



Concurrencia de extremos cálidos y secos en la cuenca del río Orinoco durante las últimas décadas

Alejandra Fernández Berrio

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniera Ambiental

Directora

Paola Andrea Arias Gómez, PhD en Ciencias Geológicas

Codirector

John Alejandro Martínez Agudelo, PhD en Hidrometeorología

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	(Fernández, 2024)
Referencia	(Fernández, 2024). <i>Concurrencia de extremos cálidos y secos en la cuenca del río Orinoco durante las últimas décadas</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Grupo de Investigación

Grupo de Investigación Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA).



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina

Jefa Departamento: Lina María Berrouet Cadavid

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

Este trabajo de grado y mi etapa de pregrado en general, se la dedico a mi familia cercana, amigas y amigos que siempre estuvieron conmigo, creyendo en mí y apoyándome en todo momento.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Universidad de Antioquia mediante el proyecto CODI TEM2022-55390.

Mis mayores agradecimientos a la profesora Paola Arias y al profesor Alejandro Martínez por haberme guiado en este proceso, por compartir sus conocimientos y pasión por las ciencias atmosféricas.

Agradezco a Juliana Benjumea, Valeria Bedoya y a Santiago Ramírez por haberme ayudado a resolver dudas que me permitieron continuar con la elaboración y culminación de este Trabajo de Grado.

Tabla de contenido

Resumen	2
Abstract	3
1 Introducción	5
2 Objetivos	8
2.1 Objetivo general	8
2.2 Objetivos específicos	8
3 Marco Teórico	9
4 Datos y Metodología	13
5 Resultados	18
5.1 Climatología de la cuenca del río Orinoco	18
5.2 Identificación de ocurrencia de extremos combinados cálidos y secos	21
5.3 Condiciones superficiales durante extremos secos simples y extremos compuestos cálidos y secos en el Orinoco	26
5.4 Patrones atmosféricos durante extremos secos simples y extremos compuestos cálidos y secos en el Orinoco.	33
5.4.1 Vapor de agua en la columna atmosférica y vientos en niveles bajos de la troposfera.	33
5.4.2 Humedad relativa y vientos en niveles medios de la troposfera	39
5.4.3 Altura geopotencial a 500 hPa	47
5.4.4 Precipitación total	50
5.5 Intensidad y frecuencia de extremos cálidos en la cuenca del Orinoco	54
5.6 Actividad de incendios durante la ocurrencia de extremos secos simples y extremos compuestos cálidos y secos en la cuenca del Orinoco	60
6 Discusión y conclusiones	67
7 Referencias	72

Lista de Figuras

- Figura 1.1.** Mapa topográfico de Suramérica tropical, con la cuenca del río Orinoco Norte (NORI) en rojo y Sur (SORI) en naranja. Topografía proveniente del reanálisis ERA5.5
- Figura 5.1.** Ciclo medio anual de temperatura máxima de NORI (arriba) y SORI (abajo) a partir de información de CHIRTS (línea roja) y ERA5 (línea azul). 19
- Figura 5.2.** Patrón espacial estacional de la diferencia de Tmax entre ERA5 y CHIRTS (ERA5-CHIRTS). 20
- Figura 5.3.** Serie de anomalías de Tmax diaria de ERA5 y su percentil 90 (p90; línea negra punteada) en NORI (arriba) y SORI (abajo). Los periodos resaltados en bloques de colores corresponden a las sequías identificadas por Bedoya (2024): 2009-2010, 2013-2014, 2015-2016, 2018-2019 y 2020. Para facilidad, la línea negra sólida muestra la línea de 0°C de anomalía de Tmax diaria. 22
- Figura 5.4.** Series de anomalías de Tmax diaria de ERA5 con los subperiodos de días consecutivos de DE (sombreado naranja) y de CDHE (sombreado rojo), durante las sequías de feb/2009-abr/2010 (a), abr/2015-abr/2016 (b) y feb/2020-ago/2020(c)..... 23
- Figura 5.5.** Mapas de anomalías de Tmax diaria durante los subperiodos de extremos secos (DE; título en negro) y extremos combinados (CDHE; título en rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo). 25
- Figura 5.6.** Mapas de anomalías de SM en la capa superficial del suelo (cm) durante los subperiodos de extremos secos (DE; título negro) y extremos combinados cálidos y secos (CDHE; título rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo). 28
- Figura 5.7.** Mapas de anomalías de SM) del suelo profundo durante los subperiodos de extremos secos (DE; título negro) y extremos combinados cálidos y secos (CDHE; título en rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo)..... 30
- Figura 5.8.** Compuestos de anomalías de SM del suelo superficial (arriba) y del suelo profundo (abajo) para extremos combinados cálidos y secos (CDHE; derecha), extremos secos (DE; centro) y la diferencia entre ambos tipos de extremos (izquierda)..... 32
- Figura 5.9.** Mapas de anomalías de TCWV (en colores) y vientos a 850hPa (vectores) durante los subperiodos de extremos secos (DE; título negro) y extremos combinados cálidos y

