



**EFFECTOS DEL PASO DEL HURACÁN MATTHEW (2016) SOBRE LA ESTABILIDAD
DE LOS PASTOS MARINOS EN URIBIA (LA GUAJIRA)**

Jessica María Agudelo Marín

Gloria Sofía Vela Castillo

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniera Ambiental

Asesora

Paola Andrea Arias Gómez, Ph.D

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	(Agudelo Marín & Vela Castillo, 2024)
Referencia	Agudelo Marín, J., & Vela Castillo, S. (2024). Efectos del paso del huracán Matthew (2016) sobre la estabilidad de los pastos marinos en Uribia, La Guajira.
Estilo APA 7 (2020)	[Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Jessica Agudelo Marín

Dedico este Trabajo de Grado a mis tíos y mi prima Maruja, fuente de apoyo y motivación.

A mi madre, la persona más luchadora y fuerte que puedo conocer, que con sus virtudes me inspira a avanzar.

A mis abuelos que desde el cielo son la luz que me fortalece para continuar.

A mi pareja Juan Pablo, por caminar conmigo, brindarme su amor, apoyo y motivación hasta en las adversidades.

A Zaira, Niño y Pecas, mis mascotas, seres pacientes que son y serán mi descanso mental, para poder continuar.

A Vela, mi compañera, por ser cómplice de risas, enojos y alegrías y por brindarme su confianza para encaminarnos en la construcción de este sendero de aprendizaje.

Sofía Vela Castillo

Dedico este Trabajo de Grado a mis padres Blanquita y Joaquito, su guía y paciencia me han impulsado a superar cada adversidad.

A mi hermano Gustavo, por su apoyo y amor incondicional y a mi hermana Alejandra, por ser mi refugio, esa lucecita en mi camino, mi mayor fuente de motivación y fortaleza.

A Morita por enseñarme sin palabras y acompañarme en esas largas noches y madrugadas.

A Jess, mi compañera, por crecer y creer junto a mí.

Agradecimientos

Le expresamos nuestro sincero agradecimiento a las entidades y personas que hicieron posible la realización de este Trabajo de Grado.

En primer lugar, agradecemos a nuestra profesora y asesora, Paola Andrea Arias, por su ayuda y orientación a lo largo de este Trabajo de Grado y en general de nuestro proceso universitario. Su dedicación, apoyo constante y amor por su labor, han sido esenciales para superar nuestros desafíos y alcanzar los objetivos planteados.

Asimismo, nos gustaría extender nuestra gratitud al Jefe de Laboratorio de Servicios de Información LABSIS e INVEMAR (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras), cuya valiosa información y apoyo técnico fueron fundamentales para el desarrollo de este estudio.

Expresamos nuestro profundo agradecimiento a la Universidad de Antioquia, nuestra alma mater, por el invaluable apoyo y la formación recibida a lo largo de nuestra carrera.

Agradecemos sinceramente a los profesores y personal académico de la Universidad por su dedicación, excelencia académica y guía durante todo nuestro proceso de formación. Su orientación, conocimientos y estímulo han sido esenciales al proporcionar un entorno propicio para nuestro aprendizaje y desarrollo académico.

Finalmente, a todos quienes hicieron parte de este proceso, Gracias.

“La felicidad solo es real cuando es compartida” (McCandless C.)

Contenido

Resumen	12
Abstract	13
Introducción	14
Antecedentes	16
Justificación.....	18
Objetivos	20
Objetivo general	20
Objetivos específicos.....	20
Marco teórico	21
Temporada de ciclones tropicales en el Mar Caribe	21
Características de la región de estudio	21
Paso del huracán Matthew por Colombia	22
Relación de la actividad ciclónica con el arrastre de pastos marinos.....	23
Metodología	25
Área de estudio.....	25
Reanálisis ERA5	25
Información in situ	26
Parámetros fisicoquímicos	28
Distribución de praderas de pastos marinos	28

Densidad y cobertura de las praderas marinas.....	31
Resultados y Discusiones	33
Caracterización del recorrido del huracán Matthew.....	33
Datos del reanálisis ERA5	33
Datos de boyas in situ	38
Análisis de datos de calidad del agua in situ	44
Análisis de la distribución de los pastos marinos en Uribia.....	47
Descripción de cuadrantes	48
Densidad y cobertura de las praderas marinas.....	51
Relación entre el paso del huracán Matthew y los pastos marinos	53
Conclusiones	55
Referencias	57
Anexos.....	61

Lista de tablas

Tabla 1. Variables meteorológicas, oceánicas y fisicoquímicas analizadas.....	26
--	----

Lista de figuras

Figura 1. Trayectoria del huracán Matthew (2016). Fuente: NASA/JAXA, Hal Pierce.	22
Figura 2. Ubicación de las estaciones in situ empleadas para la comparación con las estimaciones del reanálisis ERA5.	27
Figura 3. Cuadrantes delimitados para la interpretación de imágenes satelitales.	30
Figura 4. División de transectos.	32
Figura 5. Variables meteorológicas y oceanográficas durante el 29 de septiembre de 2016 según registros del reanálisis ERA 5: a) cortante vertical del viento entre 200hPa y 850hPa, b) temperatura a 2 metros, y c) presión media a nivel del mar.	34
Figura 6. Variables meteorológicas y oceanográficas durante el 1 de octubre de 2016 según registros del reanálisis ERA5: a) presión superficial, b) precipitación total, c) altura de la ola, y d) velocidad y dirección del viento a 850hPa.	35
Figura 7. Variables meteorológicas y oceanográficas durante el 2 de octubre de 2016 según el reanálisis climático ERA5: a) precipitación total, b) radiación neta superficial de onda corta, y c) temperatura superficial del mar.	37
Figura 8. Series de tiempo de temperatura a 2 metros, velocidad del viento a 850 hPa y presión superficial durante el 29 de septiembre y el 4 de octubre de 2016, según los registros de la-boya Puerto Bolívar (línea negra) y el reanálisis ERA5 (línea roja).	39
Figura 9. Series de tiempo de radiación solar de onda corta, precipitación total, temperatura a 2 metros, velocidad del viento a 850 hPa y presión superficial durante el 29 de septiembre y el 4 de octubre de 2016, según los registros de la boya Ballenas (línea negra) y el reanálisis ERA5 (línea roja).	40
Figura 10. Series de tiempo de temperatura superficial del mar, altura máxima de la ola, temperatura a 2 metros, velocidad del viento a 850 hPa y presión superficial durante el 29 de	

septiembre y el 4 de octubre de 2016, según los registros de la boya Caribe Central (línea negra) y el reanálisis ERA5 (línea roja).42

Figura 11. Series de tiempo de pH, oxígeno disuelto y salinidad durante el periodo abril 2016 - diciembre 2016, según el reporte de REDCAM para el año 2016.45

Figura 12. Comparación de áreas delimitadas de pastos marinos antes y después del huracán Matthew 2016 (Uribia - La Guajira).49

Figura 13. Observación de manchas de pastos marinos demarcada desde imágenes satelitales para a) cuadrante 3 (Bahía Portete), b) cuadrante 4 (Bahía Hondita) y c) cuadrante 5 (Bahía Cocinetas).50

Figura 14. Serie de tiempo de densidad y cobertura de *Thalassia testudinum* para dos periodos anteriores al paso de Matthew (mayo y agosto de 2016) y dos periodos posteriores (agosto 2017 y septiembre 2018).52

Lista de Anexos

Figura A. 1. Altura máxima de la ola entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA 5.	61
Figura A. 2. Presión media a nivel del mar entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA 5.	62
Figura A. 3. Radiación media de onda larga saliente entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA 5.	63
Figura A. 4. Presión superficial entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA 5.	64
Figura A. 5. Radiación (solar) neta superficial de onda corta entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA 5.	65
Figura A. 6. Temperatura superficial del mar entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA 5.	66
Figura A. 7. Temperatura a 2 metros entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA 5.	67
Figura A. 8. Precipitación total entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA 5.	68
Figura A. 9. Cortante vertical del viento (200-850 hPa) entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA 5.	69
Figura A. 10. Velocidad del viento a 850 hPa entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA 5.	70
Figura A. 11. Comparativa de la distribución de pastos marinos por el paso del huracán Matthew, cuadrante 1.	71

Figura A. 12. Comparativa de la distribución de pastos marinos por el paso del huracán Matthew, cuadrante 2.	72
Figura A. 13. Comparativa de la distribución de pastos marinos por el paso del huracán Matthew, cuadrante 5.	73
Figura A. 14. Comparativa de la distribución de pastos marinos por el paso del huracán Matthew, cuadrante 6.	74
Figura A. 15. Póster Jornada de Prácticas Académicas	75

Siglas, acrónimos y abreviaturas

DIMAR	Dirección General Marítima
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia
INVEMAR	Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
NHC	Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos
NOAA	Administración Nacional del Océano y la Atmósfera de Estados Unidos
REDCAM	Red de Vigilancia para la Conservación y Protección de las Aguas Marinas y Costeras de Colombia
UdeA	Universidad de Antioquia

Resumen

El huracán Matthew se formó como una depresión tropical y posteriormente evolucionó a huracán categoría 5 en el Mar Caribe, durante el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016. A su paso, varias ciudades costeras del Caribe colombiano sufrieron sus efectos, causando daños significativos en ecosistemas aledaños como pastos marinos, principalmente en el departamento de La Guajira. Por consiguiente, este Trabajo de Grado se centra en este caso como ejemplo de amenaza reciente de los pastos marinos de Uribia (La Guajira) debido a huracanes. Lo anterior se realizó por medio de la comparación entre variables meteorológicas-oceanográficas estimadas mediante el reanálisis climático ERA5 y observaciones in situ, además del estudio de los cambios fisicoquímicos en la calidad del agua proveniente de mediciones in situ y de imágenes satelitales Landsat (Sensor OLI). Posteriormente, se identificó el cambio de las variables de interés durante el recorrido del huracán y se analizaron las alteraciones causadas sobre estas. Por último, se planteó una relación entre los cambios asociados al huracán y la transformación del ecosistema de pastos marinos, incluyendo su relación con las variables fisicoquímicas del agua durante el periodo de interés. Los resultados de este Trabajo de Grado argumentan la importancia de desarrollar planes orientados a la restauración de estos ecosistemas, ya que La Guajira cuenta con altos índices de pobreza y con la presencia de comunidades indígenas especialmente vulnerables a los desastres debidos a fenómenos meteorológicos y climáticos, en adición al impacto a causa de la dinámica antrópica en la zona.

Palabras clave: Huracán Matthew, pastos marinos, área protegida, imágenes satelitales, conservación.

Abstract

Hurricane Matthew formed as a tropical depression, evolving into a Category 5 hurricane in the Caribbean Sea, between September 28 and October 9, 2016. Along its path, several coastal cities in the Colombian Caribbean region experienced its effects, causing significant damage to adjacent ecosystems such as seagrasses, mainly in the department of La Guajira. Therefore, this Thesis focuses on this case as an example of a recent threat to the seagrasses of Uribia (La Guajira) due to hurricanes. This was carried out by comparing meteorological-oceanographic variables estimated through the ERA5 climate reanalysis and in-situ observations, as well as studying the physical-chemical changes in water quality from in-situ measurements and Landsat satellite imagery (OLI Sensor). Subsequently, we identified changes in the variables of interest during the hurricane's path, and analysed the alterations caused to these variables. Finally, a relationship between the changes associated with the hurricane and the transformation of the seagrass ecosystem was proposed, including its relationship with the physical-chemical water variables during the period of analysis. The results of this Thesis argue for the importance of developing plans aimed at restoring these ecosystems, as La Guajira has high poverty rates and the presence of indigenous communities particularly vulnerable to disasters caused by meteorological and climatic phenomena, in addition to the impact of anthropogenic dynamics in the area.

Keywords: Hurricane Matthew, seagrasses, protected area, satellite imagery, conservation.

Introducción

Los pastos marinos representan el 10% de la capacidad del océano para almacenar carbono (“carbono azul”). A pesar de solo ocupar el 0,2% del fondo marino, pueden capturar carbono de la atmósfera hasta 35 veces más rápido que las selvas tropicales, por lo que se resalta su importancia ecosistémica (ONU, 2022). Por otra parte, la pérdida de pastos marinos altera el flujo de materia orgánica, el ciclo de nutrientes y la cadena alimenticia a lo largo de estos y hacia los ecosistemas costeros adyacentes (UNEP, 2020). La pérdida de estos importantes procesos ecológicos eventualmente conduce a desastres, incluyendo colapso de pesquerías, degradación de la calidad del agua y declinación de otros recursos vivos (UNEP, 2020).

La península de La Guajira cuenta con la mayor reserva marina de Colombia. Aunque existen extensas áreas de pastos marinos, hay pocas investigaciones desarrolladas sobre estos (INVEMAR, 2019). Estos ecosistemas desempeñan un papel importante en la mitigación de los impactos de los huracanes en los ecosistemas costeros, al proporcionar protección contra la erosión, reducir la energía de las olas, estabilizar el sedimento y contribuir a la recuperación después de eventos hidrometeorológicos extremos, por lo que su conservación y restauración son fundamentales para promover la resiliencia de los ecosistemas costeros frente al cambio climático y la ocurrencia de tormentas tropicales y huracanes (ONU, 2022).

Según el Resumen para Responsables de Políticas del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus iniciales en inglés), se prevé que un aumento en el calentamiento global traerá un incremento en las precipitaciones intensas asociadas a los ciclones tropicales (IPCC, 2021); sin embargo, la detección de patrones históricos a escala global se ve obstaculizada por las limitaciones existentes en la disponibilidad de datos en muchas regiones del mundo, como lo es el Mar Caribe.

Para el caso de Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) muestra que, para el año 2020, la temperatura superficial del mar en el Caribe colombiano osciló alrededor de valores por encima de la media. De forma simultánea, 2020 fue decretado como el año con la temporada de ciclones más activa en el océano Atlántico, el Mar Caribe y el Golfo de México, según los registros disponibles.

Para finales del año 2016, se evidenció que diferentes ciudades costeras sobre el Caribe colombiano sufrieron los efectos del paso del huracán Matthew, resaltando la situación en La Guajira, donde las inundaciones afectaron a 18,000 personas y causaron daños significativos en la infraestructura costera, así como en los ecosistemas aledaños (UNGRD, 2020).

La finalidad de este Trabajo de Grado, por lo tanto, es analizar la influencia que tuvo el huracán Matthew en los pastos marinos delimitados por el municipio de Uribia, La Guajira. Esto se desarrolla por medio del uso de estimaciones de variables meteorológicas y oceanográficas provenientes de la base de datos del reanálisis ERA5, y su comparación con observaciones in situ de tres boyas instrumentales. Además, se analiza la distribución de los pastos marinos en Uribia, por medio de imágenes Landsat del sensor Operational Land Imager (OLI). De esta manera, los cambios en las variables meteorológicas y oceanográficas se relacionan con los cambios en la distribución de los pastos marinos, agregando en este análisis, las variables fisicoquímicas que afectan los pastos marinos más resaltantes en la literatura.

Antecedentes

Desde hace algunos años existe la preocupación por el aumento en la temperatura superficial del mar debido al calentamiento global y su relación con la actividad ciclónica. Según el Resumen para Responsables de Políticas del IPCC, es de alta probabilidad que la cantidad de fenómenos extremos aumenten con un incremento en la temperatura global, y que, a su vez estén influenciados por la actividad humana (IPCC, 2014, 2021).

Un caso destacado es el huracán Katrina, ocurrido en agosto de 2005 sobre el océano Atlántico norte y que devastó la costa del Golfo de México. Este huracán no solo causó destrucción masiva de infraestructuras y afectación a comunidades, sino que también tuvo un impacto significativo en los ecosistemas marinos de la región. Los vientos extremos y las inundaciones generadas por este huracán provocaron la erosión de los manglares y la destrucción de hábitats costeros. Tanto el huracán Katrina como otros huracanes y ciclones tropicales sirven como un recordatorio de las repercusiones devastadoras de este tipo de fenómenos en los ecosistemas marinos, subrayando la necesidad urgente de estrategias de manejo y conservación resilientes frente al cambio climático y a fenómenos meteorológicos extremos (Bravo & Hernández, 2005).

Para la región del océano Atlántico y el Mar Caribe, los ciclones tropicales se presentan cada año, aproximadamente desde el 1 de junio hasta el 30 de noviembre, con una temporada de mayor actividad entre mediados de agosto y finales de octubre (NOAA, 2023). En Colombia, la Península de la Guajira y las islas de San Andrés y Providencia son las zonas de más alto riesgo ante la amenaza de las tormentas que vienen del este (UNGRD, 2013).

En el Caribe colombiano, varias ciudades costeras sufrieron los efectos del paso del huracán Matthew ocurrido en el año 2016, particularmente La Guajira, donde las inundaciones afectaron a 18,000 personas, y causaron daños significativos en la infraestructura costera, así como en los ecosistemas aledaños (UNGRD, 2020).

El departamento de La Guajira es principalmente influenciado por su ubicación geográfica y relieve; es mayormente árido, seco y con altas temperaturas, condiciones que son atenuadas por la brisa marina y los vientos alisios del noreste que fluyen sobre la región durante la mayor parte del año. Las lluvias son escasas. La región cuenta con un régimen bimodal en el que la principal

temporada de lluvia ocurre entre los meses de septiembre y noviembre, cuando la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) se desplaza hacia el norte (IDEAM, sf).

Justificación

Los pastos marinos juegan un papel fundamental en la regulación del clima al capturar y almacenar grandes cantidades de dióxido de carbono, ayudando así a mitigar el cambio climático. Además, actúan como barreras naturales que reducen la erosión costera y protegen las zonas litorales de la fuerza de las olas y tormentas, contribuyendo a la estabilidad de las costas (Guerra, 2018).

Por otra parte, según Herzka et al. (2020), la variación de la temperatura tiene efectos sobre los ecosistemas de pastos marinos; de hecho, es un factor relevante en su productividad ya que, dependiendo de la especie, siguen patrones de tolerancia muy variables. Este factor no es el único que amenaza las condiciones óptimas de permanencia de los pastos marinos pues estos también dependen de la radiación solar incidente, la salinidad, los nutrientes y los sedimentos. Este último factor toma relevancia ya que, según el tipo de sedimento al que se anclen, se establecen condiciones de estabilidad física, lo que condiciona el anclaje al suelo marino y la obtención de nutrientes. Por lo tanto, las perturbaciones asociadas a fenómenos como los huracanes son causantes de desenterramientos y arrastre de los ecosistemas de pastos marinos, causando la pérdida de estos.

El tiempo necesario para que un pasto marino se recupere de una perturbación como las generadas por huracanes es función de su magnitud (Fourqurean & Rutten 2004). Sin embargo, los efectos de grandes perturbaciones causadas por ciclones tropicales podrían persistir por muchas décadas. Los estudios sobre la dinámica de recuperación pueden tornarse muy difíciles por la larga escala de tiempo, por lo que su entendimiento es importante para el manejo del ecosistema.

Analizar los efectos de los huracanes presenta desafíos en la evaluación de tendencias históricas de ciclones a nivel global, debido a la falta de datos (IPCC, 2021). Los recientes eventos climáticos extremos han evidenciado una notable vulnerabilidad y exposición de ecosistemas marinos a la variabilidad climática actual (IPCC, 2014).

Lo anterior pone en evidencia la necesidad de llevar a cabo una evaluación exhaustiva de los efectos de los eventos hidrometeorológicos que han tenido lugar en la región. Este análisis permitirá el desarrollo de estrategias orientadas a la restauración de los ecosistemas impactados, como los pastos marinos. Esta necesidad se fundamenta en el hecho de que la dinámica climática

y topográfica específica de la zona agrava los impactos potenciales de dichos fenómenos (Molina, 2021). Por consiguiente, este Trabajo de Grado busca centrar la ocurrencia del huracán Matthew como ejemplo de amenaza de huracanes en tiempos recientes en los pastos marinos de La Guajira, teniendo en cuenta la capacidad destructiva que tuvieron las tormentas asociadas a este evento, según se evidencia por los aumentos significativos en la altura de ola e incremento energético asociados a estos fenómenos (Ortiz, 2007).

Se espera que los resultados obtenidos de este Trabajo de Grado aporten al entendimiento de los ecosistemas de pastos marinos y su relación con los ciclones tropicales, eventos comunes con posibles influencias en la zona Caribe de Colombia. Los resultados de este Trabajo de Grado tienen la finalidad de argumentar la importancia de los ecosistemas de pastos marinos y de su constante monitoreo, dada la falta de información y la ausencia de datos continuos y actualizados, lo que dificulta la toma de decisiones informadas y la implementación de medidas efectivas para la protección de estos ecosistemas. Además, la falta de información obstaculiza la evaluación del estado de la biodiversidad, la identificación de amenazas y la implementación de medidas de protección adecuadas.

Objetivos

Objetivo general

Analizar la influencia del huracán Matthew (2016) sobre los pastos marinos en la región de Uribia (La Guajira).

Objetivos específicos

- Describir las condiciones meteorológicas y oceánicas asociadas al huracán Matthew a partir de información de estaciones in situ y de reanálisis.
- Analizar la distribución del ecosistema de pastos marinos en Uribia, por medio de imágenes satelitales Landsat (Sensor OLI).
- Relacionar los cambios en las condiciones meteorológicas y oceánicas durante el huracán Matthew con la distribución de pastos marinos en Uribia.

Marco teórico

Temporada de ciclones tropicales en el Mar Caribe

En el Mar Caribe, la temporada de huracanes inicia oficialmente desde el 1 de junio hasta el 30 de noviembre (NOAA, 2023). Los ciclones tropicales tienen relevancia para Colombia puesto que su paso puede tener incidencia en los departamentos de La Guajira, Bolívar, Atlántico, Magdalena, el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Sucre, Córdoba, Chocó y Antioquia, durante los meses con mayor actividad ciclónica, que corresponden a septiembre y octubre (UNGRD, 2021).

Características de la región de estudio

Colombia, siguiendo un comportamiento tropical, no cuenta con variaciones anuales de temperatura muy marcadas; presenta un régimen bimodal de precipitación, con dos temporadas lluviosas y dos temporadas secas en el año. Los cambios espaciales de temperatura se dan principalmente por las variaciones en la altitud, tomando una gran variabilidad en los climas y ecosistemas que van desde los páramos hasta el contacto con el mar en las regiones de playa.

