los modelos WRF y WW3 en el pronóstico de los elementos de ola al paso de huracanes por la costa occidental de la República de México. *Revista Cubana de Meteorología*, 18(1), 70–82.

-
- <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/48/46>
- Mohamad. (2016, August 26). *MAE (Error medio absoluto)*.
<https://support.numxl.com/hc/es/articles/215969423-MAE-Error-medio-absoluto>
- NOOA. (2020). *MMAB Operational Wave Models*. National Weather Service.
<https://polar.ncep.noaa.gov/waves/>
- Oas. (2000). *Capítulo 12. Peligros de huracanes*. Manual Sobre El Manejo de Peligros Naturales En La Planificación Para El Desarrollo Regional Integrado.
<https://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea65s/ch17.htm#3>. características peligrosas de los huracanes
- Olaofe, Z. O. (2019). Quantification of the near-surface wind conditions of the African coast: A comparative approach (satellite, NCEP CFSR and WRF-based). *Energy*, 189, 1–20.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116232>
- Osorio, A. F., Mesa, J. C., Bernal, G. R., & Montoya, R. D. (2009). Reconstrucción de cuarenta años de datos de oleaje en el mar Caribe colombiano empleando el modelo WWIIITM y diferentes fuentes de datos. *Boletín Científico CIOH*, 56(27), 37–56.
<https://doi.org/10.26640/22159045.200>
- Ospina Vallejo, H., Soltau Ospina, J. M., & Torres Parra, R. R. (2007). SEGUIMIENTO DE LAS CONDICIONES OCEANOGRÁFICAS Y METEOROLÓGICAS EN EL CARIBE COLOMBIANO 2007. In *CIOH*.
<http://www.cioh.org.co/meteorologia/pdfcaracterizacion/consultacaracterizacion.php?year=2007>
- Posada Jaramillo, F. (2019). *Modelo hidrodinámico y de oleaje del mar caribe : DELFT Caribe* [Universidad EAFIT]. <http://hdl.handle.net/10784/15693>
- Rodríguez Rincón, J. P. R. (2016). *Estimación Probabilística de Mapas de Inundación: Una Metodología Basada en Ensamblés* [Universidad Nacional Autónoma de México].
<http://www.cchazc.unam.mx/wp-content/uploads/2013/03/GuiaIngles2.pdf>
- Ruiz Murcia, J. F., Serna Cuenca, J., & Zapata Lesmes, H. J. (2017). Atlas de Viento de Colombia. *Ideam-Upme*, 1, 1–158.
- Skamarock, W.C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Zhiquan, L., Berner, J., Wang, W., Powers, J. G., Duda, M. G., Barker, D. M., & Huang, X.-Y. (2019). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. *NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR*, 145. <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>
- Skamarock, William C, Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., & Powers, J. G. (2008). *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*.
- Skamarock, William C, Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., & Powers, J. G. (2005). *A Description of the Advanced Research WRF Version 2*.
<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a487419.pdf>
- Soto, D., & Quiñones, R. (2013). *Cambio climático, pesca y acuicultura en América Latina*.

<http://www.fao.org/docrep/018/i3356s/i3356s.pdf>

- Tolman, H. L. (1989). The numerical model WAVEWATCH: a third generation model for the hindcasting of wind waves on tides in shelf seas. *The Numerical Model WAVEWATCH: A Third Generation Model for the Hindcasting of Wind Waves on Tides in Shelf Seas.*, 72–89.
- Tolman, H. L. (1991a). A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents. *J. Phys. Oceanogr.*, 766–781.
<https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/wavewatch.shtml>
- Tolman, H. L. (1991b). Effects of tides and storm surges on North Sea wind waves. *J. Phys. Oceanogr.*, 766–781. <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/wavewatch.shtml>
- Tolman, H. L., & Chalikov, D. (1996). Source terms in a third-generation wind wave model. *Journal of Physical Oceanography*, 26(11), 2497–2518. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1996\)026<2497:STIATG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026<2497:STIATG>2.0.CO;2)
- Torres Ferrada, P., & Ávila Momberg, R. (2014). *Sistema de pronóstico del tiempo en base a modelo atmosférico WRF implementado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción mediante dispositivos móviles para la Región del Biobío* [Biobío, Chile]. <http://repositorio.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/802>
- Torres Parra, R. R., & Lonin, S. (2007). Estudio del espectro de oleaje en el Caribe observado con boyas y su representación en el espectro JONSWAP. *Boletín Científico CIOH*, 18(25), 8–18. <https://doi.org/10.26640/22159045.158>
- UCAR. (2020a). *Análisis troposférico global del modelo operativo FNL del NCEP, a partir de julio de 1999*. Research Data Archive . <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>
- UCAR. (2020b). *Conceptos básicos del modelo ARW*. WRF-ARW Online Tutorial. <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Basics/index.php>
- Vickery, P. J., Skerlj, P. F., Steckley, A. C., & Twisdale, L. A. (2000). Hurricane Wind Field Model for Use in Hurricane Simulations. *Journal of Structural Engineering*, 126(10), 1203–1221. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:10\(1203\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:10(1203))
- WAMDIG. (1988). The WAM model - A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18, 1775–1810.
<https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/wavewatch.shtml>
- Wang, C., Qian, Y., Duan, Q., Huang, M., Berg, L. K., & Shin, H. H. (2020). Assessing the sensitivity of land-atmosphere coupling strength to boundary and surface layer parameters in the WRF model over Amazon. *Atmospheric Research*, 234(October 2019), 104738.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104738>
- WRF. (2020, August 13). *WRF Datos gratuitos*. WRF USERS PAGE.
https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/free_data.html
- Wu, W. C., Wang, T., Yang, Z., & García-Medina, G. (2020). Development and validation of a high-resolution regional wave hindcast model for U.S. West Coast wave resource characterization. *Renewable Energy*, 152, 736–753.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.077>

Zhao, J., Guo, Y., Xiao, X., Wang, J., Chi, D., & Guo, Z. (2017). Multi-step wind speed and power forecasts based on a WRF simulation and an optimized association method. *Applied Energy*, 197, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.017>