secos (CDHE; título en rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo).	34
Figura 5.10. Mapas de anomalías de vientos (m/s) a 850hPa durante los subperiodos de extremos secos (DE; título negro) y extremos combinados cálidos y secos (CDHE; título en rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo).	36
Figura 5.11. Compuestos de anomalías de TCWV (arriba) y anomalías de vientos a 850hpa (abajo) para extremos compuestos cálidos y secos (CDHE; derecha), extremos secos (DE; centro) y diferencia entre ambos tipos de extremos (izquierda).	38
Figura 5.12. Mapas de anomalías de HR (en colores) y vientos a 500hPa (vectores) durante subperiodos de extremos secos (DE; título negro) y extremos combinados cálidos y secos (CDHE; título en rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo).	41
Figura 5.13. Mapas de anomalías de vientos (m/s) a 500hPa durante los subperiodos de extremos secos (DE; título negro) y extremos combinados cálidos y secos (CDHE; título en rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo).	44
Figura 5.14. Compuestos de anomalías de HR500 (arriba) y anomalías de vientos a 500hPa (abajo) para extremos compuestos cálidos y secos (CDHE; derecha), extremos secos (DE; centro) y diferencia entre ambos tipos de extremos (izquierda).	46
Figura 5.15. Mapas de anomalías de altura geopotencial a 500hPa (m) durante los subperiodos de extremos secos (DE; título negro) y extremos combinados cálidos y secos (CDHE; título en rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo).	49
Figura 5.16. Mapas de anomalías de precipitación total (mm/día) durante los subperiodos de extremos secos (DE; título negro) y extremos combinados cálidos y secos (CDHE; título en rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo).	51
Figura 5.17. Compuestos de anomalías de altura geopotencial a 500hPa (arriba) y anomalías de precipitación total (abajo) para extremos compuestos cálidos y secos (CDHE; derecha), extremos secos (DE; centro) y diferencia entre ambos tipos de extremos (izquierda).	53

Figura 5.18. Compuestos de anomalías de Tmax diaria para extremos compuestos cálidos y secos (CDHE; derecha), extremos secos (DE; centro) y diferencia entre ambos tipos de eventos (izquierda).	54
Figura 5.19. Serie de tiempo del STI según ERA5 durante las sequías 2009-2010 (a), 2015-2016 (b) y 2020 (c) para NORI y SORI. Las franjas de colores indican la severidad del STI. Amarilla: moderada (>+0.8°C). Roja: grave (>+1.3°C).	57
Figura 5.20. Histograma de frecuencia de ocurrencia de extremos combinados cálidos y secos (CDHE) según el índice TX90p, durante cada año de sequía considerado (colores), para NORI (a) y SORI (b).	59
Figura 5.21. Ubicación de incendios detectados por MODIS (puntos rojos) y número de incendios para NORI y SORI (números en azul) durante los subperiodos de extremos secos (DE; título negro) y extremos combinados cálidos y secos (CDHE; título en rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo).	62
Figura 5.22. Series de anomalías en NORI de: número de incendios [(arriba)], SM de la capa superficial de suelo (cm)([centro) y SM de la capa profunda del suelo (cm) (abajo) durante las sequías 2009-2010 (a), 2015-2016 (b) y 2020 (c). Las barras rojas indican los periodos con ocurrencia de CDHE.	65
Figura 5.23. Número total de incendios, según MODIS, bajo la ocurrencia de extremos compuestos cálidos y secos (CDHE; derecha), extremos secos (DE; centro) y la diferencia entre ambos tipos de extremos (izquierda).	66

Siglas, acrónimos y abreviaturas

Aprox.	Aproximadamente
CHIRTS	Climate Hazards Center Infrared Temperature with Stations
CDHE	Compound Dry and Hot Extreme (Extremo compuesto cálido y seco)
DE	Dry Extreme (Extremo Seco)
ENSO	El Niño-Oscilación del Sur
ET	Evapotranspiración
Gp500	Altura Geopotencial a 500hPa
HR	Humedad Relativa
HR500	Humedad Relativa a 500hPa
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
mm	milímetros
NORI	Subregión Norte del Orinoco
ONI	Oceanic Niño Index
P90	Percentil 90
SM	Soil Moisture (Humedad del Suelo)
SORI	Subregión Sur del Orinoco
STI	Standardized Temperature Index (Índice de Temperatura Estandarizado)
TCWV	Agua precipitable
Tmax	Temperatura Máxima
TP	Precipitación Total
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical

Resumen

En diversas regiones del mundo, la combinación de extremos cálidos y secos (CDHE por sus iniciales en inglés) ha cobrado relevancia debido al aumento en su frecuencia y a la gravedad de sus impactos en sistemas naturales y humanos. Estos impactos incluyen problemas de salud pública, inseguridad hídrica y alimentaria, escasez de energía, pérdida de biodiversidad, y un incremento en la frecuencia e intensidad de incendios, entre otros. El último informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático indica, con alta confianza, que la concurrencia de estos eventos meteorológicos extremos se ha incrementado como resultado del aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero provocadas por las actividades humanas. Los CDHE serán más frecuentes a medida que aumente el cambio climático. La cuenca del río Orinoco, una eco-región de gran importancia en Suramérica tropical gracias a su alta biodiversidad, es particularmente vulnerable a estos extremos combinados, debido a que sus extensas sabanas son altamente propensas a temperaturas altas y a la ocurrencia de incendios. En este Trabajo de Grado se identifica la concurrencia de CDHE en esta cuenca hidrográfica durante las décadas más recientes. Para ello se emplea información del reanálisis ERA5, y de las bases de datos de CHIRTS y MODIS. Se caracterizan las condiciones atmosféricas durante estos eventos para determinar si los patrones asociados a las condiciones de sequía cambian bajo la ocurrencia de un extremo combinado. Además, se identifica si la actividad de incendios en esta cuenca cambia bajo la ocurrencia de CDHE. Durante los períodos de sequía en los que no se superan umbrales de temperatura (es decir, no se registran condiciones anormalmente cálidas), se registran algunos episodios de recuperación de la precipitación; sin embargo, durante los CDHE se presenta un déficit más pronunciado, exacerbando la sequía meteorológica. Las variables atmosféricas mostraron un debilitamiento de los vientos alisios a 850hPa, un debilitamiento del jet de bajo nivel del Orinoco (OLLJ por sus iniciales en inglés), un déficit en el agua precipitable y de humedad relativa (HR) a 500hPa, así como un fortalecimiento de un sistema de alta presión a 500hPa (anticiclón) sobre el Atlántico norte y el mar Caribe. Mientras que la humedad en el suelo (SM) mostró un déficit durante los CDHE. El Niño no condiciona la ocurrencia de los extremos cálidos identificados en el Orinoco. La región con temperaturas más extremas corresponde al norte del Orinoco (NORI), superando los $+3^{\circ}\text{C}$ de anomalía durante CDHE, mientras que el índice de temperatura estandarizado (STI) sugiere condiciones severas de extremo cálido durante las sequías identificadas en esta región. Mediante el índice TX90p (número de días en los que se supera el

percentil 90 de la temperatura máxima diaria) se obtuvo que enero, febrero, marzo y abril son los meses con mayor ocurrencia de temperatura máximas (+50%) en el Orinoco. Por último, las condiciones meteorológicas durante los CDHE facilitan la propagación de incendios en esta región, aumentando su severidad, según se identifica de la información satelital de MODIS. Sin embargo, es importante destacar que las condiciones meteorológicas no son necesariamente detonadoras de incendios en la región del Orinoco, como ocurre en otras regiones del mundo como el Amazonas, debido a las prácticas de usos de suelo en esta región.

Palabras clave: extremos secos, extremos cálidos, extremos combinados, Orinoco, incendios, STI, TX90p

Abstract

In several regions of the world, the Compound Dry and Hot extremes (CDHE) has gained relevance due to the increase in its frequency and the severity of its impacts on natural and human systems. These impacts include public health problems, water and food insecurity, energy scarcity, loss of biodiversity, and an increase in the frequency and intensity of fires, among others. The latest report from the Intergovernmental Panel on Climate Change indicates, with high confidence, that the occurrence of these extreme weather events has increased as a result of increased greenhouse gas emissions caused by human activities. CDHEs will become more prevalent as climate change increases. The Orinoco River basin, an eco-region of great importance in tropical South America due to its high biodiversity, is particularly vulnerable to these combined extremes, because its extensive savannas are highly prone to high temperatures and the occurrence of fires. This thesis identifies the concurrence of CDHE in this watershed during the most recent decades. For this purpose, information from the ERA5 reanalysis and from the CHIRTS and MODIS datasets are used. Atmospheric conditions during these events are characterized to determine whether the patterns associated with drought conditions change under the occurrence of a combined extreme. In addition, It is determined whether fire activity in this basin changes under the occurrence of CDHE. During periods of drought when temperature thresholds are not exceeded (i.e., abnormally warm conditions are not observed), some episodes of precipitation recovery are observed; however, during the CDHEs there is a more pronounced deficit, exacerbating the meteorological drought. The atmospheric variables showed a weakening of the trade winds at 850hPa, a weakening of the

Orinoco low-level jet (OLLJ), a deficit in precipitable water (TCWV) and relative humidity (RH) at 500hPa, besides a strengthening of a high-pressure system at 500hPa (anticyclone) over the North Atlantic and the Caribbean Sea. While Soil Moisture (SM) showed a deficit during the CDHEs. El Niño does not condition the occurrence of the warm extremes identified in the Orinoco. The region with the highest temperatures corresponds to the north of the Orinoco (NORI), exceeding +3°C of anomaly during warm events, while the STI suggests severe conditions of heat extreme during the droughts identified in this region. Using the TX90p index (number of days in which the 90th percentile of the maximum daily temperature is exceeded) it was obtained that January, February, March, and April are the months with the highest occurrence of maximum temperatures (+50%) in the Orinoco. Finally, the weather conditions during the CDHEs facilitate the spread of fires in this region, increasing their severity, as identified from MODIS satellite information. However, it is important to note that weather conditions are not necessarily triggering fires in the Orinoco region, as is the case in other regions of the world such as the Amazon, due to land use practices in this region.