En concreto, La Guajira cuenta con alturas máximas que no sobrepasan los 900 msnm y su formación montañosa más característica es el cerro de la Teta con 420 msnm, que se puede observar en todas las direcciones y se eleva cambiando su forma típica en las llanuras (Corpoguajira, 2000).

Esta región se caracteriza por tener una temperatura media de 28°C, y un “clima seco, semiárido y árido” (Guhl, 2016), que está favorecido por la presencia de los vientos alisios que vienen desde el noreste y al no encontrar una barrera orográfica, no alcanzan a condensarse. Esto causa el arrastre de nubes, favoreciendo la existencia de condiciones secas en la región. Por ende, los ecosistemas terrestres más sobresalientes son el desierto, y la selva seca y húmeda de montaña, ya que en las montañas es donde se da el mayor aporte de humedad (Gobernación de La Guajira, 2023). Las temporadas secas corresponden a los períodos diciembre-abril y julio- agosto y las temporadas lluviosas son los periodos mayo-junio y septiembre-noviembre (IDEAM, sf.).

Paso del huracán Matthew por Colombia

La zona Caribe colombiana ha sido afectada por la constante presencia de tormentas tropicales. Por ejemplo, Ortiz (2007) muestra que zonas como San Andrés y la península de La Guajira son las más expuestas a amenazas por tormentas ciclónicas provenientes del este.

Un caso particular de tormentas que han afectado a La Guajira es el huracán Matthew en 2016 (**Figura 1**). Este evento tuvo una proximidad de 80 M (148.16 km) con el norte de Punta Gallinas (La Guajira) y fue allí donde adquirió una categoría mayor (según la escala de Saffir-Simpson) y dejó en su paso lluvias intensas que causaron afectaciones y víctimas fatales en 21 municipios de la región Caribe colombiana (UNDGR, 2017).



Figura 1. Trayectoria del huracán Matthew (2016). Fuente: NASA/JAXA, Hal Pierce.

Durante las primeras horas del 23 de septiembre de 2016, una onda tropical se originó en la costa occidental de África y se desplazó hacia el oeste a través del océano Atlántico tropical. En las siguientes 48 horas, el patrón de nubes asociados a esta perturbación comenzó a parecerse gradualmente a un ciclón tropical, con circulaciones bien definidas en los niveles medios y altos del sistema. El 28 de septiembre se desplazó al este del Mar Caribe, en donde se fortaleció hasta

alcanzar una velocidad máxima del viento entre esta fecha y el 1 de octubre, cuando se encontraba a menos de 80 M al norte de Punta Gallinas, Colombia, decretándose alerta roja en esta región debido a las condiciones adversas que el huracán traía a su paso (Stewart, 2017).

Matthew fue un huracán categoría 5 (escala de vientos huracanados de Saffir-Simpson) que posteriormente tocó tierra como huracán de gran intensidad a lo largo de las costas del suroeste de Haití, el extremo oriental de Cuba y el oeste de la isla Gran Bahamas, y como huracán categoría 1 a lo largo de la zona central de la costa de Carolina del Sur, en Estados Unidos (Stewart, 2017).

Para el 3 de octubre, la parte oriental del ojo de Matthew pasó sobre la Boya 42058 de la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera (NOAA) de Estados Unidos, ubicada en el Mar Caribe central. Aproximadamente 2 horas antes del paso del ojo del huracán, se midió uno de los mayores valores de viento, sin embargo, la boya dejó de reportar datos de velocidad del viento para el 3 de octubre de 2016, durante casi dos horas, lo que significa que probablemente no se cuenta con registros de los máximos de velocidad durante el recorrido del huracán Matthew sobre la región de influencia de la boya (Stewart, 2017).

En Colombia, la Península de la Guajira y las islas de San Andrés y Providencia son las zonas de más alto riesgo ante la amenaza de las tormentas que vienen del este. Por esta razón, la recopilación de información de distintas boyas y estaciones de monitoreo es fundamental para la comprensión de este evento, principalmente para el enfoque del área de estudio comprendida en la región de Uribia (La Guajira).

Relación de la actividad ciclónica con el arrastre de pastos marinos

La recuperación de los pastos marinos tras fenómenos extremos depende de la severidad del daño, y los efectos de grandes ciclones tropicales pueden durar décadas, lo cual es esencial para una correcta gestión del ecosistema.

La variación de parámetros meteorológicos, oceánicos o fisicoquímicos asociados al paso de ciclones tropicales tienen efectos sobre los ecosistemas de pastos marinos. En particular, son un factor relevante en su productividad, ya que, dependiendo de la especie, siguen patrones de tolerancia muy variables (Herzka, et al. 2020). La turbidez y sedimentación son factores que toman relevancia ya que, según el tipo de sedimento al que se ancle los pastos marinos, se establecen condiciones de estabilidad física, lo que condicionará el anclaje al suelo marino y la obtención de

nutrientes (INVEMAR, 2019). Por lo tanto, fenómenos como los huracanes son causantes de desenterramientos y arrastre de los ecosistemas de pastos marinos, causando la pérdida de estos.

Aunque no parece haber una relación directa entre la forma de crecimiento de los pastos marinos y la susceptibilidad al oleaje de tormenta o la sedimentación, al evaluar la efectividad de las áreas protegidas, lo ideal sería comparar las condiciones actuales con datos de referencia (recopilados antes de la protección), tanto en el área protegida como en las áreas de referencia, para así poder evaluar directamente cualquier efecto potencial de la protección en el estado del ecosistema (Underwood, 2006). Sin embargo, en la mayoría de los casos, particularmente en países del Sur Global, la disponibilidad de información de referencia es escasa, como es el caso de La Guajira.

Metodología

Área de estudio

La península de La Guajira se encuentra ubicada entre las latitudes 10° 23' y 12° 28' N y las longitudes 71° 06' y 73° 39' W. Se ubica en la zona nororiental de Colombia, limitando con Venezuela al sur y con el Mar Caribe al norte y oriente, y cuenta con una extensión territorial de 20.848 Km² dividida en 32 municipios (Veloza, 2011).

Las áreas de estudio escogidas para este Trabajo de Grado se delimitaron considerando la trayectoria del huracán Matthew y la zona de influencia de los pastos marinos en Uribia. En primer lugar, se profundizó en el comportamiento general que tuvo el huracán Matthew a lo largo de su recorrido entre las Bahamas y su llegada a la costa norte de Estados Unidos; por lo tanto, se consideró la región comprendida entre las coordenadas 10°N y 40° N y 55°W y 95° W para las fechas del 23 de septiembre al 14 de octubre de 2016. La segunda área escogida se obtuvo con la finalidad de entender de forma más detallada el comportamiento del huracán y los efectos de este en la ubicación más cercana al municipio de Uribia y así poder establecer posibles influencias de este evento sobre los pastos marinos ubicados en la región. Esta segunda área se delimitó entre las coordenadas 5°N y 20° N y 67°W y 83°W para los días entre el 29 de septiembre y el 4 de octubre de 2016. Estos dominios se muestran en la **Figura 1**.

Reanálisis ERA5

Con el fin de analizar los cambios en la dinámica meteorológica y oceanográfica causada durante el huracán Matthew, se tomaron datos provenientes del reanálisis climático ERA5. En específico, se analizó información a escala horaria. ERA5 es producido por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (Hersbach, 2020). Esta base de datos cuenta con una resolución espacial de 0.25° x 0.25° y temporal de 1 hora. Los datos fueron acotados a las dos zonas de estudio especificadas anteriormente y se obtuvieron registros entre los meses de septiembre y octubre de 2016.

La información descargada fue tratada por medio del lenguaje de programación Python y R, mediante el cual se hizo el análisis de diferentes variables durante la ocurrencia del huracán y

las anomalías encontradas con respecto a los promedios de dichos meses. Las variables analizadas se presentan en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Variables meteorológicas, oceánicas y fisicoquímicas analizadas.

METEOROLÓGICAS	OCEANOGRÁFICAS	FISICOQUÍMICAS
Dirección y velocidad del viento	Temperatura superficial del mar	pH
Temperatura a 2 metros	Altura de la ola	Salinidad
Cortante vertical del viento 200-850 hPa	Presión media a nivel del mar	Oxígeno disuelto
Radiación solar de onda larga saliente (OLR)		Temperatura del agua
Precipitación total		
Presión superficial		
Radiación neta de onda corta		

Información in situ

Con el objetivo de comparar con la información proporcionada por la base de datos ERA5, se obtuvo información in situ por medio de tres boyas. La primera boya pertenece a la NOAA, identificada como la estación Caribe Central (42058), ubicada en las coordenadas 14°50'38" N 75°3'39" W. La segunda boya pertenece a la Dirección General Marítima (DIMAR), identificada como la estación Puerto Bolívar (CP14PB0006), ubicada en las coordenadas 12°15'36.00" N 71°58'12.00" W. Por último, la tercera boya es perteneciente a la DIMAR y está identificada como la estación Ballenas (CP06BA0007), ubicada en las coordenadas 11°42'01.01" N 72°43'27.01" W. Para la comparación de los datos in situ con los obtenidos de la base de datos ERA5, se clasificaron los datos por variable y temporalidad (fecha, hora). La ubicación de las boyas in situ se encuentra en la **Figura 2**. Los datos de estas boyas están disponibles en: NOAA y DIMAR.

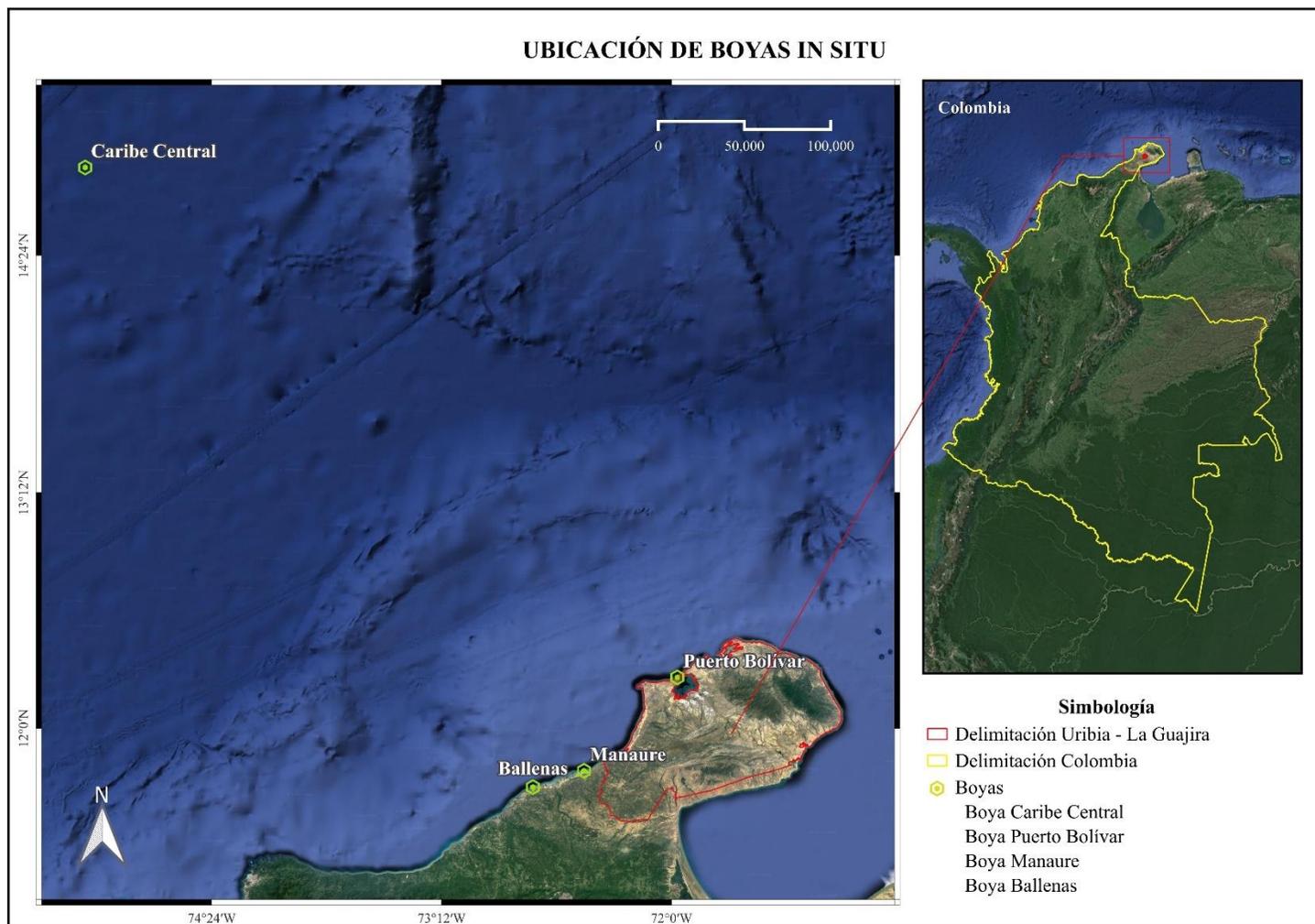


Figura 2. Ubicación de las estaciones in situ empleadas para la comparación con las estimaciones del reanálisis ERA5...

Parámetros fisicoquímicos

Adicionalmente, se evaluaron las características fisicoquímicas en la región de interés. Según Garcés et al. (2016), la región de la costa Caribe comprendida entre La Guajira y Antioquia centra grandes asentamientos de poblaciones humanas, en donde se han incrementado las actividades económicas que se dan en estas regiones, trayendo consigo vertimientos sobre las aguas del Mar Caribe y generando mayores riesgos de deterioro en la calidad de estas aguas.

Por lo anterior, desde el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR) en Colombia se ha aplicado el Índice de Calidad de Aguas Marino-Costeras para la preservación de Flora y Fauna (ICAM_{PFF}), para entender los comportamientos persistentes en las zonas marinas colombianas y sus variaciones, y así, identificar las causas de dichos cambios. Para el año 2015 (antes de la ocurrencia de Matthew), este índice osciló entre calidad pésima y óptima en la zona de la costa Caribe, mostrando índices de oxígeno disuelto bajos y concentraciones elevadas de microorganismos fecales, sólidos suspendidos totales, nitrato y ortofosfatos (Garcés, et al., 2016).

A partir de este índice, el INVEMAR, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) de la zona costera e insular formaron un programa interinstitucional denominado Red de Vigilancia para la Conservación y Protección de las Aguas Marinas y Costeras de Colombia (REDCAM). Su finalidad es la evaluación y el diagnóstico de las aguas marinas del territorio colombiano. Para el desarrollo de este Trabajo de Grado, se obtuvo información de los informes técnicos presentados anualmente, en los que se expone la información recolectada de las variables registradas desde las estaciones de monitoreo de calidad del agua marina. En específico, se tomaron datos de las estaciones ubicadas en la región de La Guajira para el año 2016.

Este monitoreo se realiza en dos jornadas a lo largo de cada año, con la intención de obtener la variabilidad entre inicios y finales de cada periodo, para los meses de abril y diciembre.

Distribución de praderas de pastos marinos

La distribución del ecosistema de pastos marinos fue analizada mediante imágenes satelitales. Para esto, se consideró el uso de uno de los sensores del satélite Landsat 8, denominado Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS) (OLI + TIRS), el cual cuenta con una banda azul costera (Banda 1), que permite el análisis de condiciones de calidad del agua

(Ariza, 2013) y, asimismo, debido a su transmisión en longitudes de onda entre 0.433 y 0.453 nm, cuenta con una buena penetración en la columna de agua, lo que permite facilitar el trabajo de teledetección de pastos marinos (USGS, 2018).

Las imágenes se obtuvieron desde la plataforma EOSDA LandViewer, herramienta que permite obtener imágenes satelitales para su descarga y procesamiento. Se analizaron imágenes comprendidas en un periodo de 6 meses antes y después del evento del huracán Matthew (entre marzo 2016 y marzo 2017), en donde se obtuvieron 23 imágenes que cubren por tramos la zona de estudio. Estas fueron descargadas en la mayor resolución que permite la plataforma en formato KMZ (~2770x2904 80m/px) y TIFF (~ 5541x5809 40m/px).

Una vez obtenidas las imágenes, se identificó el área con cobertura de pastos marinos alrededor del municipio de Uribia, tomando como guía adicional la capa de distribución de pastos marinos realizada por el INVEMAR (2014) con datos actualizados al 30 de julio de 2024, que se encuentra en el portal de la institución, en la sección de “Acceso Datos Ambientales”. Para comparar las áreas a delimitar, se establecieron 6 cuadrantes en la zona costera de la región escogida (municipio de Uribia), como se observa en la **Figura 3**.

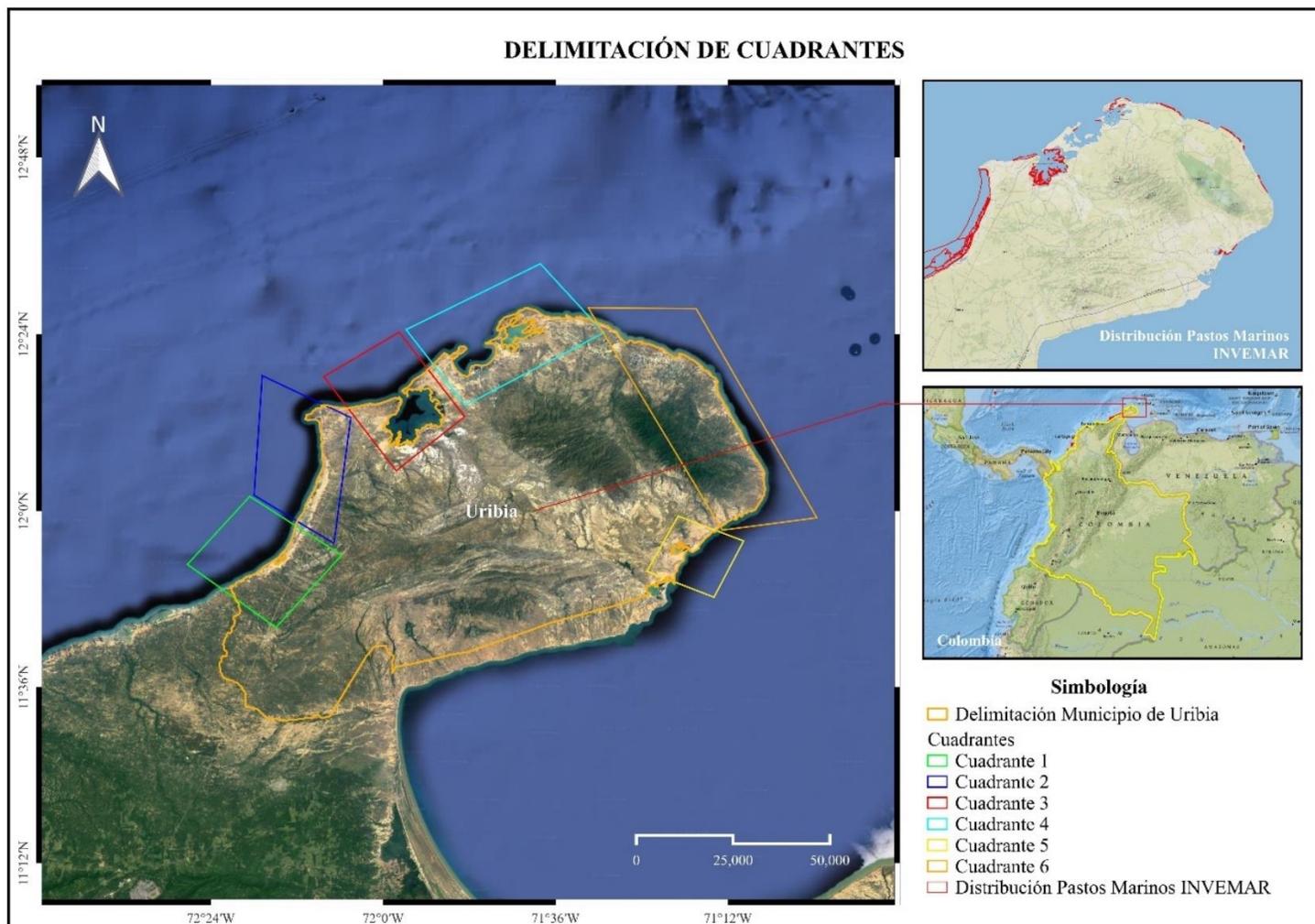


Figura 3. Cuadrantes delimitados para la interpretación de imágenes satelitales.

Posteriormente, para lograr comparativas visuales más precisas entre el antes y después del evento para cada cuadrante, se optó por la delimitación de las áreas con presencia notable de pastos marinos por medio del trazado de polígonos, con ayuda de la herramienta de creación de figuras que brinda la plataforma de Google Earth Pro.

La interpretación visual de las imágenes obtenidas fue complementada con la capa de datos de la distribución de pastos marinos perteneciente al INVEMAR. En esta capa se agrupa información obtenida de diferentes proyectos para la cartografía correspondiente a pastos marinos. Esta información está actualizada al año 2014 para la región de interés y permite comparar las zonas con presencia de pastos y zonas con potencial para la distribución de estos.

Por último, se tomaron los resultados obtenidos en el análisis de variables oceanográficas y meteorológicas y se analizó el cambio de los parámetros considerados durante el paso del huracán, relacionándolos con posibles derivaciones de cambios en la distribución de las praderas.

Densidad y cobertura de las praderas marinas

Para establecer el estado de los pastos marinos en la región de La Guajira, desde el INVEMAR se ha implementado un método de medición llamado Indicador de Condición Tendencia de Pastos Marinos (ICTPM), el cual consiste en el análisis de tres variables principales que obtienen un sólo valor numérico según su estado y logran establecer un análisis funcional y estructural de las plantas (Gómez, et al., 2014). Las variables analizadas son la densidad de vástagos, la afectación por el hongo *Labyrinthula* spp. y mortalidad de plantas por estación y la densidad de herbívoros, carnívoros y detritívoros/omnívoros.

Para este Trabajo de Grado, se usaron variables medidas en campo por parte del INVEMAR de densidad y cobertura de la especie *Thalassia Testudinum*, alrededor de las dos estaciones más cercanas al recorrido de huracán.

En este contexto, se obtuvo información desde las estaciones Ballena y Manaure, en las cuales se encontraron registros para los meses de mayo 2016, agosto 2016, agosto y septiembre 2017 y septiembre 2018. Según el INVEMAR (2014), para la instalación de las estaciones de monitoreo, se dividió un área de 25000 m² en tres transectos paralelos entre sí y a adyacentes a la playa, separados cada 50 m. Cada uno de estos transectos tiene una medición de 50m y recibe una designación según su ubicación de la siguiente manera: Transecto A ubicado a menos de 1 metro

de profundidad, seguidamente el transecto B ubicado a 25 m de distancia con respecto al transecto A en dirección perpendicular a la playa y el transecto C ubicado a 25 m del transecto B, formando un recuadro de 50x50 m (**Figura 4**).

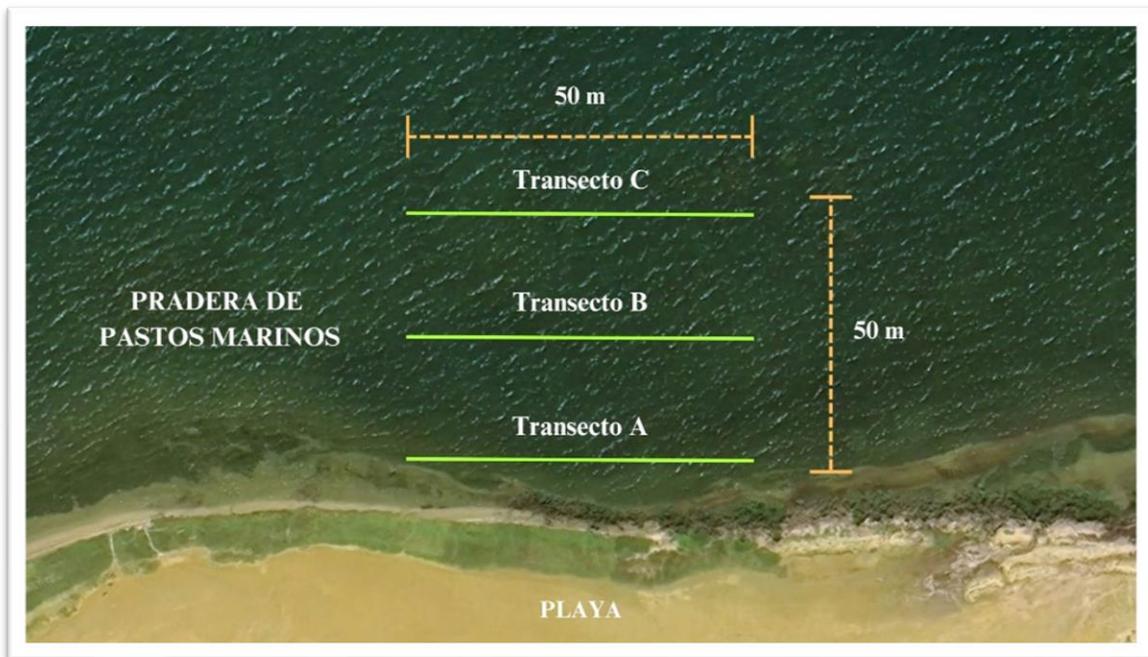


Figura 4. División de transectos.

Resultados y Discusiones

Caracterización del recorrido del huracán Matthew

Datos del reanálisis ERA5

Para identificar la influencia del huracán Matthew sobre el área de interés, se inició con el análisis de la trayectoria del huracán más cercana a la región de estudio. En este sentido, se optó por escoger un área de paso del evento donde se evidenciará la formación de la tormenta tropical y el cambio que tuvo hasta evolucionar a un huracán, y así, analizar los cambios durante su recorrido. Por lo anterior, se delimitó un área inicial entre las coordenadas 10° y 40°N y 55° y 95°O para las fechas del 23 de septiembre al 14 de octubre de 2016.

Según el informe del Centro Nacional de Huracanes (NHC) de Estados Unidos (Stewart, 2017), el 23 de septiembre de 2016 se registró el inicio de una onda tropical en la costa occidental de África. Esta onda avanzó en sentido oeste durante cuatro días, permaneciendo a aproximadamente a una latitud de 10°N, con velocidades entre 10 y 12 m/s. Posteriormente, el 27 de septiembre se confirmó un patrón de circulación atmosférica abierta y al día siguiente (28 de septiembre), se confirmó la presencia de una onda tropical con estructura organizada, ubicada al norte de Barbados alrededor de las 7:00 am de Colombia (1200 UTC).

Como se observa en la **Figura 5**, para el 29 de septiembre, la onda tropical tomó fuerza al atravesar aguas del Mar Caribe con temperaturas superficiales del mar alrededor de los 32.3°C y alcanzó la categoría de huracán, tomando el apelativo de “Huracán Matthew”. En adición a lo anterior, se evidenciaron valores de cortante del viento (diferencia del viento zonal entre 200 y 850 hPa) cerca de los 0 m/s, además de valores máximos de temperatura a dos metros alrededor de 31.8°C y valores de presión media a nivel del mar alrededor de 1010 hPa. Las condiciones en las variables meteorológicas para este día favorecen la formación de tormentas tropicales. En particular, el aumento en las temperaturas superficiales a 2 metros (31.8°C) favoreció la formación de centros bajas presiones hacia los cuales convergen los vientos, indicando poca diferencia entre la troposfera superficial y superior en los valores de velocidad zonal del viento, y a su vez, favoreció las condiciones para el aumento de la energía por medio de la formación de tormentas eléctricas (NOAA, 2023).

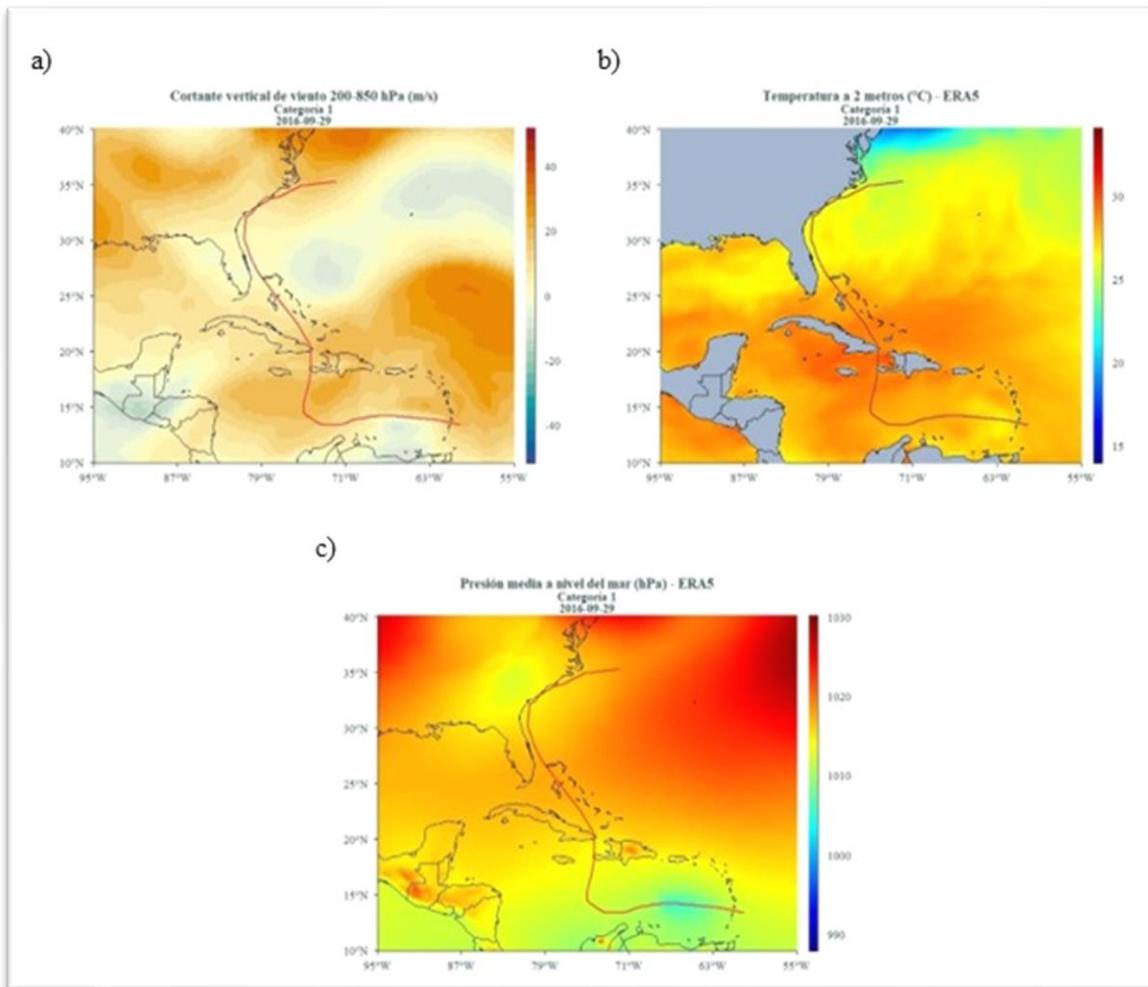


Figura 5. Variables meteorológicas y oceanográficas durante el 29 de septiembre de 2016 según registros del reanálisis ERA 5: a) cortante vertical del viento entre 200hPa y 850hPa, b) temperatura a 2 metros, y c) presión media a nivel del mar.

La **Figura 5** muestra las condiciones durante el periodo de formación de la tormenta tropical. Además de estas condiciones, se registró una dirección del viento con predominancia hacia el suroeste, arrastrando masas de aire tropical, coincidiendo con la trayectoria descrita por el NHC. A partir de la primera hora del 30 de septiembre, se evidenció un periodo de rápida intensificación en el que el ojo del huracán se contrajo de forma drástica (de 30M a 5M) (NOAA, 2023), pasando de ser un huracán categoría 1 a completar un periodo de 24 horas como huracán categoría 5. Según los registros de ERA5, para el 30 de septiembre (12:00 am) se identifican valores

de presión a nivel del mar (1027.9 hPa) y de presión superficial (1028.1 hPa); además, se identifican valores de precipitación alrededor de 13 mm/día, alturas máximas de la ola con valores cercanos a 11 m, velocidades del viento de alrededor de 25 m/s, y condiciones de alta temperatura (aproximadamente 28 °C) causantes de alta humedad, coincidiendo con lo descrito por la NOAA (2023). Luego de un periodo de 24 horas (primeras horas del 1 de octubre) (**Figura 6**), la presión superficial (720 hPa) llegó a su valor mínimo, coincidiendo con el instante en que el huracán evolucionó a categoría 5.

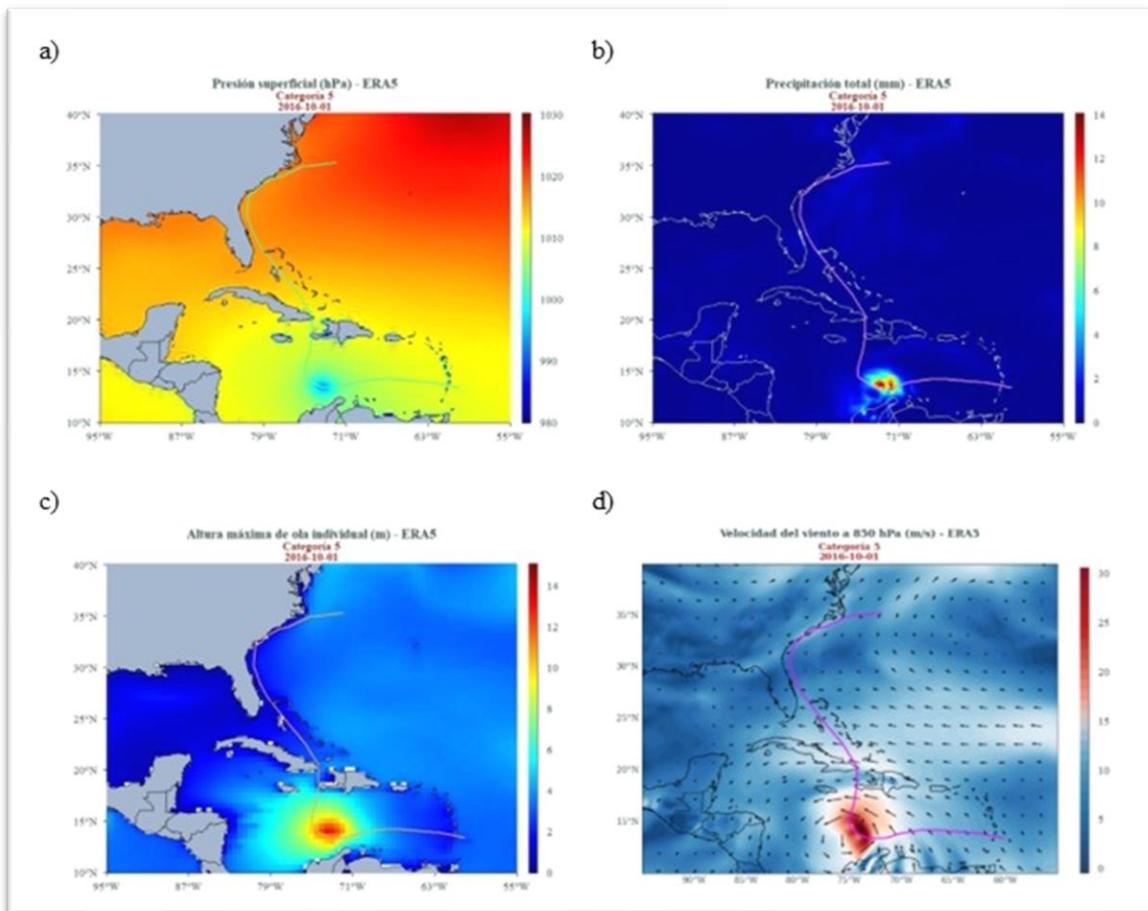


Figura 6. Variables meteorológicas y oceanográficas durante el 1 de octubre de 2016 según registros del reanálisis ERA5: a) presión superficial, b) precipitación total, c) altura de la ola, y d) velocidad y dirección del viento a 850hPa.

Según lo anterior, se evidencia una relación inversa entre las presiones a nivel del mar y la velocidad de los vientos, coincidiendo con el aumento de categoría del huracán. Asimismo, se identifica cómo las variables de presión y temperatura fluctuaron a lo largo de la evolución del huracán, reflejando una fluctuación inversa, en donde las temperaturas mayores son causantes de presiones menores que favorecen a su vez mayores gradientes para el desplazamiento de vientos a mayor velocidad.

Paralelamente, Matthew se ubicó a menos de 80M (146.6 km) de Punta Gallinas y tomó la posición más austral en la cuenca del océano Atlántico para un huracán con esa categoría. En dicho momento, se detectaron valores máximos en las velocidades del viento de 38.6 m/s y en los valores de radiación neta superficial de onda corta de 988775.3 J/m²; además, se notó un cambio en la dirección media del viento hacia el noreste, conduciéndolo hacia Cuba y Haití.

A partir del 2 de octubre, el huracán tuvo una tendencia de debilitamiento hacia al norte, cuando se encontraba a 300 M al suroeste de la capital de Haití, alrededor de las 0600 UTC. Luego, Matthew pasó sobre aguas cálidas más profundas del océano Atlántico subtropical central y alcanzó una surgencia máxima secundaria al debilitarse a huracán categoría 4, cerca de Haití. Como se muestra en la **Figura 7**, el mayor valor de precipitación se dio dicho día, con 14.7 mm/día, cuando la temperatura superficial y la temperatura a 2 metros se encontraban alrededor de los 28 °C, aportando a la evaporación necesaria para aumentar el contenido de vapor en la atmósfera para la subsecuente formación de precipitación. De hecho, entre los parámetros comunes relacionados con la presencia de un huracán, se encuentra el aumento de la precipitación en los sectores próximos a su paso, lo que se da por la evaporación del agua debido las condiciones cálidas del océano que son necesarias para generar bajas presiones y a su vez, mayores velocidades que favorecen al paso del huracán. Además, se reafirma que la zona de influencia del huracán Matthew contaba con incrementos en la nubosidad, ya que se registran valores bajos de la radiación de onda corta neta para este día; de hecho, a lo largo de la trayectoria del huracán se pueden identificar valores bajos de esta variable, indicando la presencia de nubes convectivas sobre la región, que podrían generar la obstrucción del paso de la radiación solar hacia la superficie.

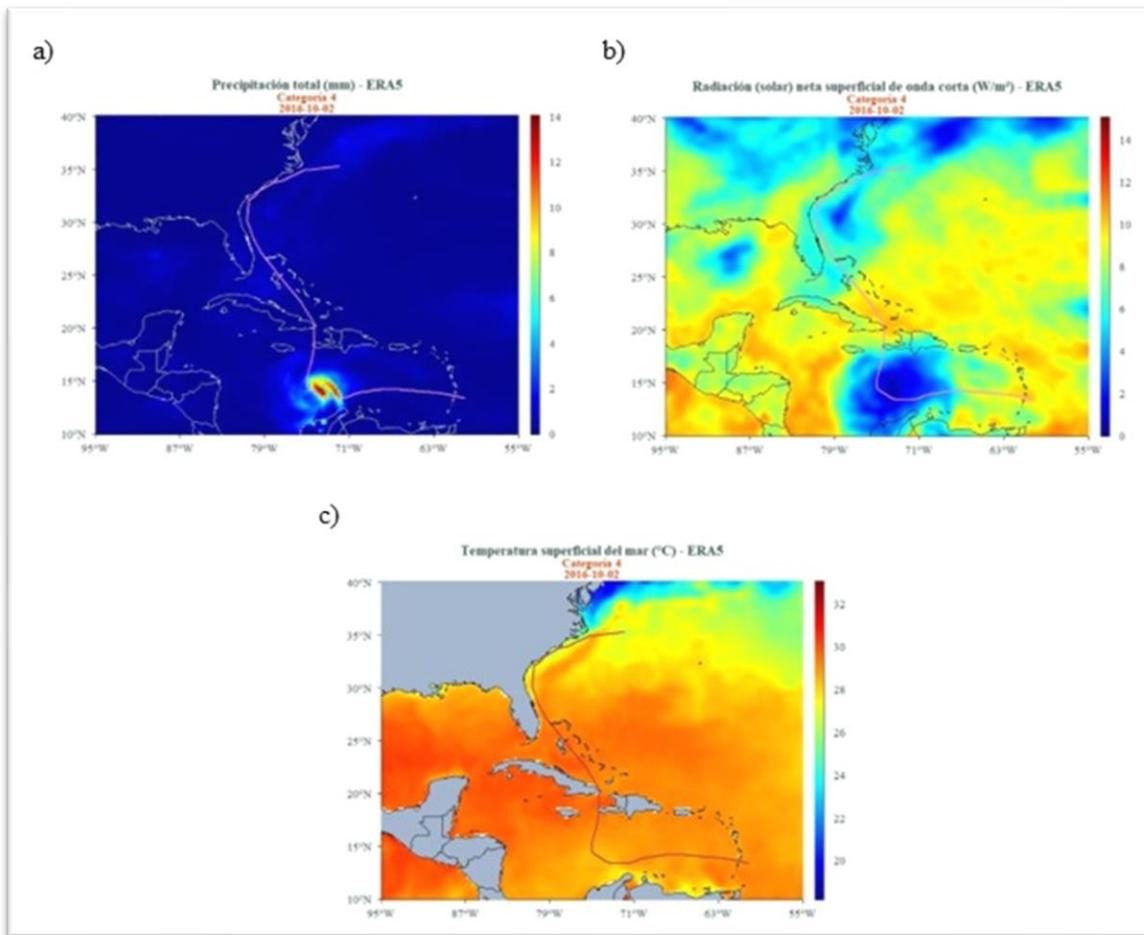


Figura 7. Variables meteorológicas y oceanográficas durante el 2 de octubre de 2016 según el reanálisis climático ERA5: a) precipitación total, b) radiación neta superficial de onda corta, y c) temperatura superficial del mar.

Para el 3 de octubre, el huracán Matthew continuó en dirección noreste, con máximos de altura de ola alrededor de 15,7 m y mínimos de presión media a nivel del mar alrededor de 984 hPa, generando centros de convergencia de vientos en niveles bajos a grandes velocidades (aprox. mayores a 30 m/s) que generaron la fricción suficiente sobre el agua para impulsarla y formar olas más grandes.

Al continuar en la dirección noreste, el ojo del huracán tocó tierra a lo largo de la costa suroeste de Haití alrededor de las 1100 UTC del 4 de octubre, conservando la categoría 4 y siendo el primer huracán con esa categoría en tocar tierra en Haití desde 1964, según Stewart (2017).

Mathew se siguió moviendo hacia el norte hasta tocar tierra en Cuba, con categoría 4. A partir de este momento, el terreno montañoso interrumpió la circulación de los vientos en niveles bajos, debilitando los vientos sostenidos para el día 5 de octubre, causando que se debilitara a categoría 3. El huracán continuó con pocos cambios en su intensidad durante las 18 horas siguientes y a las 1200 UTC del 6 de octubre, lo que causó que completara un periodo de reforzamiento, recuperando la categoría 4. A continuación, el huracán inició una tendencia de debilitamiento lento pero constante, con un aumento en la cortante vertical y una disminución de la humedad debido al contacto con el terreno montañoso de Cuba, llegando a categoría 1 para el día 8 de octubre. Su desplazamiento continuó hacia el noreste, llegando a la costa norte de Carolina del Norte, Estados Unidos, donde el escudo de nubes y lluvias cambió constantemente, resultando en aumento de humedad y fuertes lluvias. Matthew se trasladó hacia el este-noreste y perdió las características de tormenta tropical alrededor de las 1200 UTC del 9 de octubre, al declinar la convección profunda del centro del huracán debido al aumento en la cortante vertical.

Datos de boyas in situ

Las áreas de pastos marinos ubicadas en el Distrito de Manejo Integrado de Pastos Marinos SAWAIRU tienen gran importancia ecosistémica dentro de las regiones que lo comprenden, entre ellas el municipio de Uribia, donde se encuentra una porción de esta área protegida. Por lo anterior, Uribia se considera como una región relevante para el estudio de la influencia de fenómenos atmosféricos que confluyen en la región.