Keywords: Dry extremes, compound dry and hot extreme, heat extreme, Orinoco, fire, STI, TX90p.

1 Introducción

La cuenca del río Orinoco es una región biodiversa muy importante de los trópicos perteneciente a la región de Suramérica tropical (Romero et al., 2004). Tiene una extensión de 981.446 km², va desde el norte de la Amazonía colombiana hasta la desembocadura en el delta del Orinoco en Venezuela, donde se une con el océano Atlántico. Sus aguas recorren el Macizo Guayanés, la vertiente oriental de los Andes del Norte, la Cordillera de la Costa, la planicie de transición amazónica y las sabanas inundables y no inundables del oriente de Colombia y área central - oriental de Venezuela (Lasso et al., 2010).

Dadas las condiciones climáticas y la historia tectónica, esta región se divide en dos subregiones por sus tipos de formaciones ecológicas. En el norte del Orinoco (NORI) se destacan los bosques andinos, altoandinos y vegetación de páramo de la cordillera oriental y la cordillera de Mérida, sus respectivos piedemontes y las sabanas tropicales en la parte central. En el sur del Orinoco (SORI) se destacan los bosques húmedos tropicales, pertenecientes a la zona de transición hacia la región amazónica, la vegetación arbustiva asociada a la región del Escudo Guayanés y los humedales (ver Figura 1) (Romero et al., 2004).

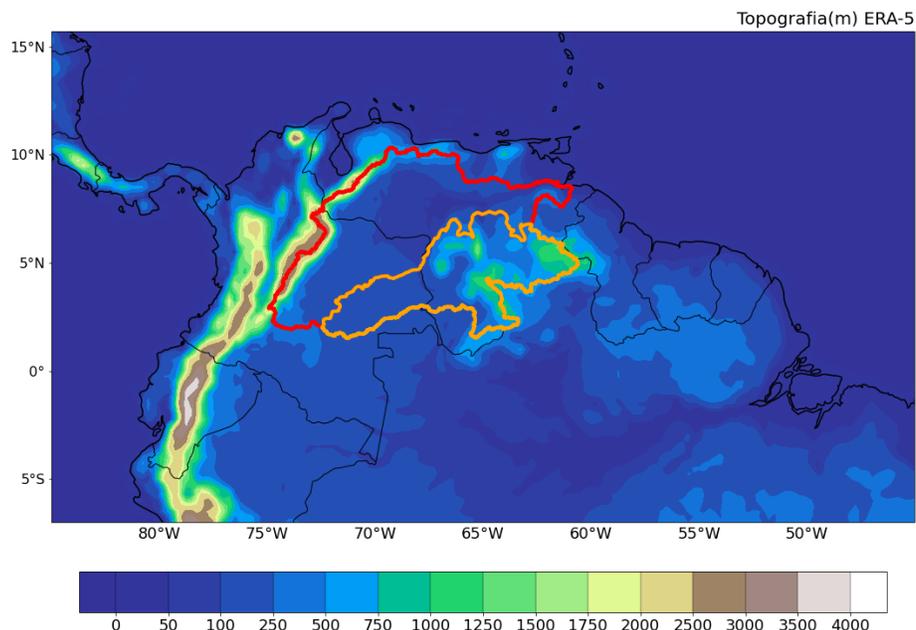


Figura 1.1. Mapa topográfico de Suramérica tropical, con la cuenca del río Orinoco Norte (NORI) en rojo y Sur (SORI) en naranja. Topografía proveniente del reanálisis ERA5.

Suramérica tropical se caracteriza por las altas temperaturas y un abundante contenido de humedad atmosférica aportada desde los océanos Atlántico y Pacífico y los ríos Amazonas y Orinoco (Jiménez-Sánchez et al., 2019; Arias et al., 2020). En esta parte del continente, uno de los principales procesos climáticos que más influye en la región es la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) que modula el ciclo anual regional de la precipitación y su patrón de vientos alisios asociados (Hastenrath, 2002; Poveda et al., 2006; Morales et al., 2021). El sistema de altas presiones del Atlántico norte subtropical, los cambios en la temperatura superficial del mar y la compleja topografía del norte de Suramérica también influyen en el clima regional (Taylor & Alfaro, 2005; Morales et al., 2021). Debido a la influencia del mar Caribe, la cuenca del Orinoco presenta precipitaciones más bajas al norte y a medida que se va más hacia el sur, la región se vuelve más lluviosa sobre el Escudo Guyanés y la cuenca Amazónica, con promedios anuales cercanos a 3.800 mm. Adicionalmente, teniendo en cuenta la distribución de precipitación, dos de las zonas más lluviosas en esta cuenca son el Piedemonte Andino Meta-Cundinamarca y el Piedemonte Andino del río Cauca, con promedios anuales de 4.300 mm y 3.300 mm, respectivamente (Lasso et al., 2010). La cuenca del Orinoco experimenta su temporada seca entre noviembre y abril, cuando la ZCIT muestra una migración hacia el sur y los vientos alisios se intensifican del noreste sobre Venezuela; por su parte, la temporada húmeda ocurre entre mayo y octubre, cuando las velocidades del viento son más débiles (Poveda et al., 2006; Arias et al., 2020). En cuanto a temperatura, la zona más cálida se encuentra en la parte media de la cuenca, en el corredor Puerto Carreño - Tuparro, con temperaturas promedios anuales de 28°C (Lasso et al., 2010).