Para analizar los efectos del paso del huracán Matthew sobre esta zona, se analizó la evolución de diferentes variables atmosféricas y oceánicas en la región comprendida entre 5°N y 20°N y 67°W y 83°W para los días entre el 29 de septiembre y el 4 de octubre de 2016, con una resolución temporal de 6 horas. De esta manera, se consideran las estimaciones provenientes del reanálisis ERA5 y de las boyas disponibles: Caribe Central (42058), Puerto Bolívar (CP14PB0006) y Ballenas (CP06BA0007).

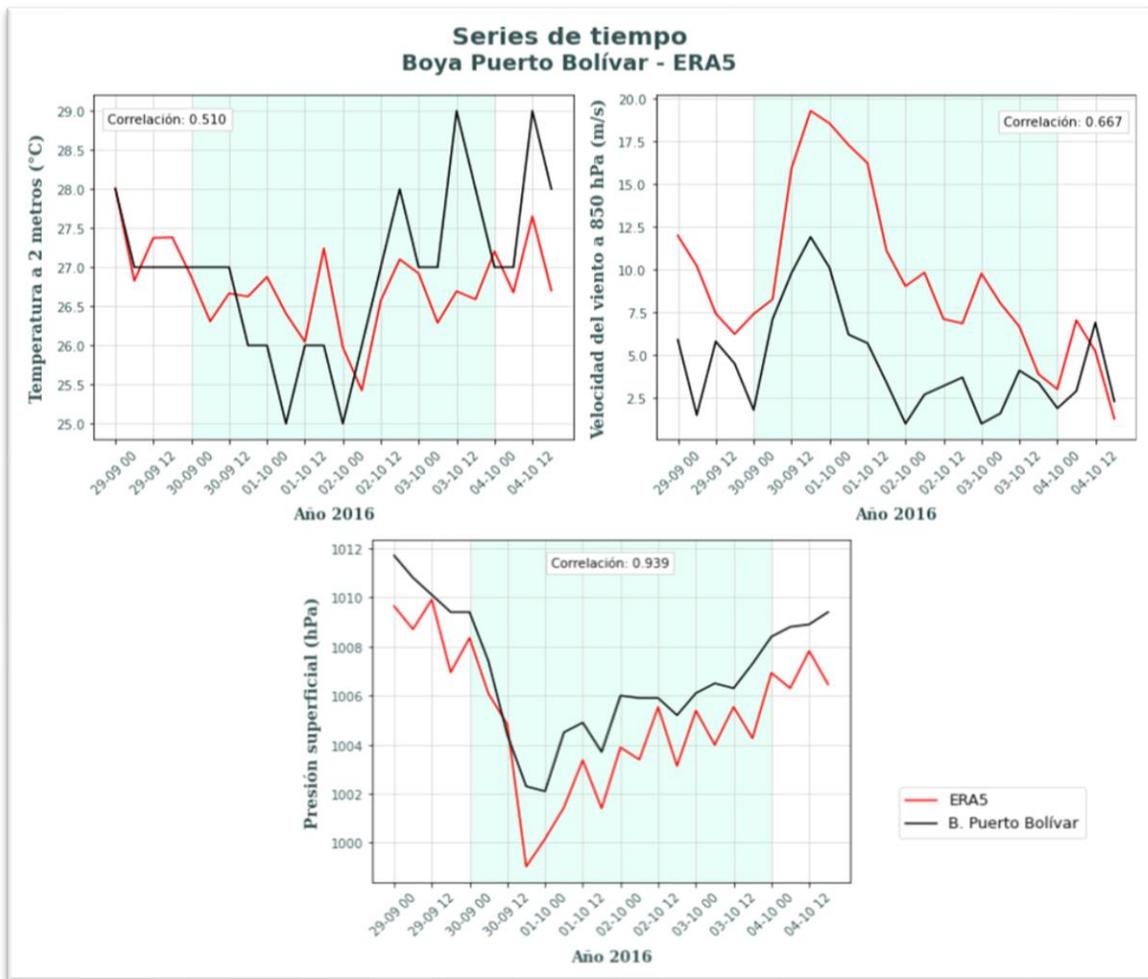


Figura 8. Series de tiempo de temperatura a 2 metros, velocidad del viento a 850 hPa y presión superficial durante el 29 de septiembre y el 4 de octubre de 2016, según los registros de la-boya Puerto Bolívar (línea negra) y el reanálisis ERA5 (línea roja).

Con esta información se obtuvieron las series de tiempo del reanálisis ERA5 para la ubicación de la boya de interés para un intervalo establecido entre los días 29 de septiembre y 4 de octubre de 2016. Los resultados sugieren que alrededor del mediodía del 30 de septiembre se pudo evidenciar la entrada del huracán Matthew a la zona de interés, momento en cual presentaba categoría 1. Como se evidencia en la **Figura 8** y la **Figura 9**, se nota una disminución en las variables de temperatura a 2 metros y presión superficial en las boyas de Puerto Bolívar y Ballenas, manteniendo comportamiento hasta las primeras horas del día 1 de octubre, momento en que el

huracán evolucionó a categoría 5 en un periodo de 24 horas. Para dicho momento, se identifican valores de temperatura de 25°C en la boya de Puerto Bolívar y de 26°C en la boya de Ballenas.

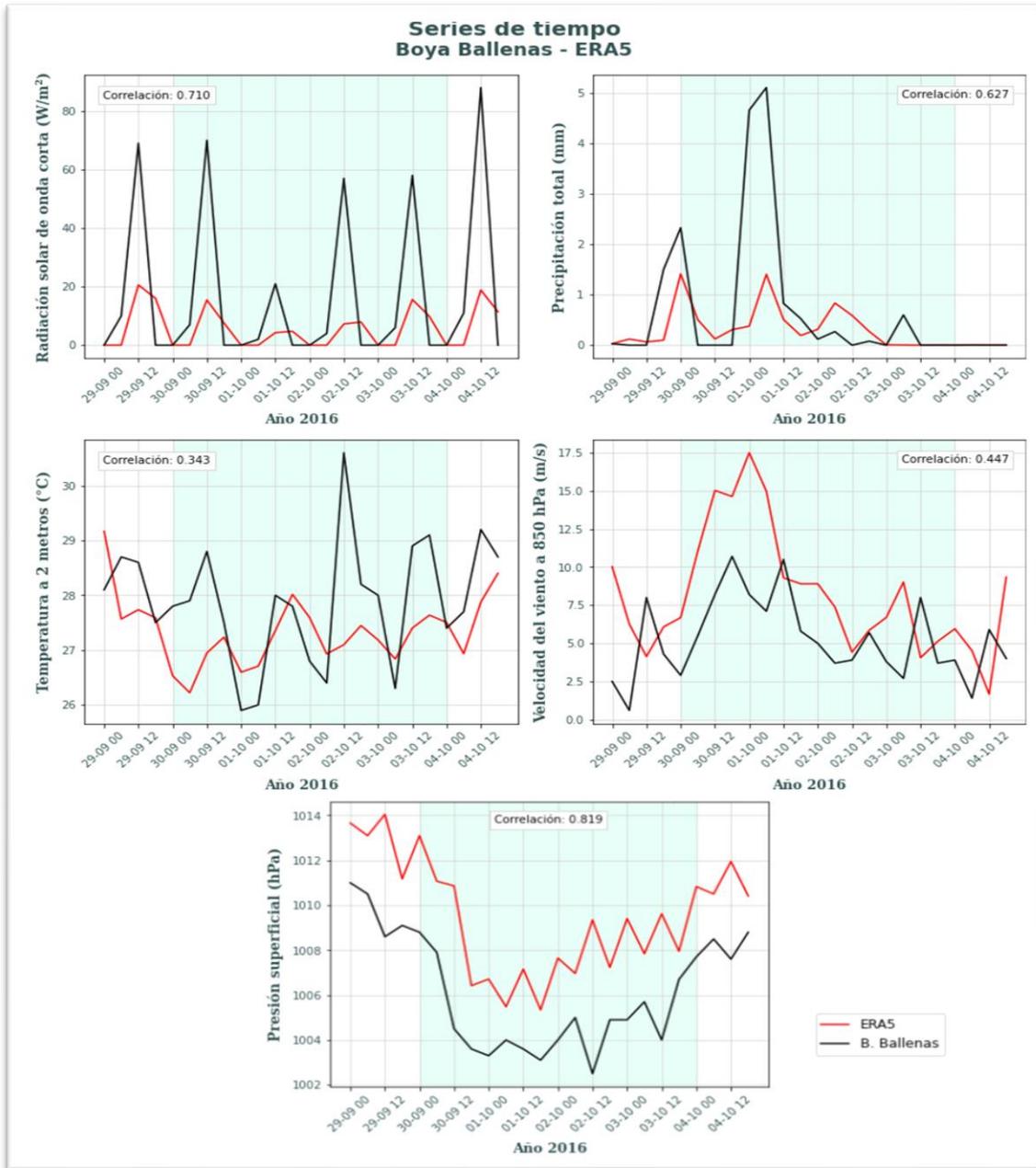


Figura 9. Series de tiempo de radiación solar de onda corta, precipitación total, temperatura a 2 metros, velocidad del viento a 850 hPa y presión superficial durante el 29 de septiembre y el 4 de octubre de 2016, según los registros de la boya Ballenas (línea negra) y el reanálisis ERA5 (línea roja).

Por otro lado, las presiones en la boya de Puerto Bolívar muestran valores alrededor de 1002 hPa mientras que en Ballenas sugieren valores de 1003 hPa (**Figura 9**) durante los días de paso del huracán sobre la región. Estas dos boyas se encuentran a una distancia de aproximadamente 103 km, siendo una distancia corta si consideramos un fenómeno de mesoescala como lo es un huracán. Es por esto que estas boyas sugieren valores similares; sin embargo, se nota un pequeño cambio que posiblemente represente la distancia a la cual se encuentran las boyas y refleja la reducción de los efectos del huracán al alejarse de su centro.

La relación entre el comportamiento de los datos de ERA5 con los registros obtenidos de estas boyas sugiere correlaciones altas para la presión, de 0.939 para Puerto Bolívar y de 0.819 para Ballenas, mientras que se identifican correlaciones bajas para la temperatura a 2 metros, de 0.510 en Puerto Bolívar con y de 0.343 en Ballenas.

Adicionalmente, en las primeras horas del 1 de octubre, se reportó la mayor cercanía del huracán a la zona de estudio, en concreto al cabo de Punta Gallinas (Uribia), y a su vez, el aumento en la categoría del huracán. Para este mismo periodo, el comportamiento de la velocidad del viento a 850 hPa en ambas boyas tuvo una tendencia opuesta a las demás variables, ya que tendió al aumento mientras el huracán se acercaba. Al llegar el 1 de octubre, se registró el pico de valor máximo, con un valor de 10 m/s para la boya Puerto Bolívar y de 18.7 m/s para ERA5. Por su parte, para la boya Ballenas se registró un máximo de 11.2 m/s mientras que para ERA5 se identifica un máximo de 17.5 m/s, como se puede observar en la **Figura 8** y **Figura 9**.

Los valores de estas variables coinciden con la presencia del huracán en zonas cercanas, ya que al acercarse a la zona de estudio y al aumentar su categoría, se generan centros de bajas presiones que desde las inmediaciones del huracán hacen que confluyan los vientos, formando un giro en el sentido opuesto a las manecillas del reloj y provocando el aumento de las precipitaciones debido al movimiento de las masas oceánicas. Esto a su vez, causa la disminución de las temperaturas por la gran cantidad de evaporación que ocurre.

No obstante, para la boya de Caribe Central (**Figura 10**), las condiciones en las variables toman un comportamiento diferente en la temperatura a 2 metros. Para esta boya, se registran valores de temperatura alrededor de 29°C, siendo casi 2°C más cálidos que los registrados por ERA5, y que corresponde a la correlación más baja entre los registros de temperatura de la boya y el reanálisis (0.542).

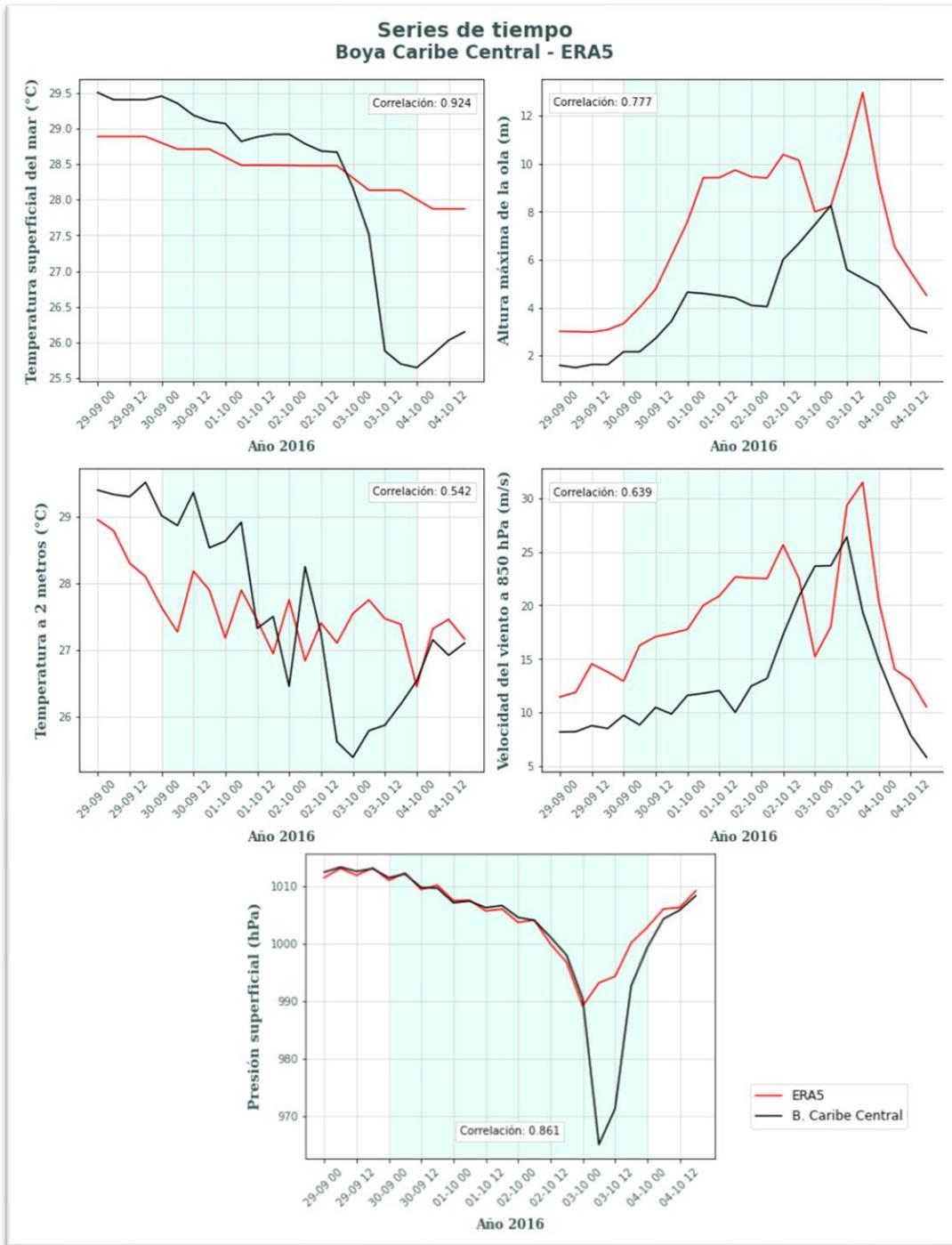


Figura 10. Series de tiempo de temperatura superficial del mar, altura máxima de la ola, temperatura a 2 metros, velocidad del viento a 850 hPa y presión superficial durante el 29 de septiembre y el 4 de octubre de 2016, según los registros de la boya Caribe Central (línea negra) y el reanálisis ERA5 (línea roja).

El comportamiento general de las series de tiempo es similar entre cada una de las boyas y la información del reanálisis ERA5. Sin embargo, en la información de la boya Ballenas se presentan picos con valores anormales en comparación con los datos de ERA5, en específico para la variable precipitación que presentó valores entre 4.8 y 5.2 mm/hora entre las 0:00 y las 6:00 horas, mientras que los valores de ERA5 variaron entre 0.5 y 1.2 mm/hora.

Para esta boya, la radiación de onda corta osciló durante cada día, con mayores valores alrededor del mediodía y menos valores hacia las horas de disminución y ausencia de radiación solar. Los datos medidos in situ varían entre los 48 y los 85 W/m² para el mediodía, mientras que para ERA5 los valores varían entre 10 y 20 W/m². Lo anterior se exceptúa para el 1 de octubre, pues para este día se registró un menor valor (alrededor de 20 W/m²) en la boya Ballenas hacia las horas del mediodía. Esto puede deberse a que horas antes se identificó la mayor influencia del huracán en la zona; de hecho, 6 horas antes se presentó el mayor valor de precipitación, dejando efectos incluso 12 horas después del paso del huracán.

Una vez alcanzada su máxima cercanía con la zona de estudio, el huracán Matthew se desplazó hacia el noreste. Este movimiento se ve reflejado en las estaciones de Puerto Bolívar y Ballenas dado el aumento en las variables de presión superficial y temperatura a 2 metros y la disminución en los valores de precipitación total y vientos a 850 hPa, dando indicios de que el huracán se estaba alejando de esta zona. Para el día 2 de octubre, alrededor del mediodía, se evidencia que los datos de las boyas Ballenas y Puerto Bolívar tienden a seguir un patrón más estable en comparación con los valores identificados durante el paso del huracán, evidenciando un aumento de las temperaturas. Por otro lado, la boya Caribe Central registró la disminución de la temperatura superficial y el aumento de la presión superficial, demostrando el desplazamiento del huracán hacia zonas más alejadas.

Según Stewart (2017), el día 3 de octubre a las 06:56 UTC, el centro de Matthew pasó por la boya Caribe Central. Esta boya muestra una alteración en el patrón de comportamiento de las variables registradas a partir de las últimas horas del 2 de octubre, cuando la temperatura superficial del mar y la presión superficial empezaron a disminuir 24 horas antes de su llegada. Además, los vientos a 850 hPa tuvieron un aumento significativo al acercarse el huracán hacia esta boya. En particular, se identifica una ausencia de datos alrededor de la hora en la que el huracán pasó por

esta boya, dando indicios de que las velocidades fueron muy altas para ser registradas por el sensor dispuesto.

Para esta boya se registraron valores de precipitación total elevados mientras que en las otras boyas de la zona de estudio se identifican valores muy bajos. Es probable que esto se deba a la cercanía que tuvo el huracán con la boya Caribe Central mientras que en el caso de las otras dos boyas se tuvo una mayor lejanía. Para el 2 de octubre se evidencian comportamientos habituales de los valores de las variables en las boyas de Bolívar y Ballenas, con un aumento para las variables de presión superficial y temperatura a 2 metros y una disminución para la velocidad del viento, tanto para los datos de la boya como para el reanálisis ERA5. Adicionalmente, se puede identificar un rezago entre los efectos producidos por el huracán hacia la posición de las boyas Puerto Bolívar y Ballenas con respecto a la boya Caribe Central, con una diferencia de aproximadamente 18 horas.

Se observa que los datos de las boyas in situ y de ERA5 coinciden con respecto al comportamiento general de las variables disponibles. En general, la mayoría de las correlaciones entre los registros de las boyas y ERA5 están por encima de 0.6, llegando a 0.9 para el caso de la presión superficial, mostrando que se puede tener confianza en la mayoría de variables estimadas por ERA5. Sin embargo, se identifica una menor dispersión en los datos de ERA5, los cuales sobreestiman las diferentes variables con respecto a los datos in situ. Para el 4 de octubre, se identifica una estabilización de las variables en la boya Caribe Central, luego del paso del huracán.

Análisis de datos de calidad del agua in situ

Teniendo en cuenta que los pastos marinos son estructuras sensibles al efecto del paso de sistemas de tormentas y considerando su sensibilidad ante cambios fisicoquímicos en el agua (Cruz et al., 2019), se tomaron datos de REDCAM, perteneciente al INVEMAR. A partir de esta información, se tomaron datos de salinidad, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales (SST), temperatura superficial y pH. Con esta información, se estudiaron los cambios fisicoquímicos en la calidad del agua durante el paso del huracán Matthew y las posibles afectaciones sobre los pastos, teniendo en cuenta los factores de afectación de cada uno. Estos registros se tomaron durante el periodo comprendido entre los meses de abril y diciembre de 2016.

Como se observa en la **Figura 11**, la salinidad superficial del agua tuvo una variación notable durante el año 2016. Los muestreos tomados en abril indican valores de 36.3 g/l mientras

que los registros de diciembre sugieren valores alrededor de 35.8 g/l. Las salinidades más bajas se reportan para este último periodo, probablemente ocasionadas por las altas precipitaciones que pasaron el umbral habitual durante los meses de septiembre-octubre-noviembre con la llegada de los efectos del huracán Matthew, y en diciembre con la presencia de una condición tipo “La Niña” (IDEAM, 2016).

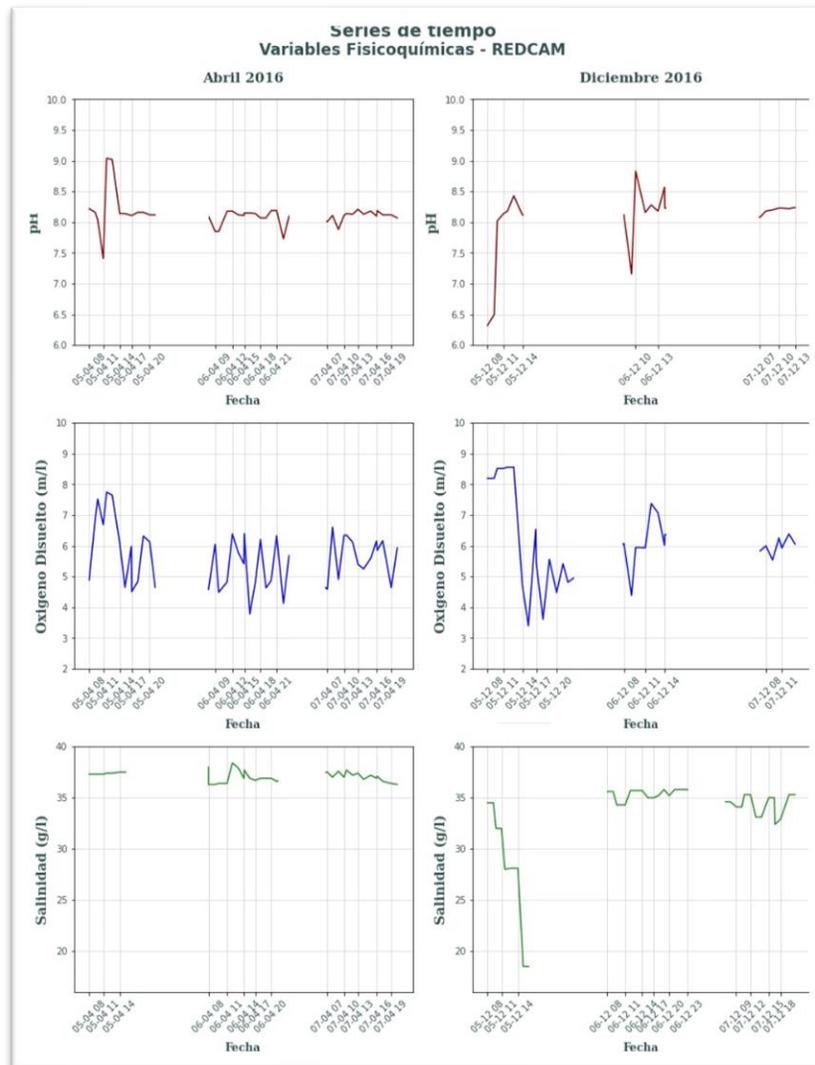


Figura 11. Series de tiempo de pH, oxígeno disuelto y salinidad durante el periodo abril 2016 - diciembre 2016, según el reporte de REDCAM para el año 2016.

La salinidad es la causante de la variación en la correcta adaptación de las praderas, debido a que modifica la fisiología de estas y así, contribuye al cambio en la distribución de estos

ecosistemas, generando parches al momento de presenciar cambios abruptos en sus valores (Herzka et al., 2020). Durante el 2 de octubre se registraron los mayores valores de precipitación (14.7 mm/día), por lo que aumenta la mezcla de sales, provocando la disminución de estas y, por lo tanto, se genera un ambiente más estable para la presencia de las praderas marinas. Sin embargo, en esta zona se registran grandes aportes de vertimientos que pueden provocar aumentos de los valores de salinidad.

Por otro lado, el oxígeno disuelto es una variable relevante para estimar la producción de un ecosistema, en especial para los pastos marinos. Así, un ambiente con alta concentración de oxígeno crea una buena distribución de este elemento hacia la planta y, a su vez, genera un ambiente adecuado para el crecimiento de microorganismos en sus raíces, contribuyendo a la transformación de la materia orgánica (Herzka et al., 2020). Según Garcés et al. (2016), este parámetro tuvo un registro de cambio drástico en sus valores sobre la región de la Guajira para los años 2007 y 2011. Sin embargo, para los años 2015 y 2016, no se identificó un cambio drástico, aunque se detectó una disminución.

Para abril de 2016, los valores de oxígeno disuelto variaron alrededor de 4.6 mg O₂/L, que corresponden a valores bajos en comparación con el año anterior. Para diciembre de este año se registraron valores de 4.39 mg O₂/L (**Figura 11**) para la alta Guajira, lo que significa que, aunque están por encima del mínimo permisible para la preservación de la flora y fauna, se evidencia un consumo de oxígeno por parte de la materia orgánica presente en la zona, producto de las actividades de vertimientos.

Las concentraciones de SST fluctuaron entre <4.2 y 210 mg/L para el primer semestre de 2016, y la mayor concentración de SST fue registrada en la Alta Guajira, en específico en la boya Puerto Bolívar (misma estación de los numerales anteriores) con valores de 210 mg/L, calificando, según la escala de CONAGUA (2015) como agua contaminada. Para el segundo semestre del año, se nota un aumento en la oscilación de los valores, registrando fluctuaciones entre 4.3 y 472 mg/L. En particular, para el departamento de La Guajira, un 23% de las aguas se mantuvieron en un rango de aguas contaminadas, con valores entre 150-400 m/L, y el porcentaje restante entre aceptable y buena calidad (Garcés, et al., 2016).

El comportamiento anterior ha sido previamente identificado en las estaciones REDCAM para el departamento de La Guajira, debido a que en los meses de septiembre-diciembre se da la

temporada de lluvias, por lo que ocurren mayores precipitaciones que se encargan del arrastre de sólidos provenientes del caudal de los ríos y de aportes de los usos de suelo en la región, por ejemplo, asociados a las zonas ganaderas, agrícolas y urbanas. El aporte de estos sólidos trae interferencias en la productividad primaria de los ecosistemas, ya que son un impedimento para la correcta penetración de la radiación solar.

La temperatura superficial para abril 2016 tuvo valores entre 27.3°C y 29.3°C, los que se consideran bajos para la región y se asocian al régimen de vientos alisios y el fenómeno de surgencia que tienen las aguas oceánicas en esta época, teniendo menor temperatura las aguas que surgen a comparación de las superficiales. Para finales del año 2016, la temperatura superficial osciló alrededor de 29.2 °C. Este parámetro influye en las tasas de producción de las praderas marinas, ya que aporta en la obtención de nutrientes que son determinantes para las tasas de crecimiento de las plantas (Herzka et al., 2020).

Por su parte, el pH en el agua describe la cantidad de carbono no inorgánico disuelto disponible para la absorción de las plantas y, por lo tanto, los cambios que se pueden producir a nivel fisiológico por un adecuado proceso de fotosíntesis. Los pastos marinos pueden presentar dificultades en la asimilación de nitrógeno inorgánico ya que, al modificar el pH a valores menores de 7.5, se disminuyen las tasas de nitrificación en los sedimentos y, por lo tanto, la disponibilidad de dicho elemento (Strauss et al., 2002).

Para el primer periodo del año 2016, se presentaron valores de pH entre 7.27 y 9.02 para la región de interés, que en su mayoría se encuentran dentro del rango apto para la preservación de flora y fauna en aguas cálidas dulces y marinas y estuarinas. Sin embargo, en La Baja Guajira se registró un valor por encima de este límite (9.02), el cual ha sido el más alto históricamente. Para diciembre de 2016, los valores de pH oscilaron entre 6.32 y 8.83, registrando valores por encima del índice de calidad de preservación en Manaure, con valor de 8.83.

Análisis de la distribución de los pastos marinos en Uribia

Mediante las imágenes satelitales, se demarcaron seis cuadrantes basados en la revisión de antecedentes contextuales del área de estudio, con el objetivo de optimizar la precisión en la interpretación y análisis de los datos obtenidos. Con base en los cuadrantes establecidos, se definió

una extensión de pastos marinos aproximada de 74.9 km² anteriores al evento y 57.2 km² posteriores al evento.

Descripción de cuadrantes

A partir de lo anterior, se observaron diferentes escenarios a lo largo de la demarcación. Para los cuadrantes 1, 2 y 6, el análisis de las imágenes y posterior delimitación a lo largo de la línea costera estuvo sujeta a la claridad de la observación de las zonas con praderas, por lo que, en las zonas costeras externas al municipio, se delimitaron áreas dentro de 500 metros aproximados perpendicularmente desde la playa. Por otro lado, para los cuadrantes 3, 4 y 5, debido a que son zonas constituidas principalmente por bahías, se identificó con mayor precisión las extensiones de pastos por la menor profundidad del mar y la mayor claridad en las imágenes.

En el sector comprendido dentro del cuadrante 1, se evidenció, que antes del evento del huracán, el ecosistema de pastos marinos presentaba un área con forma alargada y paralela a la playa, separándose en cuatro segmentos. Tras el evento, el área de pastos marinos adoptó una forma con mayor amplitud, cubriendo una longitud casi equivalente a la medición anterior. Este cambio se debió a la fusión de algunos segmentos, que resultó en la formación de tres secciones distintas. Los escenarios anteriores, presentaron diferencias en su forma y área, dando como resultado una diferencia de aproximadamente 12.20 km², con la particularidad de que se tuvo un aumento para el periodo posterior al evento, como se observa en la **Figura 12**.

Lo mencionado se puede reflejar en la distancia con respecto al lugar de paso del huracán, ya que, en comparación con las zonas más cercanas, la región en cuestión no experimentó daños significativos. Esta observación se alinea con la alteración de las variables meteorológicas y oceanográficas, evidenciando que las zonas situadas en proximidad directa al evento sufrieron efectos más notorios.

El cuadrante 2 mostró una delimitación de polígonos similar para el periodo antes y después del evento; debido a la turbidez del fondo marino y nubosidad en las imágenes descargadas, no se contó con una delimitación de la totalidad de las áreas de pastos marinos existentes en la caracterización realizada por INVEMAR. La diferencia de áreas para el periodo antes y después del evento fue de 0.028 km², aproximadamente, con una disminución para el periodo posterior al evento.

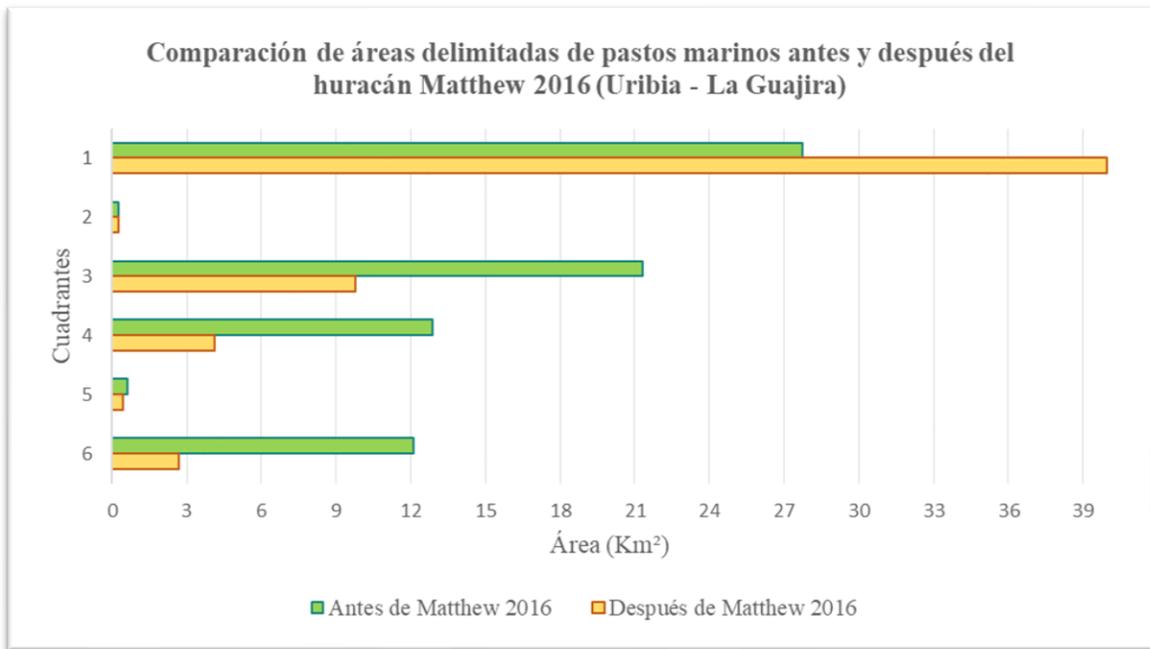


Figura 12. Comparación de áreas delimitadas de pastos marinos antes y después del huracán Matthew 2016 (Uribia - La Guajira).

Para el cuadrante 3, 4 y 5, se reflejan áreas de pastos bien demarcadas a lo largo de las bahías que abarcan, principalmente en Bahía Portete, Hondita y Cocinetas (**Figura 13**). En estas zonas predomina una alta densidad de praderas marinas y se obtuvo una mejor visualización y análisis debido a que cuentan con agua más clara y menos turbulenta que las zonas abiertas del mar, lo que permite que la radiación solar penetre mejor y se refleje en los pastos. Para estos cuadrantes se contó con una diferencia entre las áreas de aproximadamente 11.56 km², 8.75 km² y 0.17 km², respectivamente, siguiendo la tendencia de disminución después del paso del evento.

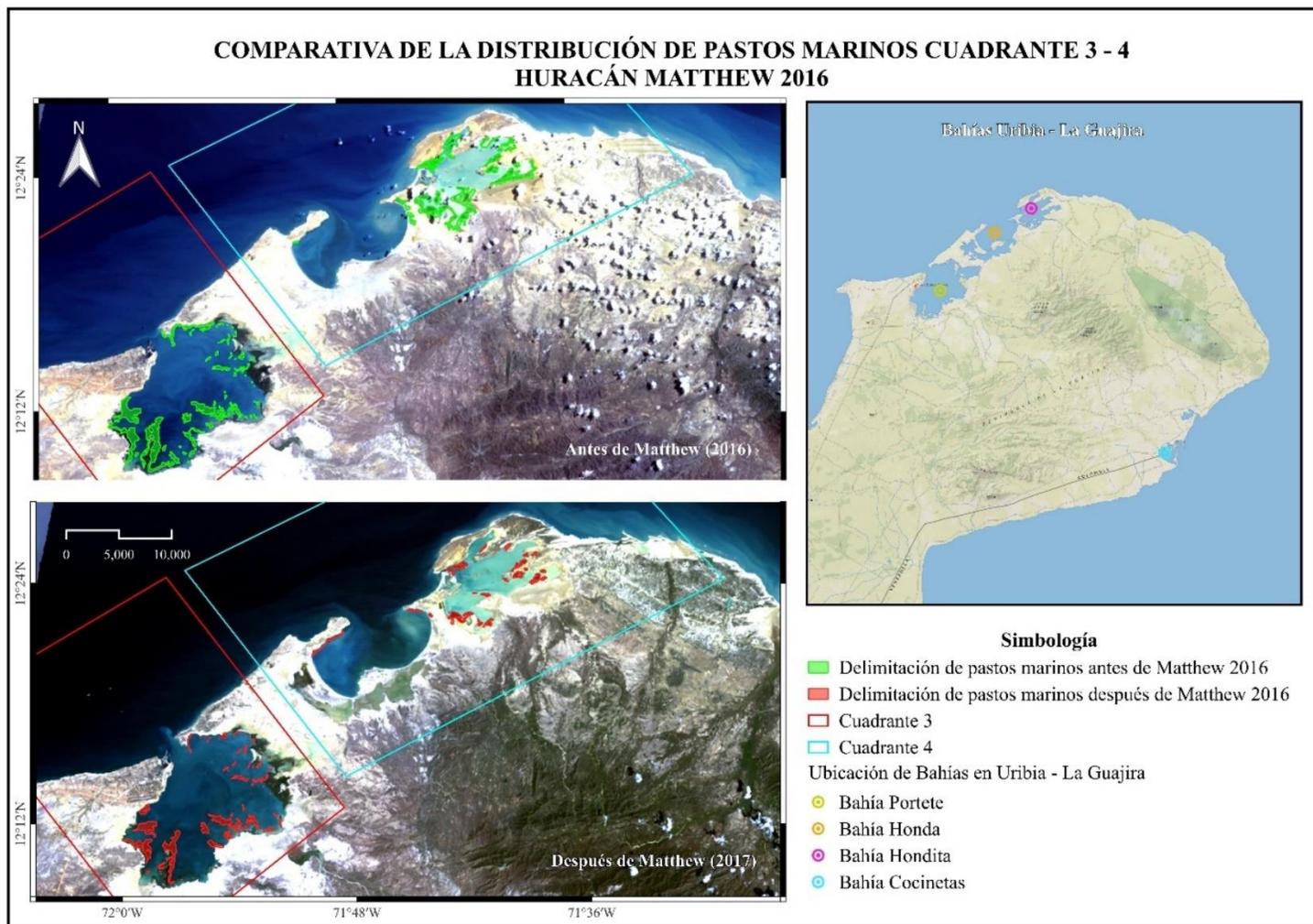


Figura 13. Observación de manchas de pastos marinos demarcada desde imágenes satelitales para a) cuadrante 3 (Bahía Portete), b) cuadrante 4 (Bahía Hondita) y c) cuadrante 5 (Bahía Cocinetas).

Para el cuadrante 6, la delimitación de las áreas con presencia de pastos marinos se dificultó por la abundancia de sedimentos en la zona, lo cual impide una demarcación clara de sus bordes. A pesar de lo anterior, se evidenció que las áreas de pastos en esta zona se distribuyen en pequeños fragmentos a lo largo de cercanías a la playa, con una disminución para el periodo posterior al huracán de 9.43 km².

Densidad y cobertura de las praderas marinas

Las praderas de pastos marinos constituyen un ecosistema altamente sensible a las variaciones en las condiciones ambientales circundantes, por lo que son consideradas como especies indicadoras. En consecuencia, su supervivencia se ve comprometida durante episodios de perturbación. Además, estas praderas presentan una recuperación fisiológica lenta, lo cual complica aún más su proceso de permanencia y restauración (Herzka et al., 2020). Es por esto que las condiciones de densidad y cobertura suelen tener cambios dinámicos. La **Figura 14** compara los períodos de mayo 2016 y agosto 2016, mostrando que en ambas boyas se observa una diferencia de estas variables, lo que da cuenta de la sensibilidad hacia las condiciones externas al ecosistema.

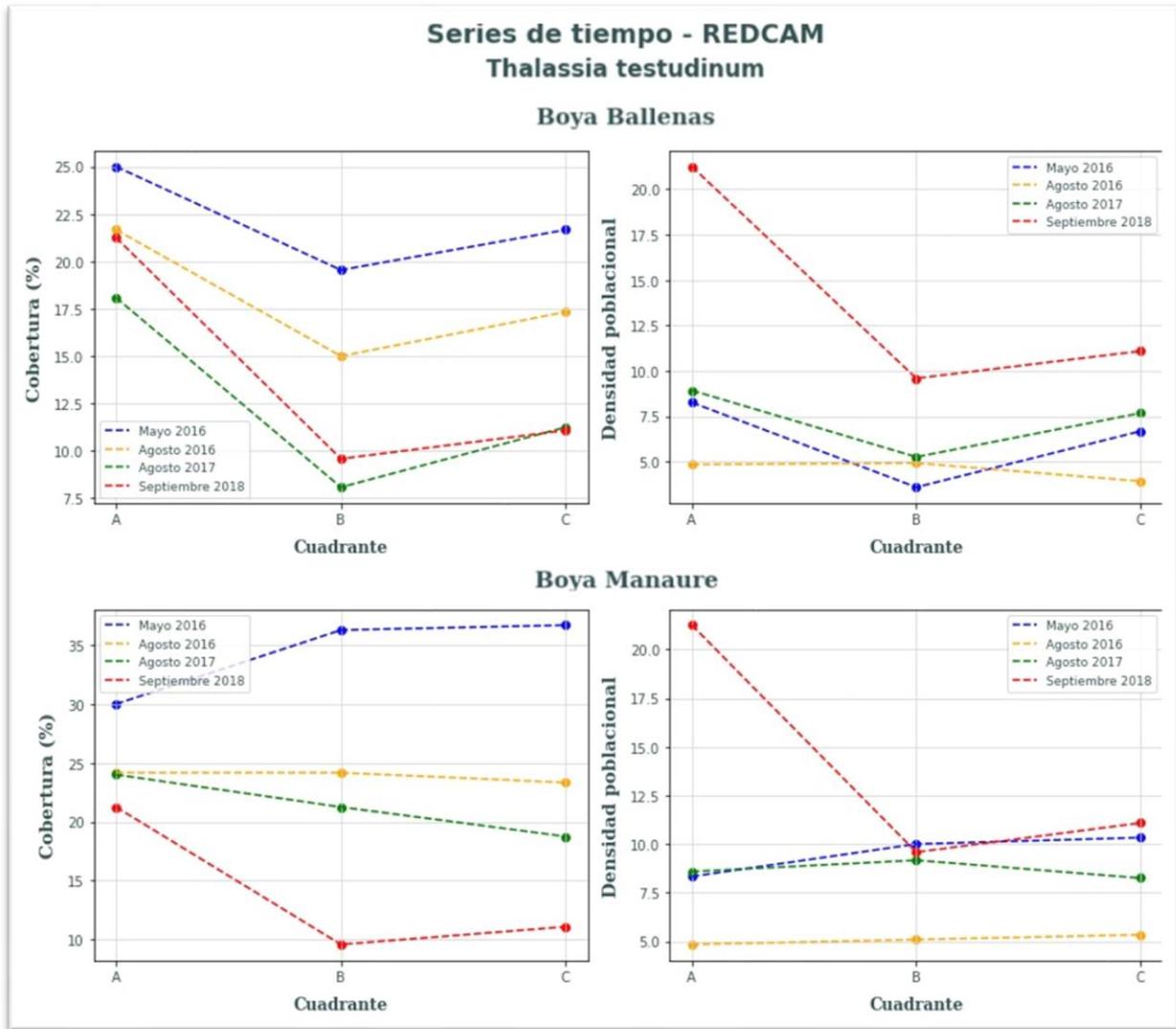


Figura 14. Serie de tiempo de densidad y cobertura de *Thalassia testudinum* para dos periodos anteriores al paso de Matthew (mayo y agosto de 2016) y dos periodos posteriores (agosto 2017 y septiembre 2018).

Para ambas boyas, Ballenas y Manaure, se evidenció una tendencia a la disminución en la cobertura para el período agosto 2016 y agosto 2017. En los tres transectos se observa una tendencia consistente, lo cual sugiere la presencia de perturbaciones que alteraron significativamente la cobertura del ecosistema, resultando en una reducción del área de extensión. Esta observación concuerda con la tendencia general detectada mediante el análisis de imágenes satelitales, que mostró una disminución en la extensión de las áreas de pastos marinos analizadas.

Sin embargo, la densidad poblacional para las boyas demostró una inclinación al aumento para dicho período, mostrando un incremento en el número de vástagos por m², lo cual puede sustentarse en el aumento en la disponibilidad de nutrientes, al arrastre o propagación de fragmentos aledaños provocado por los efectos del huracán.

Relación entre el paso del huracán Matthew y los pastos marinos

El paso del huracán Matthew tuvo consecuencias significativas en las zonas más cercanas, evidenciándose a través de inundaciones y un incremento en los flujos de entrada de agua dulce hacia el mar. Estos eventos alteraron las condiciones fisicoquímicas del entorno, imponiendo estrés al ecosistema y resultando en una reducción de la resistencia fisiológica de las praderas de pastos marinos.