En el Orinoco, la actividad del fuego es esencial en la dinámica ecológica de las formaciones vegetales de praderas, pastizales, sabanas y herbazales, y presentan su máxima actividad en los periodos secos del año, alcanzando un máximo en febrero. Sin embargo, el 80% de los fuegos son provocados por la actividad humana (expansión agrícola, infraestructura, desmonte forestal, control de plagas y renovación de pastizales, de manera accidental o intencionada) mientras que el 20% corresponde a eventos naturales (caída de un rayo o descomposición vegetal) (Lasso et al., 2010). Sin importar las causas que contribuyan a la formación del fuego, la presencia de condiciones meteorológicas altamente propicias, tales como aumentos regionales de temperatura, aridez, sequía, incremento en la velocidad del viento y

abundancia de combustible en los suelos de bosques y matorrales, puede dar lugar a una mayor frecuencia, intensidad, extensión y severidad de los incendios (Bolaño-Díaz et al., 2022; Castellanos et al., 2022). Incluso en ecosistemas como las sabanas, la ocurrencia de incendios anómalos aumenta la exposición y vulnerabilidad de ecosistemas forestales adyacentes no adaptados al fuego, como los bosques inundables estacionalmente (Bilbao et al., 2020; Flores & Holmgren, 2021; Castellanos et al., 2022).

Es un hecho que las actividades humanas son las causantes del aumento de concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmosfera, incrementando la ocurrencia de extremos meteorológicos y climáticos en todas las regiones del mundo, entre ellos los extremos cálidos (como olas de calor) y secos (como sequías), tanto individuales como compuestos (IPCC, 2021). Los eventos combinados de extremos cálidos y secos (CDHE por sus iniciales en inglés) se han vuelto más frecuentes y tenderán a aumentar con un mayor calentamiento global (Seneviratne et al., 2021). En este sentido, una mayor ocurrencia de CDHE amenaza gravemente los sistemas socio-ecológicos y provoca mayores impactos, como incendios forestales, malas cosechas y mortalidad relacionada con el calor, que los eventos extremos individuales. En particular, una de las regiones menos estudiadas en Suramérica, como lo es la cuenca del río Orinoco, es susceptible a la ocurrencia de estos eventos (Castellanos et al., 2022; Tripathy et al., 2023). Algo como esto se observó en la sequía del año 2014 en el departamento de Casanare, en Colombia, perteneciente a esta cuenca (BBC, 2014; El Espectador, 2014). Algunos estudios muestran que los impactos de las sequías se agravan cuando ocurren simultáneamente con temperaturas altas, ya que es uno de varios impulsores que inciden en el desarrollo de sequías por el aumento en la evapotranspiración (ET) (Seneviratne, 2012; Manning et al., 2019).

Este Trabajo de Grado busca caracterizar las condiciones atmosféricas que contribuyen a la ocurrencia combinada de eventos extremos cálidos y secos en la cuenca del Orinoco, utilizando datos de diferentes bases de datos de reanálisis, observacionales y satelitales (ERA5, ERA5-Land, CHIRT y MODIS) y la estimación de índices ampliamente empleados para extremos cálidos (TX90p y STI). Así, este estudio busca aportar a la comprensión de la ocurrencia de estos eventos extremos compuestos. Lo anterior puede constituirse en información valiosa para los responsables de políticas alrededor de la gestión de agua para el consumo humano, las actividades agrícolas y el sostenimiento ecológico, como elemento para enfrentar los desafíos climáticos actuales en esta cuenca tan importante para Colombia y Suramérica tropical.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Identificar y caracterizar extremos cálidos durante sequías en la cuenca del río Orinoco.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar la ocurrencia de extremos cálidos durante eventos de sequías en la región de estudio.
- Caracterizar las condiciones atmosféricas asociadas a los eventos cálidos identificados.
- Analizar cambios en la intensidad y frecuencia de ocurrencia de extremos cálidos en la región.