Además, según Arellano et al. (2011), durante los huracanes, las zonas oceánicas sin praderas de *Thalassia testudinum* sufren una rápida pérdida del sustrato. En contraste, en las áreas donde estas praderas están presentes, las hojas ayudan a reducir la velocidad de las corrientes, mientras que los rizomas en los sedimentos estabilizan el sustrato y limitan significativamente la erosión. Lo anterior trae beneficios sobre las zonas aledañas, evitando el arrastre de grandes masas, ayudando así a conservar la estabilidad aún durante eventos de tormenta.

Entre los factores alterados, la salinidad destaca como una variable crucial, ya que modifica el estado fisiológico y la cobertura de las praderas (Herzka et al., 2020). Esta variable tuvo un cambio hacia el momento en la llegada del huracán, cuando se presencié una disminución en sus valores, reflejados en la disminución de la cobertura en sectores de bahías donde las aguas tienden a retenerse por más tiempo y, por lo tanto, permanecer en largas temporadas de estrés. De hecho, según se identifica en este Trabajo de Grado, los sectores de bahías fueron los que perdieron la mayor proporción de pastos marinos con pérdidas de alrededor de 9 a 11 km².

Otro de los factores clave dentro de la reproducción de los pastos es la alta concentración de los niveles de oxígeno disuelto en el agua; sin embargo, para este caso, se obtuvieron valores bajos en el momento del paso del huracán, lo que refleja, de forma similar a la salinidad, un bajo aporte a la reproducción de estos, reflejándose en los mismos sectores.

Después del huracán, los ecosistemas marinos, incluidos los pastos marinos, suelen pasar por un período de recuperación. Así como los huracanes pueden arrancar o romper los pastos

marinos, como se evidencia en la disminución de la cobertura para los años 2016 y 2017 (**Figura 14**), también pueden recolonizar áreas afectadas y comenzar a regenerarse, lo que explica el aumento en la densidad para el periodo después del evento, especialmente si las condiciones se estabilizan y permiten un ambiente propicio para su crecimiento.

Conclusiones

El paso del huracán Matthew causó un impacto notable sobre las condiciones meteorológicas y oceanográficas en las zonas circundantes, con una disminución progresiva de estos efectos a medida que aumentaba la distancia desde el epicentro del huracán. Las alteraciones se manifestaron principalmente en variables como la presión atmosférica, la velocidad y dirección del viento, la altura de las olas, la precipitación total y la cortante vertical del viento. Las anteriores variables experimentaron cambios drásticos en periodos cortos, correlacionándose con las fases de formación, intensificación y desplazamiento del huracán.

Al comparar los datos meteorológicos y oceanográficos provenientes del reanálisis climático ERA5 y boyas in situ durante el paso del huracán Matthew, se observó que los datos extraídos desde ERA5 sobreestiman los valores de las variables analizadas, lo que disminuye la fiabilidad de los datos al ser tomados para escalas menores, como en el caso específico de un punto de medición donde se encuentra una boya. Sin embargo, ERA5 es una herramienta fundamental en el análisis de condiciones a escala del huracán, ya que permitió detallar los cambios de dichas variables.

Adicionalmente, el análisis de los cambios en parámetros fisicoquímicos mostró que las variables presentaron fluctuaciones significativas tras el evento del huracán. Cada parámetro exhibiendo patrones individuales, que impactaron de manera diferenciada en la distribución y condición de los pastos marinos, lo cual está condicionado adicionalmente por las características topográficas específicas de la región.

Colombia cuenta con la existencia de instituciones encargadas del monitoreo de ecosistemas de pastos marinos, sin embargo, las dinámicas de la región de La Guajira impiden un seguimiento constante, especialmente en el caso de este tipo de ecosistemas. En particular, la principal dificultad en la obtención de información fue la recopilación de datos de las estaciones in situ para las variables oceanográficas y meteorológicas. Esto resultó en la necesidad de utilizar boyas de monitoreo ubicadas a mayor distancia para la recolección de datos, ya que las estaciones más cercanas presentaban importantes vacíos de información o carecían de los datos necesarios.

En consecuencia, la falta de información resultó ser un factor crucial en la elaboración de este Trabajo de Grado, dada la naturaleza fluctuante y desafiante de la dinámica social, económica

y política de la región de La Guajira. Esta problemática está asociada tanto a la vulnerabilidad de la región como a la inadecuada intervención estatal, lo cual ha limitado la posibilidad de llevar a cabo estudios detallados y la realización de análisis exhaustivos en estos temas.

Finalmente, se espera que este Trabajo de Grado contribuya a la comprensión de los ecosistemas de pastos marinos y su relación con los ciclones tropicales, fenómenos recurrentes que pueden afectar la región norte de Colombia. Los resultados obtenidos tienen como objetivo subrayar la relevancia de estos ecosistemas y la necesidad de su monitoreo constante. La carencia de información precisa y actualizada dificulta la toma de decisiones informadas y la implementación de estrategias efectivas para la protección de los pastos marinos; además, impide una adecuada evaluación del estado de la biodiversidad, la identificación de amenazas emergentes y la adopción de medidas de protección apropiadas.

Referencias

- Ariza, A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat LDCM (Landsat Data Continuity Mission). Centro de Investigación y Desarrollo – CIAF. IGAC. <https://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>
- Arellano-Méndez, Leonardo U, Liceaga-Correa, María de los Ángeles, Herrera-Silveira, Jorge A, & Hernández-Núñez, Héctor. (2011). Impacto por huracanes en las praderas de *Thalassia testudinum* (Hydrocharitaceae) en el Caribe Mexicano. *Revista de Biología Tropical*, 59(1). 385-401. <https://bit.ly/3XuS6kP>
- Bravo, C. & Hernández, A. (2005). Resumen del Huracán “Katrina” del Océano Atlántico. Comisión Nacional del Agua. México. <http://bit.ly/3AX7LSH>
- CONAGUA. (2015). Monitoreo calidad del agua: escalas de clasificación de la calidad del agua superficial. <https://bit.ly/3AZEhDt>
- Corpoguajira (2000). Plan Básico de Ordenamiento Territorial del Municipio de Uribia, Guajira. <https://bit.ly/3Xw1rca>
- Cruz-Pérez, C. M., Bustamante-López, C., & Hernández-Fernández, L. (2019). State of seagrass in two Northern Key beaches, before and after hurricane Irma passing through the Ciego de Ávila province, Cuba. *Revista Ciencias Marinas Y Costeras*, 11(2), 85-108. <https://doi.org/10.15359/revmar.11-2.5>
- Fourqurean, J. & Rutten, L. (2004). The impact of hurricane Georges on soft-bottom, back reef communities: site-and species-specific effects in soth Florida seagradd beds. *Bulletin of marine science*, 75(2), 239-257. <https://bit.ly/48ENdcG>
- INVEMAR. (2017). Diagnóstico y evaluación de la calidad de las aguas marinas y costeras en el Caribe y Pacífico colombianos. Garcés, O. y L. Espinosa (Eds.). Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia – REDCAM:

-
- INVEMAR, MADS y CAR costeras. Informe técnico 2016. Serie de Publicaciones Periódicas No. 4 (2017) del INVEMAR, Santa Marta. 260 p.
- Gobernación de La Guajira. (2024). La Guajira. Gobernación de Colombia. <https://www.laguajira.gov.co/LaGuajira/Paginas/La-Guajira.aspx>
- Gómez D., Navarrete S., Navas R., Díaz C., Muñoz L. & Galeano E. (2014). Protocolo Indicador Condición Tendencia Praderas de Pastos Marinos (ICTPM). Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP). Invemar, GEF y PNUD. Serie de Publicaciones Generales del Invemar No. 68, Santa Marta. 36 p.
- Guhl, E. (2016). Colombia: Bosquejo de su Geografía Tropical Vol. I. Colombia. Biblioteca Nacional de Colombia. <https://bit.ly/4eq4n0P>
- Guerra Vargas, L. (2018). Evaluación de praderas de pastos marinos como reservorios de carbono: un caso de estudio en el Caribe colombiano. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69664>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *QJR meteorol Soc.*, 146, 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Herzka, S., Zaragoza, R., Peters, E. & Hernández, G. (2020). Atlas de Línea Base Ambiental del Golfo de México. Tomo VI Pastos Marinos. <https://bit.ly/3XjwxDX>
- IDEAM. (s.f.). Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos. Colombia. <https://bit.ly/3wFXTug>
- IDEAM (2020). Boletín de predicción climática y recomendación sectorial. Publicación N° 310. Diciembre de 2020.
- INVEMAR (2014). Atlas de Distribución de Pastos Marinos de Colombia. Laboratorio de Sistemas de Información LabSIS, programa GEZ. <https://bit.ly/47t04j6>

-
- INVEMAR. (2019). Formulación de una propuesta de zonificación de pastos marinos y plan de manejo del Distrito Regional de Manejo Integrado - DRMI de pastos marinos – Sawäirü en el departamento de La Guajira. Santa Marta, 168p.
- IPCC (2014). Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs. <https://bit.ly/47BDbtV>
- IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.
- Millán, S., Bolaños, J. A., García Valencia, C., & Gómez López, D. I. (2016). TELEDETECCIÓN APLICADA AL RECONOCIMIENTO DE PRADERAS DE PASTOS MARINOS EN AMBIENTES DE BAJA VISIBILIDAD: LA GUAJIRA, COLOMBIA. Boletín De Investigaciones Marinas Y Costeras, 45(2). <https://bit.ly/47reqRd>
- Molina, A. (2021). Caracterización del oleaje generado por el huracán Matthew (2016), frente a su paso por la Península de La Guajira, usando datos de reanálisis. Universidad del Norte. <https://bit.ly/3MNf3eo>
- NOAA. (2023). Huracanes Preguntas frecuentes. Laboratorio Oceanográfico y Meteorológico de Atlántico de NOAA. <https://www.aoml.noaa.gov/es/hrd-faq/#when-is-hurricane-season>
- ONU. (2022). Pastos marinos: un arma secreta en la lucha contra el cambio climático. <https://bit.ly/3ToVQ6V>
- Ortíz, Juan. (2007). Huracanes y tormentas tropicales en el mar Caribe colombiano desde 1900. Boletín Científico CIOH. 54-60. <https://bit.ly/3zmlX75>

-
- Strauss, E., Mitchell, N., y Lamberti, G. (2002). Factors regulating nitrification in aquatic sediments: effects of organic carbon, nitrogen availability, and pH. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59(3), 554-563. <https://doi.org/10.1139/f02-032>
- Stewart, S. (2017). National hurricane center tropical cyclone report: Hurricane Matthew. AL14016. National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA). https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL142016_Matthew.pdf
- Underwood, A., Chapman, M. & Roberts, D. (2006). A Practical Protocol to Assess Impacts of Unplanned Disturbance: A Case Study in Tuggerah Lakes Estuary, NSW. Centre for Research on Ecological Impacts of Coastal Cities, Marine Ecology Laboratories A11, University of Sydney, Australia. <https://bit.ly/47reLDt>
- UNEP (2020). Out of the Blue: The value of seagrasses to the environment and to people. <https://bit.ly/3ZteFZY>
- UNGRD. (2013). Informe Temporada de ciclones Tropicales en el Caribe. Gobierno de Colombia. <https://www.gestiondelriesgo.gov.co/snigrd/pagina.aspx?id=238>
- UNGRD. (2017). Informe Segunda Temporada De Lluvias 2016. Gobernación de Colombia. <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/20822>
- U.N.G.R.D. (2020). Huracán Matthew dejó 18.000 familias damnificadas en Colombia. Unidad Nacional Para La Gestión Del Riesgo de Desastres. <https://bit.ly/3V4iNxb>
- UNGRD. (2021). Protocolo Nacional de Alerta por Ciclones Tropicales. Gobernación de Colombia. https://cecoldodigital.dimar.mil.co/2819/1/001_ungrd.pdf
- Van Tussenbroek, B. (2011). Dynamics of seagrasses and associated algae in coral reef lagoons. *Hidrobiológica*, 21 (3), 293-310. <https://bit.ly/3Xr70sE>
- Veloza J. (2011). MODELO HIDROGEOLOGICO DE LA ALTA GUAJIRA. Subdirección de recursos del subsuelo. <https://bit.ly/3TyrbDD>

Anexos

Paneles de variables meteorológicas y oceánicas para el periodo comprendido en el recorrido del huracán Matthew

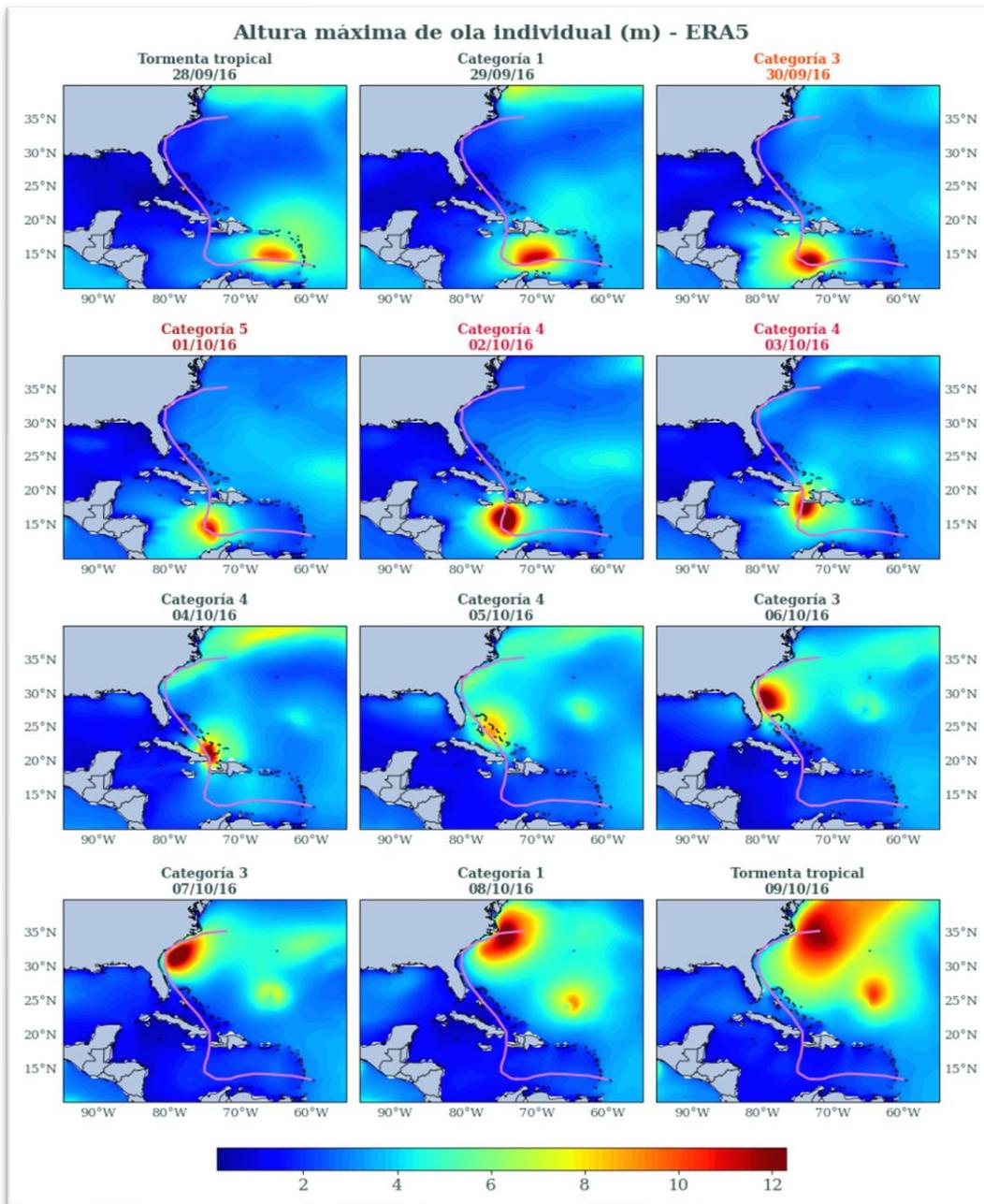


Figura A.1. Altura máxima de la ola entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA5.

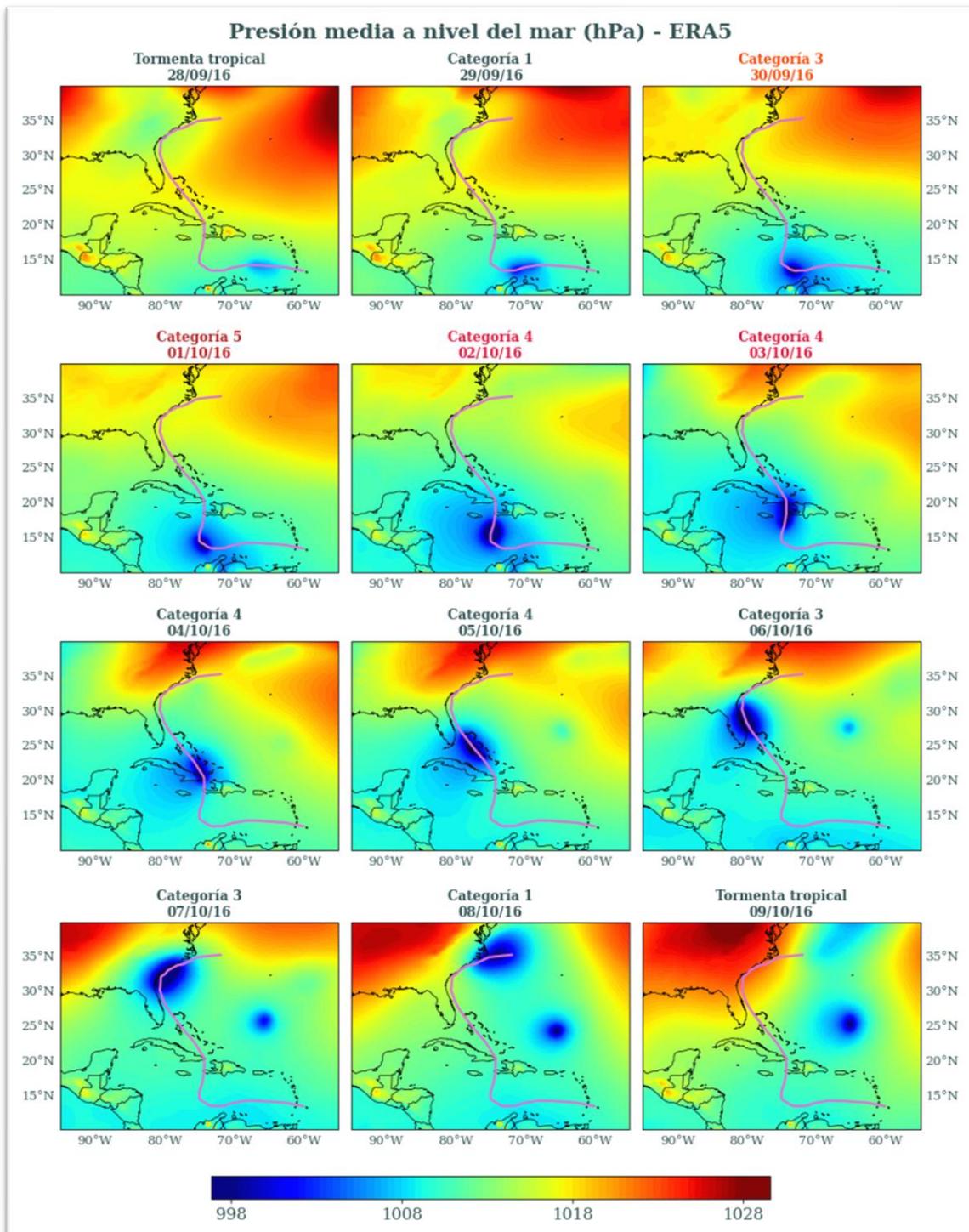


Figura A.2. Presión media a nivel del mar entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA5.

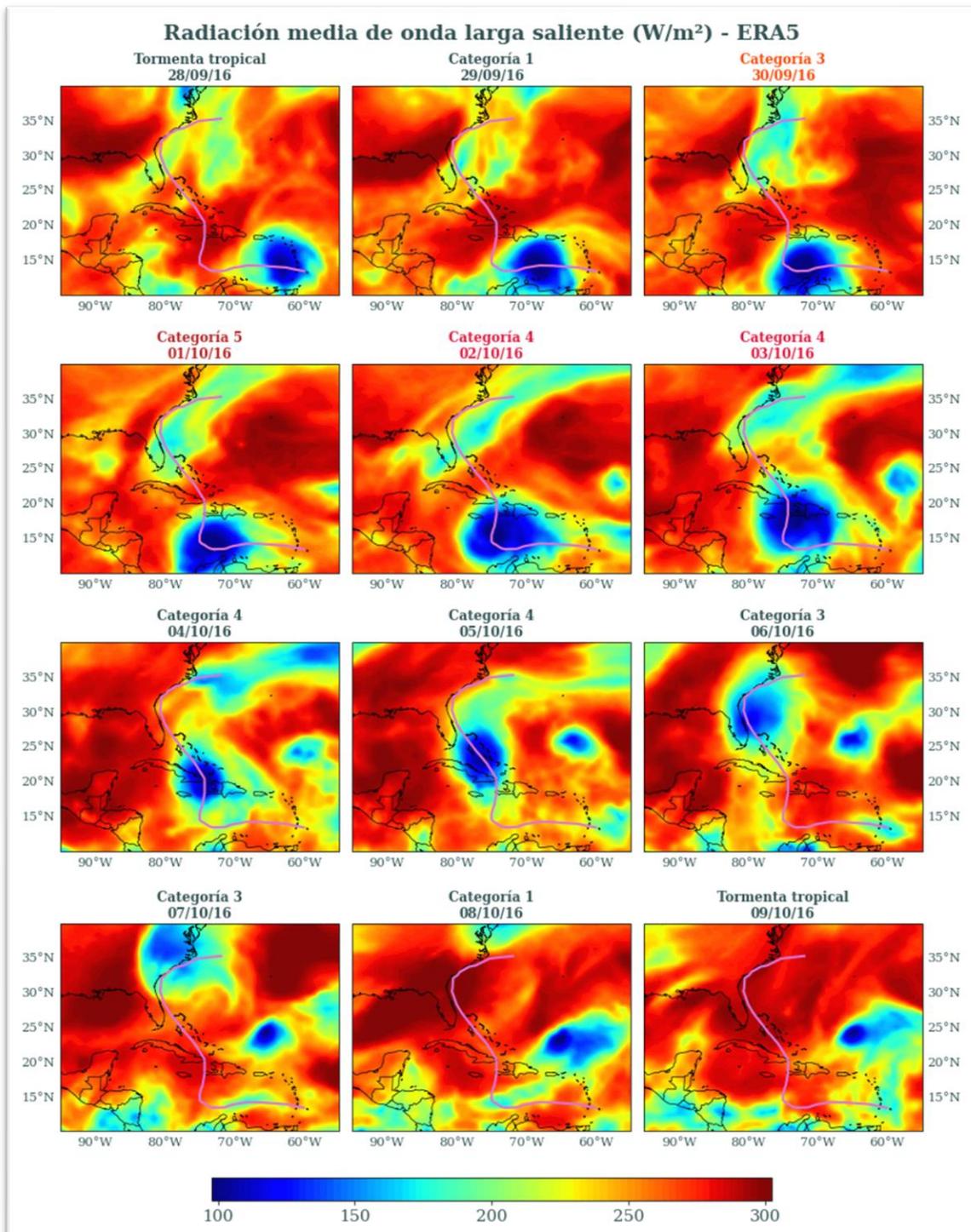


Figura A.3. Radiación media de onda larga saliente entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA5.