3 Marco Teórico

Una adecuada comprensión del ciclo hidrológico es fundamental ya que el movimiento de agua a través de la atmósfera, la superficie continental y el océano es determinante en los flujos de agua y energía en la atmósfera. La atmósfera se puede calentar de dos maneras: mediante el calor sensible, que se da cuando hay conducción de calor desde la superficie hacia la atmósfera, o mediante el calor latente, que es la energía del vapor de agua utilizada para la evaporación, la cual se libera cuando el vapor de agua se condensa. Esa evaporación se da cuando la energía solar provoca la evaporación del agua del océano o cualquier superficie con agua, pero también cuando las plantas mueven el agua líquida del suelo hacia la atmósfera mediante la ET (Gettelman & Rood, 2016).

Ruiz-Vásquez et al. (2020) muestran que el transporte de humedad desde el Amazonas hacia el Orinoco ha disminuido debido al aumento de la deforestación en el sur del Amazonas. Estas y otras actividades antrópicas han sido las causantes del calentamiento global, particularmente desde 1960, por lo que se tiene confianza alta en que han impulsado cambios detectables en el ciclo hidrológico y que este se seguirá intensificando a medida que las temperaturas globales aumenten, haciendo que ocurran eventos más extremos de precipitación en unas regiones como las latitudes altas, el Pacífico ecuatorial y partes de las regiones monzónicas, mientras que la precipitación decrecerá en otras regiones como los subtrópicos y algunas áreas del trópico (IPCC, 2021).

Un clima cambiante provoca cambios en la frecuencia, intensidad, extensión espacial, duración y ciclo de vida de los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, y puede dar lugar a extremos sin precedentes (Seneviratne et al., 2012). Según las proyecciones de extremos del último reporte del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus iniciales en inglés), la región Norte de Suramérica (NSA), la cual contiene la cuenca del río del Orinoco, existe una confianza media-alta en que esta región presente un aumento en la frecuencia e intensidad de extremos cálidos y una confianza media en que esta región también experimente un aumento de la severidad de las sequías en la humedad total y superficial del suelo en todos los escenarios considerados por el IPCC para proyecciones a lo largo del siglo XXI (Seneviratne et al., 2021). Por

un lado, las sequías (un tipo de extremos secos) se clasifican según la escala temporal en la que se desarrollan (e.g., la sequía meteorológica puede durar semanas, mientras que la sequía agrícola y ecológica puede durar meses), y según las afectaciones al medio ambiente y a los sectores económicos. En consecuencia, se han definido cuatro tipos de sequía: meteorológica (déficit de precipitación), agrícola y ecológica (déficit de humedad del suelo y estrés hídrico para la vegetación), hidrológica y socioeconómica (escasez de agua en cuerpos de agua) (McKee et al., 1993; Seneviratne et al., 2021; Bedoya, 2024).

Por otra parte, los extremos cálidos a menudo se definen como períodos prolongados de condiciones anormalmente cálidas en relación con las condiciones esperadas en un momento y lugar determinados (Barriopedro et al., 2023). Uno de los eventos extremos de temperatura más estudiados son las olas de calor. Según la evidencia científica, estos eventos están asociados con la presencia de un bloqueo atmosférico en latitudes medias, el cual ocurre cuando una cresta de una corriente en chorro subtropical se vuelve especialmente grande y forma un remolino anticiclónico separado en el flujo, lo que crea un patrón atmosférico de altas presiones persistente a gran escala que "bloquea" la propagación de las ondas Rossby (Stendel et al., 2021). Hay extremos cálidos, no asociados a olas de calor, sino a anomalías de altas temperaturas debidas a otros patrones atmosféricos, como en las de regiones tropicales.

La concurrencia de eventos extremos tiene varias definiciones: (1) dos o más eventos extremos que ocurren simultánea o sucesivamente, (2) combinaciones de eventos extremos con condiciones subyacentes que amplifican el impacto de los eventos, o (3) combinaciones de eventos que no son en sí mismos extremos, pero conducen a un evento extremo o impacto cuando se combinan (Seneviratne et al., 2012; Leonard et al., 2014; Zscheischler et al., 2014). Recientemente, Zscheischler et al. (2018) definieron los eventos compuestos como "la combinación de múltiples factores y/o peligros que contribuye al riesgo social o ambiental", la cual es utilizada en el último reporte del IPCC (AR6) (Seneviratne et al., 2021; Hao et al., 2022). Los CDHE han sido uno de los extremos combinados que más se ha estudiado en los últimos años en diferentes regiones del mundo como Estados Unidos (Ghanbari et al., 2023), Europa (Ciais et al., 2005; Zscheischler & Fischer, 2020), el Mediterráneo (Russo et al., 2019), la cuenca del Amazonas (Costa et al., 2022), centro y sur de Suramérica (Olmo et al., 2020; Calim Costa et al., 2023), China (Wu et al., 2019;

Yu & Zhai, 2020), el sur de África (Moses et al., 2023), Rusia (Hunt et al., 2021), India (Muthuvel & Mahesha, 2021) y Australia (Páscoa et al., 2022), debido a su frecuente ocurrencia por las fuertes interacciones suelo-atmósfera. La comprensión de las condiciones bajo las cuales se dan este tipo de eventos extremos combinados ha ganado una mayor importancia debido a los impactos tan severos que ocasionan tanto en sistemas naturales como humanos (Zscheischler & Seneviratne, 2017; Zscheischler et al., 2020).