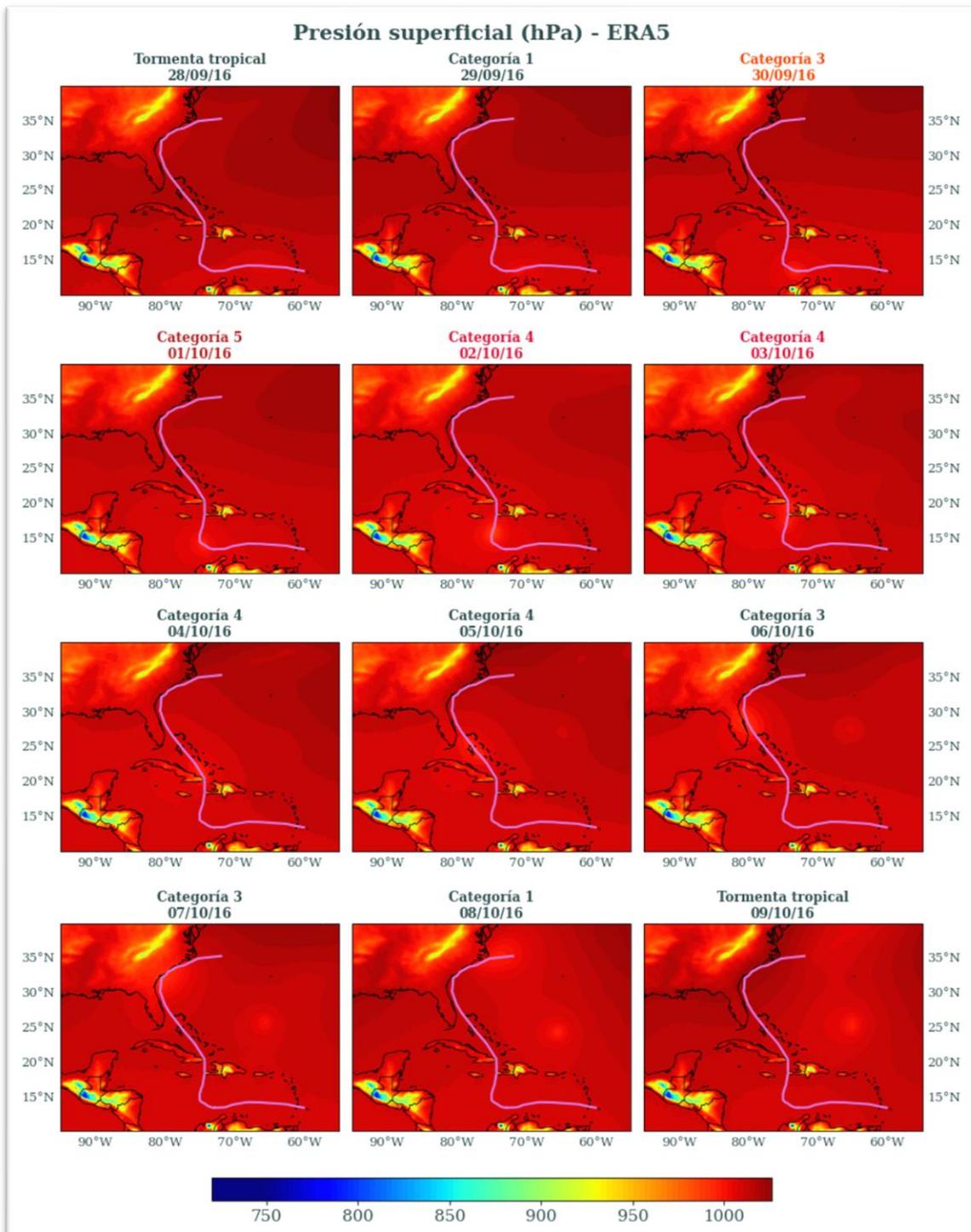


Figura A.4. Presión superficial entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA5.

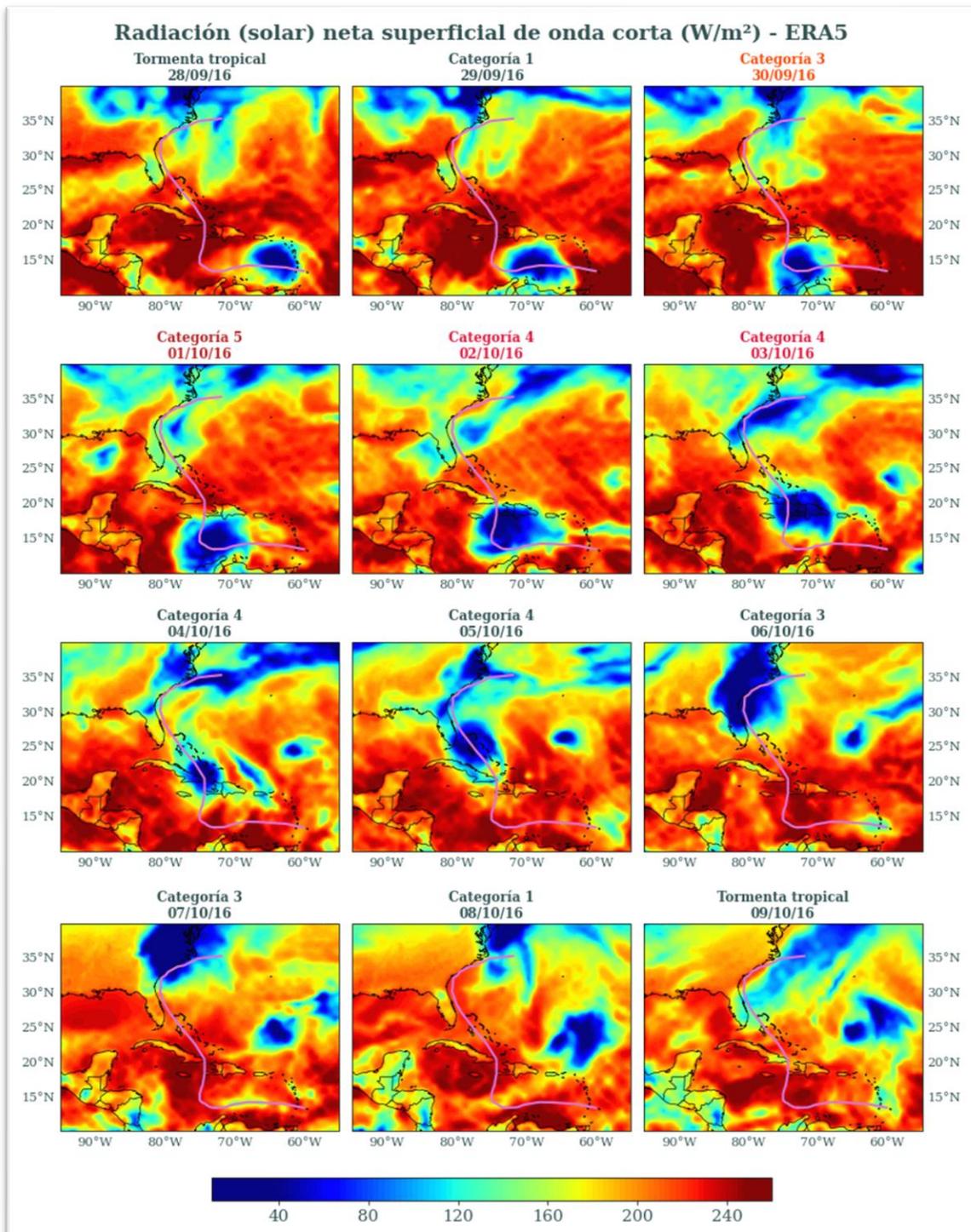


Figura A.5. Radiación (solar) neta superficial de onda corta entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA5.

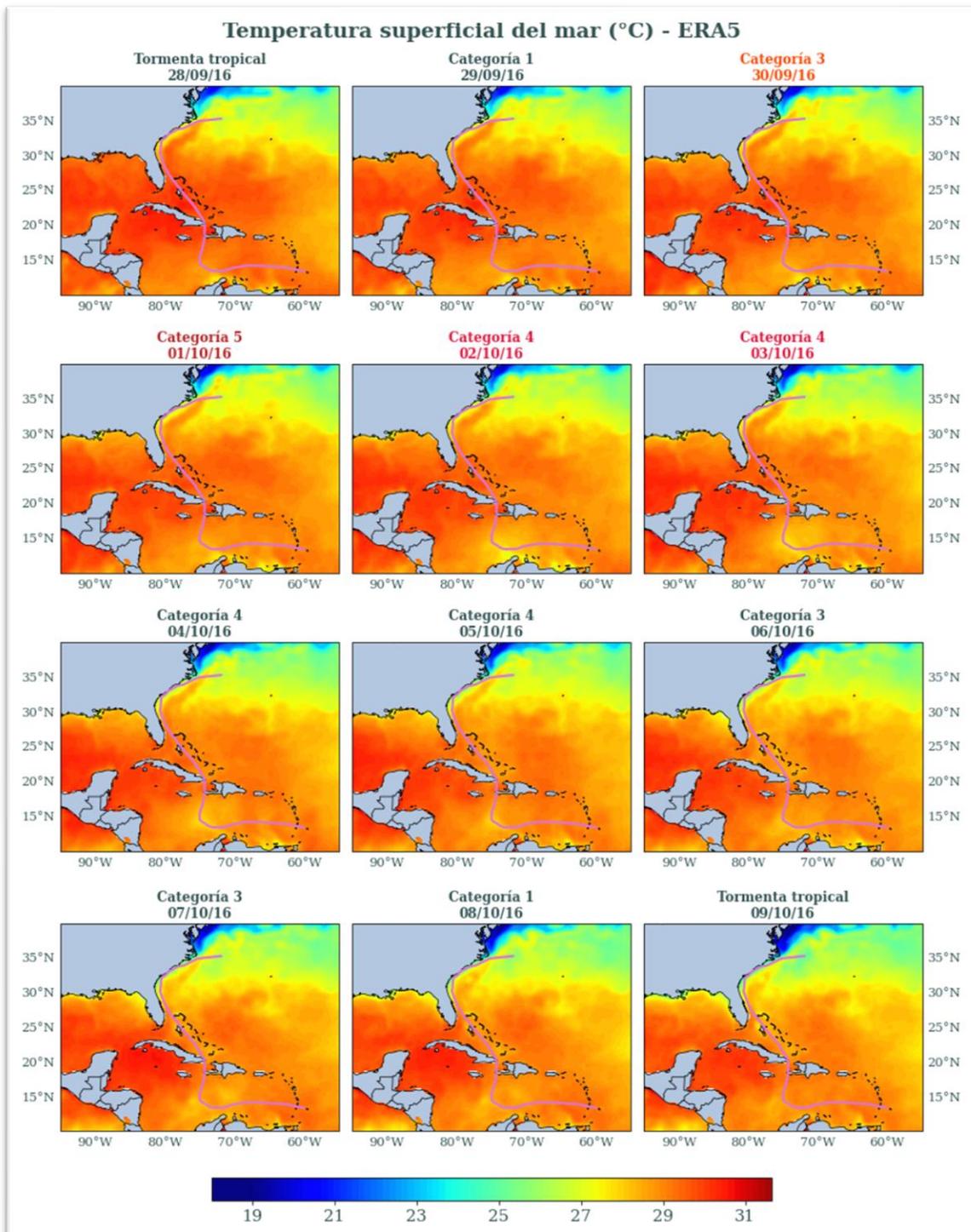


Figura A.6. Temperatura superficial del mar entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA5.

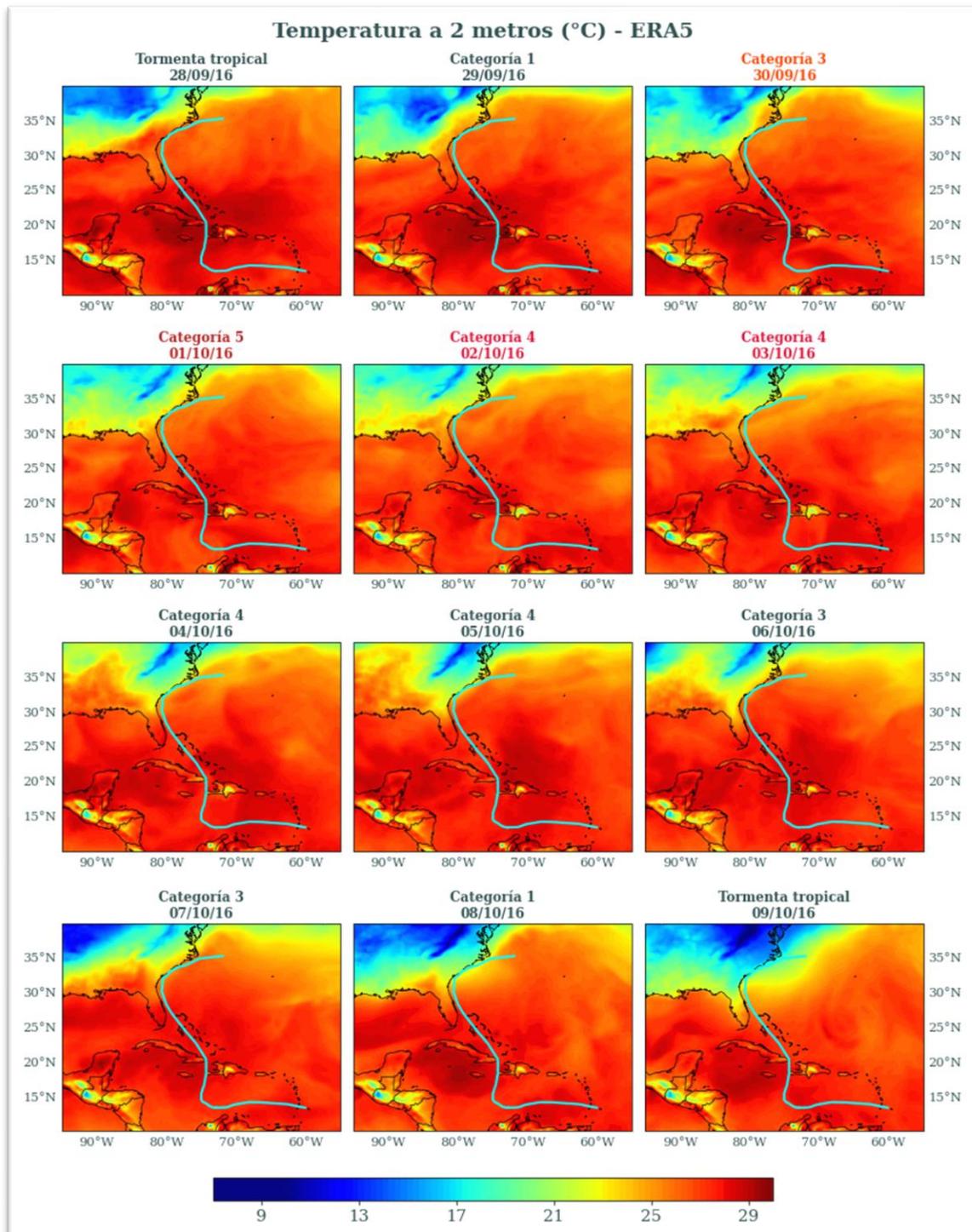


Figura A.7. Temperatura a 2 metros entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA5.

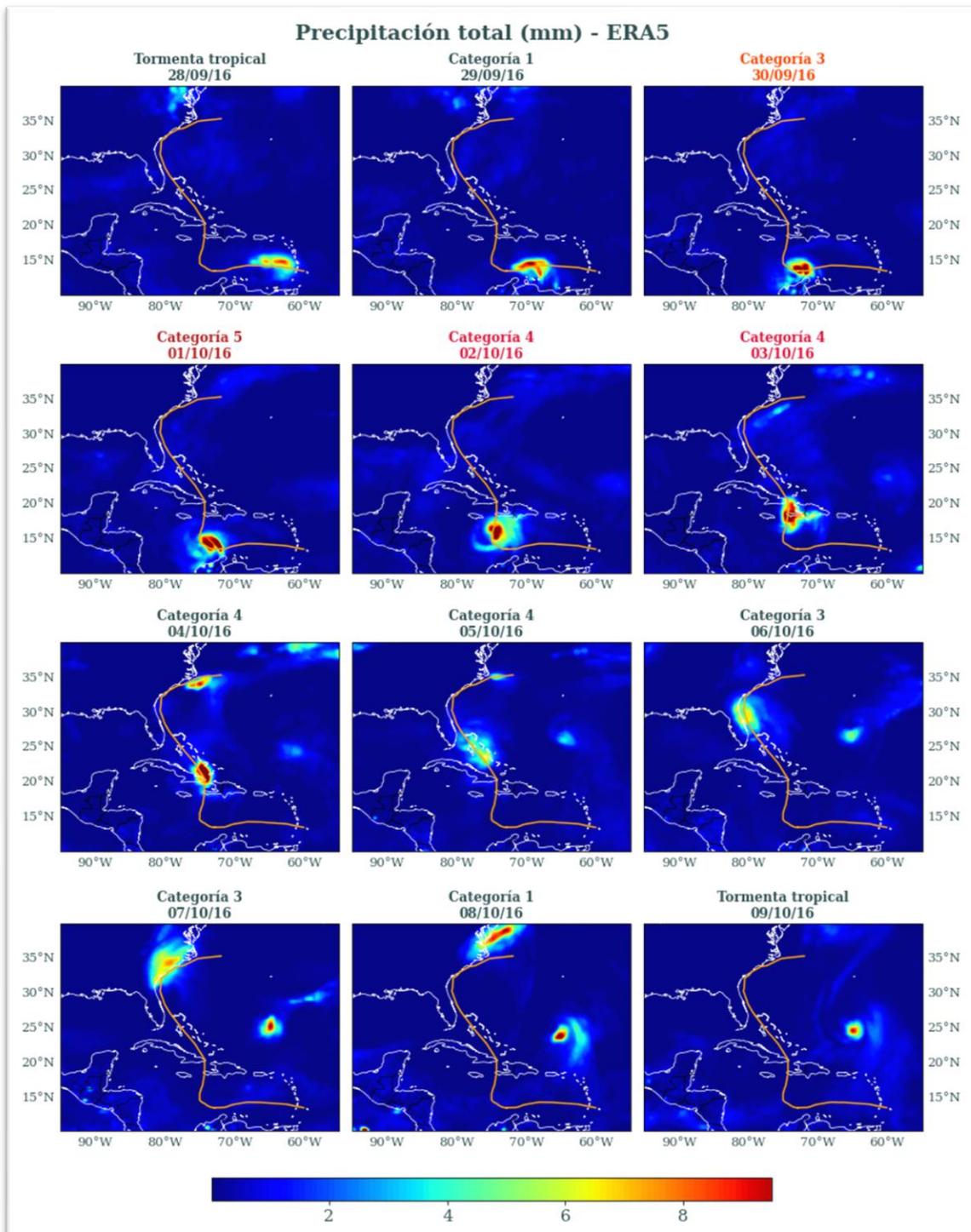


Figura A.8. Precipitación total entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA5.