En la mayoría de las regiones tropicales, la sequía tiende a ocurrir con mayor frecuencia durante la fase cálida del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), conocida como El Niño, mientras que en el hemisferio estival extra-tropical, tiende a ocurrir con mayor frecuencia durante la fase fría de este fenómeno (La Niña). A pesar de la conexión con el ENSO, muchas de las sequías en escalas temporales de estaciones a años parecen iniciarse y terminar por fluctuaciones aleatorias en la circulación atmosférica (Wallace & Hobbs, 2006). Cuando se da la ocurrencia de extremos cálidos durante una sequía, dependiendo de la severidad de cada uno, estos dos extremos se pueden intensificar y propagar a través de retroalimentaciones suelo-atmósfera (Miralles et al., 2019). La ocurrencia de déficit de precipitación durante unas pocas semanas conduce a una sequía meteorológica, en la cual se tiene una atmósfera seca y cálida que demanda más evaporación del suelo (o ET) (Allan et al., 2020). Esto es suficiente para secar las capas superiores del suelo, reduciendo el agua disponible para que las plantas la absorban a través de su sistema radicular; así, genera un déficit de humedad del suelo que desencadena sequías agrícolas y ecológicas como consecuencia del estrés hídrico (Wallace & Hobbs, 2006). Adicionalmente, decrece la actividad fotosintética, llegando incluso a causar mortalidad de árboles (Marengo et al., 2018). Las plantas responden reduciendo la tasa de ET a través de sus hojas durante las horas del día (Wallace & Hobbs, 2006) y a medida que la ET disminuye progresivamente, una fracción mayor de la radiación entrante se emplea para calentar el entorno, lo que conduce a una acumulación de calor sensible en la atmósfera que puede convertirse en un extremo cálido o aumentar su magnitud (Miralles et al., 2019). Al aumentar la ocurrencia de CDHE, pueden aparecer otros riesgos potenciales debido a esas retroalimentaciones, como el bajo rendimiento de los cultivos y/o la pérdida de cosechas (Ribeiro et al., 2020), grandes reducciones en la absorción de carbono y aumento en la liberación de grandes cantidades de carbono por la descomposición de materia vegetal muerta (Bonal et al., 2016), reducción de producción de energía por hidroeléctricas

(El Nacional, 2023), agotamiento de recursos hídricos, amplificación del riesgo de incendios forestales, afectaciones en los ecosistemas naturales y la salud humana (Zscheischler et al., 2020; Hao et al., 2022), entre otros.

Teniendo en cuenta que los factores que más determinan la dinámica de ocurrencia de incendios en la cuenca del Orinoco son las actividades humanas, el combustible vegetal y las altas temperaturas (Barreto & Armenteras, 2020), y al haber una mayor probabilidad de que condiciones cálidas y secas ocurriendo simultáneamente con actividades de cambio de uso del suelo, se favorece la ocurrencia de incendios sobre esta región. Por lo tanto, es pertinente investigar sobre la concurrencia combinada de extremos cálidos y secos sobre esta región, ya que pueden generar condiciones propicias para que los incendios que se detonan por actividad humana se propaguen más rápido y el área quemada sea mayor, afectando en su mayoría a poblaciones vulnerables como comunidades indígenas, pequeños agricultores y ganaderos, personas empobrecidas, niños y ancianos (Pörtner et al., 2022).

4 Datos y Metodología

El área de estudio para este Trabajo de Grado es la cuenca del río Orinoco, ubicada entre 1-11°N y 60-75°W. Para este Trabajo, la cuenca se divide en dos regiones (NORI y SORI), como se ve en la Figura 1.1, principalmente debido al tipo de vegetación característica de estas dos subregiones.

En un estudio reciente, se identificó que las sequías más fuertes ocurridas durante las últimas dos décadas en la cuenca del Orinoco corresponden a los periodos feb/2009-abr/2010, oct/2013-jun/2014, abr/2015-abr/2016, nov/2018-ago/2019 y feb/2020-ago/2020 (Bedoya, 2024). Esta investigación previa permitió identificar diversos factores asociados a la ocurrencia de condiciones secas en la región del Orinoco, los cuales pueden actuar en simultáneo o secuencialmente durante las sequías estudiadas. Entre estos factores se destaca el fortalecimiento de un sistema de alta presión (una circulación anticiclónica) en niveles bajos y medios de la troposfera sobre el océano Atlántico norte y el mar Caribe, la ocurrencia de un evento El Niño, un jet de bajo nivel del Orinoco (OLLJ por sus iniciales en inglés) más intenso y vientos alisios fortalecidos (Bedoya, 2024).