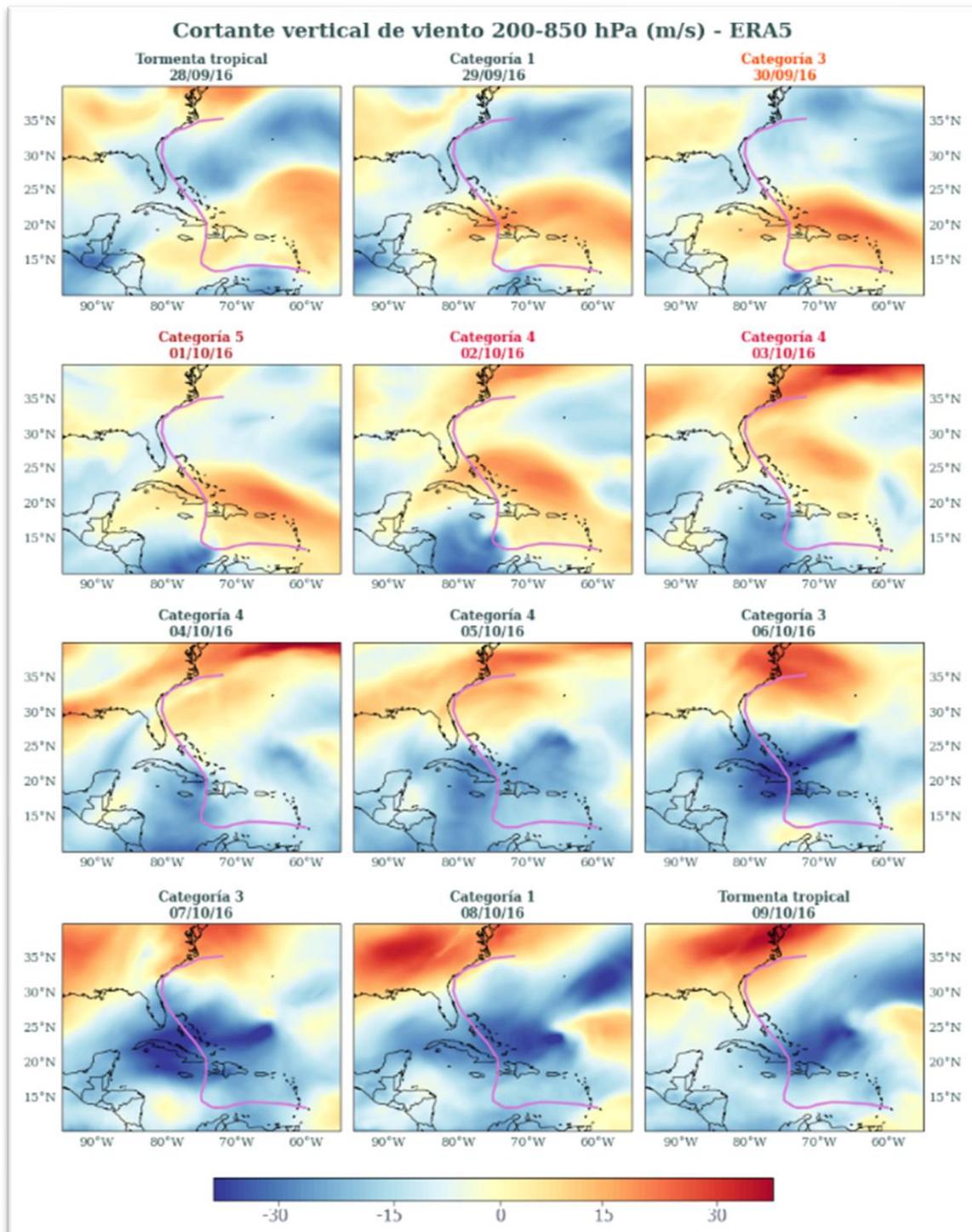


Figura A.9. Cortante vertical del viento (200-850 hPa) entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA5.

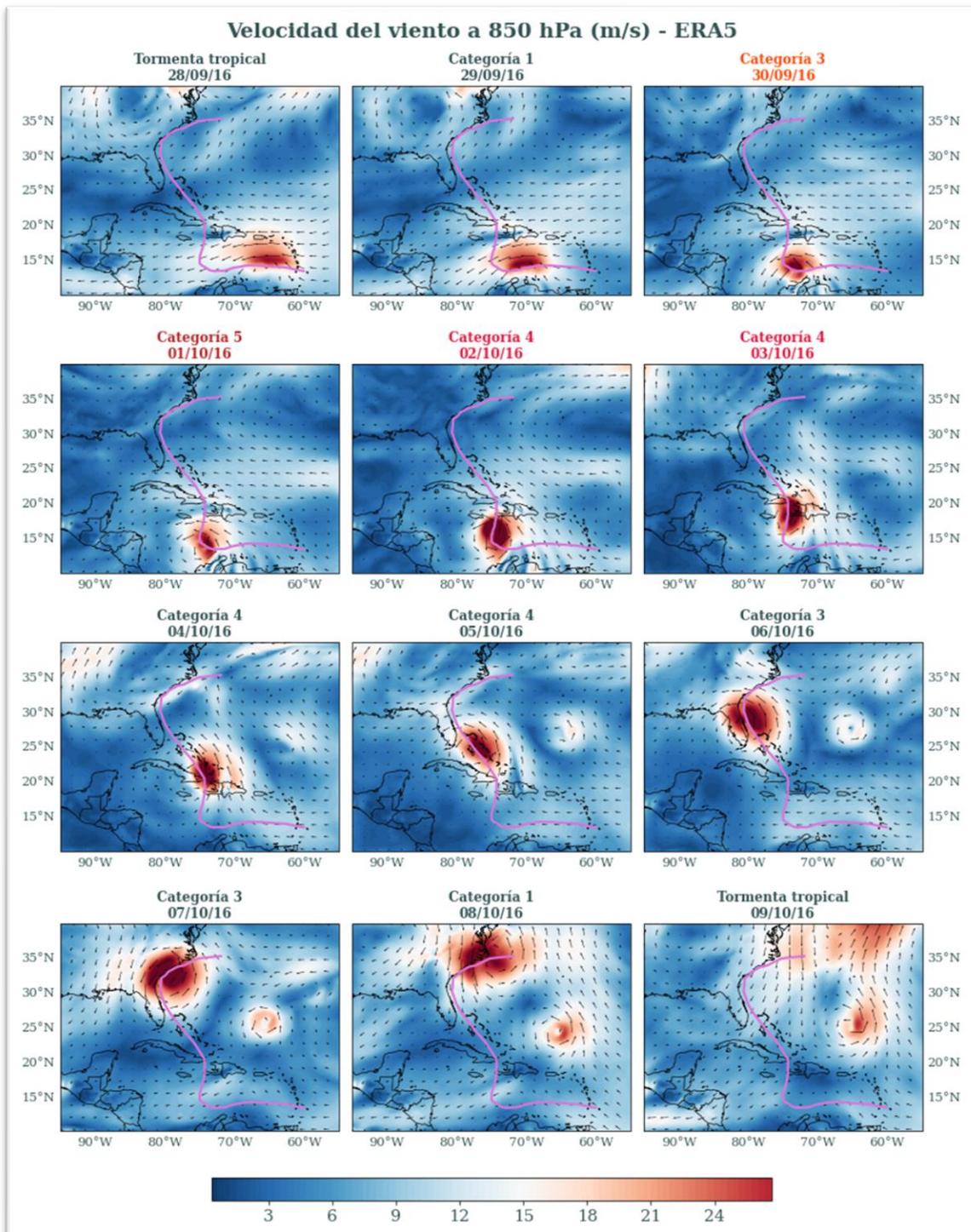


Figura A.10. Velocidad del viento a 850 hPa entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre de 2016, según registros del reanálisis ERA5.

Mapas comparativos de cuadrantes antes y después del evento

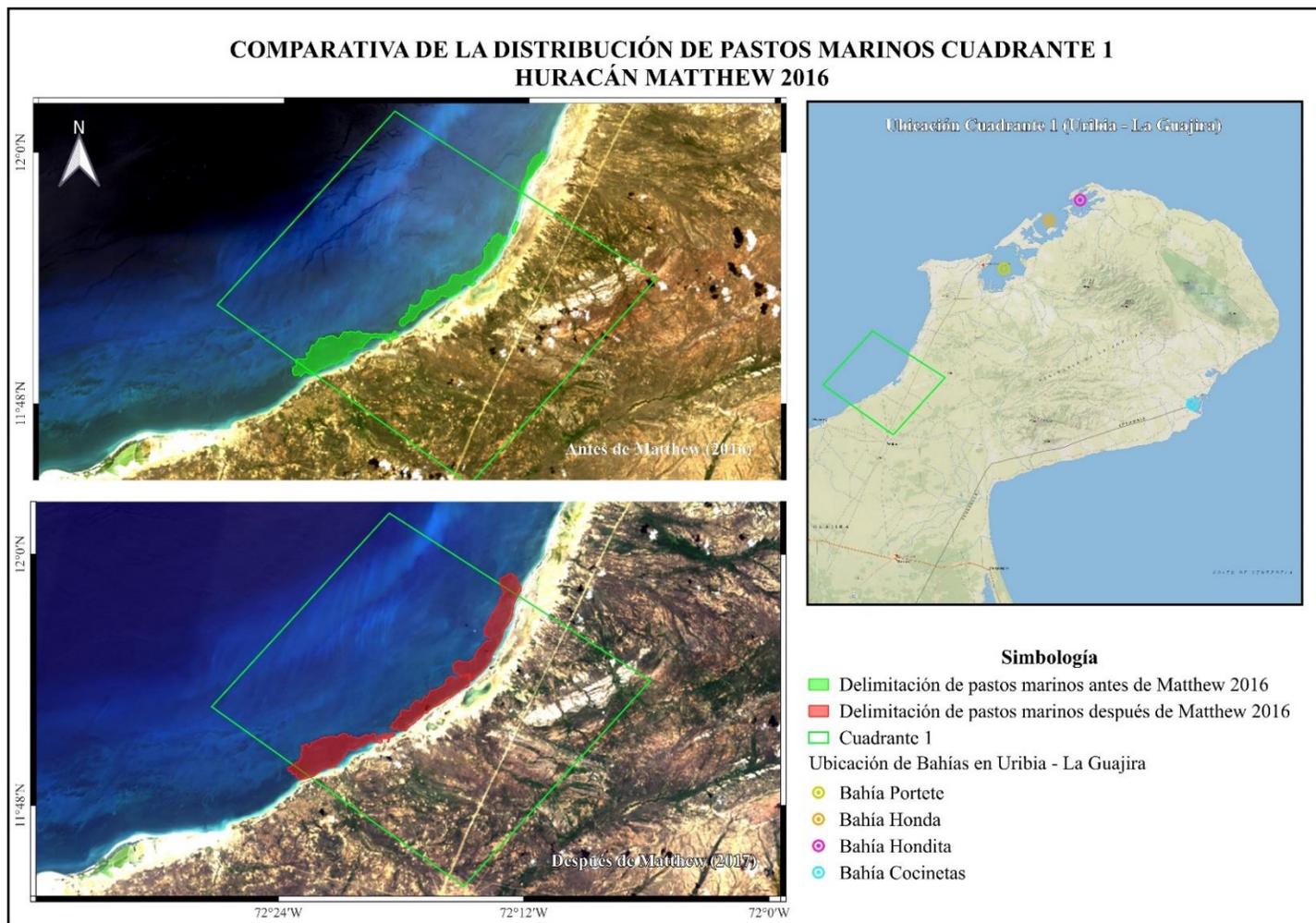


Figura A.11. Comparativa de la distribución de pastos marinos por el paso del huracán Matthew, cuadrante 1.

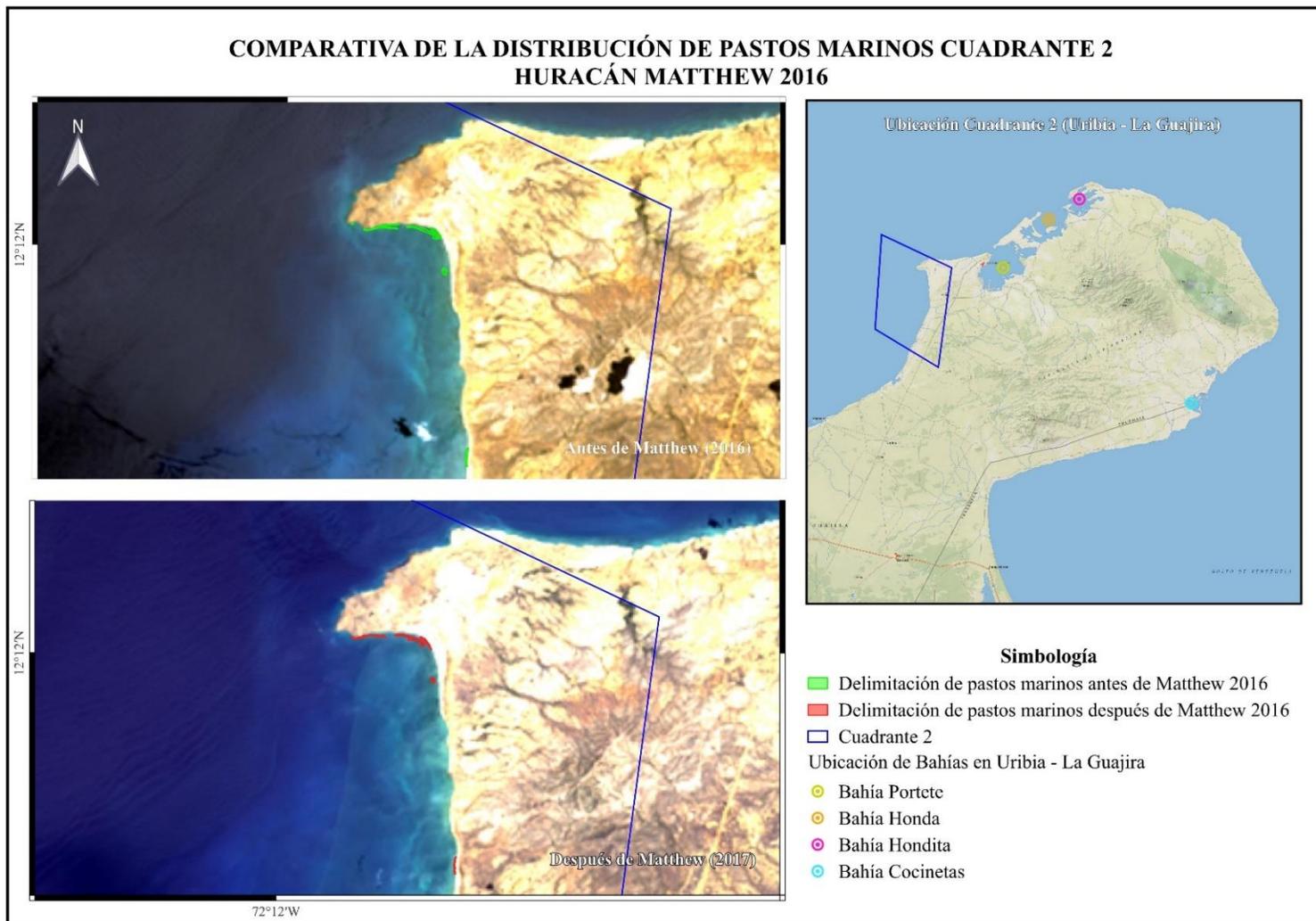


Figura A.12. Comparativa de la distribución de pastos marinos por el paso del huracán Matthew, cuadrante 2.

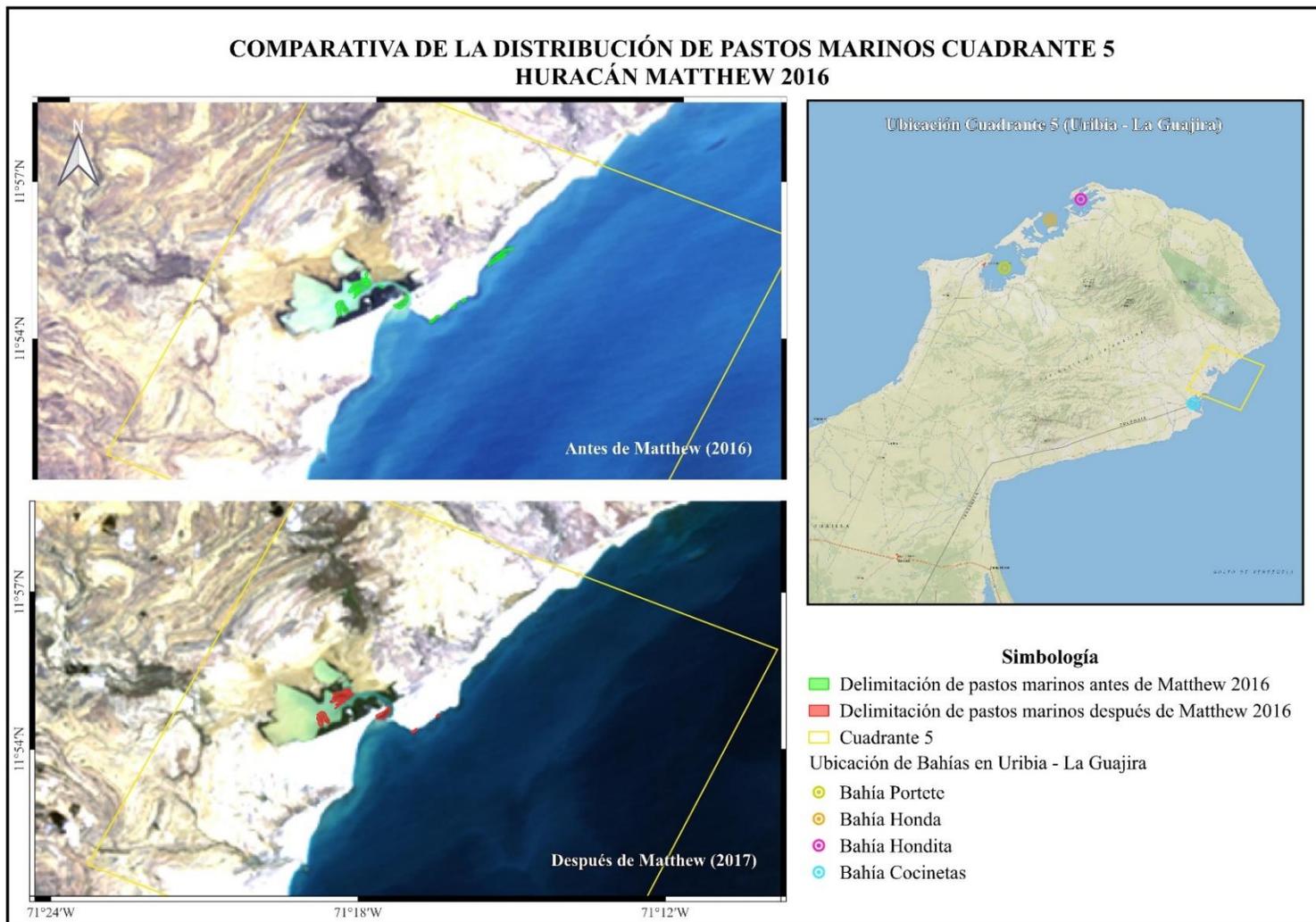


Figura A.13. Comparativa de la distribución de pastos marinos por el paso del huracán Matthew, cuadrante 5.



Figura A. 14. Comparativa de la distribución de pastos marinos por el paso del huracán Matthew, cuadrante 6.

Póster

Efectos del paso del huracán Matthew (2016) sobre la estabilidad de los pastos marinos en Uribia (La Guajira)

Jessica Agudelo Marín · Sofía Vela Castillo
 Asesora: Paola A. Arias
 Ingeniería Ambiental · Facultad de Ingeniería · Universidad de Antioquia

Introducción

En el año 2016, varias ciudades costeras del Caribe Colombiano sufrieron los efectos del huracán Matthew. Partiendo de lo anterior, es necesaria la evaluación de los efectos de fenómenos de este tipo, considerando que la dinámica hidrometeorológica y topográfica en la zona agrava los impactos que se puedan generar. Es esencial centrar este caso como ejemplo de amenaza reciente debido a huracanes mediante el análisis de la influencia del huracán Matthew sobre los pastos marinos en la región de Uribia (La Guajira).

Objetivos

Analizar la influencia del huracán Matthew (2016) sobre los pastos marinos en la región de Uribia (La Guajira).

- ✓ Describir las condiciones meteorológicas y oceánicas asociadas al huracán Matthew a partir de información de estaciones in situ y de reanálisis.
- ✓ Analizar la distribución del ecosistema de pastos marinos en Uribia, por medio de imágenes satelitales Landsat (Sensor OLI).
- ✓ Relacionar los cambios en las condiciones meteorológicas y oceánicas durante el huracán Matthew con la distribución de pastos marinos en Uribia.

Área de estudio

Uribia - La Guajira
 Clima seco, semiarido y árido.
 Temperatura media de 28°C.

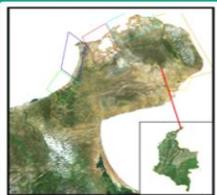


Figura 1. Ubicación del área de estudio (Uribia, La Guajira). Cuadrantes delimitados para la lectura de imágenes satelitales

El huracán Matthew tuvo una proximidad de 80 Nm (148,16 km) con el norte de Punta Gallinas (La Guajira) y fue allí donde adquirió la categoría mayor, según la escala de Saffir-Simpson (Categoría 5).

Metodología



Resultados

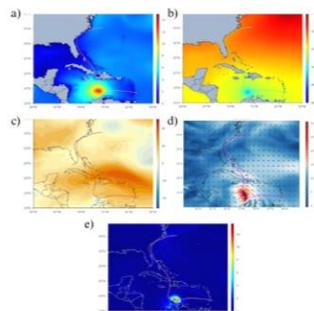


Figura 2. Variables de ERA5 para el 1 de octubre de 2016. a) altura de la ola, b) presión superficial, c) corte vertical del viento, d) velocidad y dirección del viento y e) precipitación total.

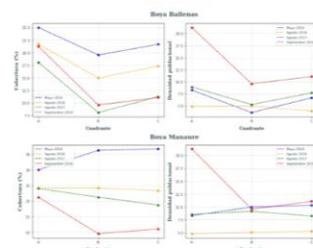


Figura 3. Series de tiempo de cobertura y densidad de Thalassia Testudinum. a) Boya Ballenas, b) Boya Manauare.



Figura 4. Comparativa distribución de pastos marinos, huracán Matthew (2016). a) antes del evento y b) después del evento (Cuadrantes 3, 4)

Lo anterior, coincide con los datos obtenidos de ICTPM, donde se evidencia la disminución de la cobertura y el aumento de la densidad poblacional del ecosistema.

Mediante la delimitación de pastos marinos se definió una extensión de pastos marinos aproximada de 74.9 km² anteriores al evento y 57.2 km² posteriores al evento.

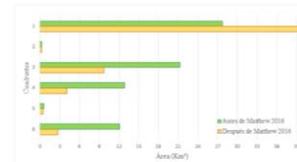


Figura 5. Comparativa de áreas delimitadas de pastos marinos, antes y después del huracán Matthew 2016 (Uribia, La Guajira)

Conclusiones

- ✓ El paso del huracán Matthew causó un impacto notable sobre las condiciones meteorológicas y oceanográficas en sus zonas circundantes.
- ✓ Los datos extraídos desde ERA5 sobrestiman los valores de las variables analizadas in situ. Es una herramienta fundamental en el análisis de condiciones a escala de huracán, ya que permite detallar los cambios de dichas variables.
- ✓ La falta de información resultó ser un factor crucial en la elaboración de este Trabajo de Grado dada la naturaleza fluctuante y desafiante de la dinámica social, económica y política de la región de La Guajira.

DATOS DE CONTACTO DEL AUTOR

jessicam.agudelo@udea.edu.co
 sofia.vela@udea.edu.co



Escanea este QR para conocer más sobre el proyecto