Debido a que la cuenca del Orinoco es una región poco estudiada y limitada por la disponibilidad de observaciones in situ con buena cobertura espacial y temporal, en nuestro estudio se utilizan los datos temperatura máxima (Tmax) del reanálisis ERA5 a escala diaria. ERA5 es un reanálisis que combina datos de modelos con observaciones de todo el mundo, en un conjunto de datos globalmente completo y físicamente consistente (Hersbach et al., 2023). A su vez, se emplea información de temperatura máxima (Tmax) diaria proveniente de la base de datos basados en observaciones del Climate Hazards Center Infrared Temperature with Stations (CHIRTS) como base de datos de referencia. CHIRTS es un producto global (60°S – 70°N) de alta resolución (0,05° x 0,05°, aproximadamente 5 km) que combina directamente estimaciones de Tmax basadas en satélites y estaciones para producir datos actualizados de forma rutinaria para respaldar el monitoreo de temperaturas extremas (Climate Hazards Center, 2024).

Los valores horarios de Tmax para el periodo comprendido entre 1981-2021 se obtuvieron de la página Climate Data Store (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset>). Se considera este periodo ya que corresponde al intervalo más largo con el que Bedoya (2024) realizó su diagnóstico de sequías en el Orinoco. Asimismo, del Climate Hazard Center (<https://www.chc.ucsb.edu/data/chirtsdaily>) se extraen los registros diarios de Tmax de CHIRTS para todo el periodo disponible en esta base de datos a esta escala temporal, comprendido entre 1983 y 2016. Para efectos de comparar los estimados del reanálisis ERA5 con la base de datos de referencia CHIRTS, se utiliza el periodo en común entre ambas bases de datos (1983-2016). Con estos datos se evaluó la similitud entre la serie del ciclo medio anual de cada subregión, tanto en NORI como en SORI y se estimaron las diferencias del ciclo estacional multianual entre las bases de datos. Para estimar esta diferencia, los datos de CHIRTS fueron transformados a la cuadrícula de ERA5.

Con el objeto de analizar las condiciones atmosféricas asociadas a los eventos bajo estudio, también empleamos los datos diarios de precipitación total (TP), agua precipitable (TCWV), vientos zonales y meridionales a 850hPa y 500hPa, altura geopotencial a 500hPa (Gp500) y HR a 500hPa (HR500) provenientes del reanálisis ERA5, para cada periodo en el que Bedoya (2024) identifica sequías en la región del Orinoco: feb/2009-abr/2010, oct/2013-jun/2014, abr/2015-abr/2016, nov/2018-ago/2019 y feb/2020-ago/2020. Todos estos datos cuentan con una resolución espacial de 0,25° X 0,25°. Se calcularán anomalías diarias de Tmax considerando la climatología del periodo 1981-2021, y para el resto de las variables, se calcularon anomalías diarias con respecto al ciclo medio anual diario entre los años 2009 y 2020, tanto para NORI como para SORI.

Otra de las variables a analizar bajo la ocurrencia de CDHE en el Orinoco es la humedad del suelo a nivel de superficie (0-7cm) y en profundidad (7-289cm). Esta variable se extrajo del reanálisis ERA5-Land, para el periodo 2009-2020, con una resolución espacial de 0,1° X 0,1°. ERA5-Land es un conjunto de reanálisis que proporciona una visión consistente de la evolución de las variables terrestres con una resolución mejorada en comparación con ERA5 (Muñoz Sabater, 2019). Al igual que con las variables extraídas del reanálisis ERA5, se estiman las anomalías de humedad del suelo con base en el periodo 2009-2020.

Teniendo en cuenta que las condiciones meteorológicas cálidas y secas son algunos de los impulsores de generación y/o propagación de incendios, se identificaron los puntos de incendios que estuvieron activos en el Orinoco durante cada fecha de ocurrencia de eventos secos y CDHE. Para esto, se descargaron los datos de incendios activos para las fechas de interés (2009-2020), <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>, del satélite Terra y Aqua a partir de los productos del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) (Gliglio et al., 2021)

Para este Trabajo de Grado, se considera temperatura cálida extrema cuando la anomalía de Tmax diaria excede el percentil 90 (p90) de su distribución. El p90 se estima a partir de la distribución de anomalías con base en el periodo más largo utilizado por Bedoya (2024), que corresponde al periodo 1981-2021. Para definir la ocurrencia de un CDHE, se analizan las series temporales de las anomalías de Tmax diaria tanto en la región norte (NORI) como en la región sur (SORI). Así, se identifican los períodos en los cuales se supera este umbral de temperatura durante los periodos de sequías identificados por Bedoya (2024) en la cuenca del río Orinoco. Se consideran eventos combinados aquellos subperiodos que cumplen con al menos 12 días consecutivos bajo un CDHE, es decir, corresponde a un periodo de sequía identificado por Bedoya (2024) y la Tmax diaria supera el p90. Por su parte, los extremos individuales de sequía (DE por sus iniciales en inglés) corresponden a aquellos con al menos 8 días consecutivos dentro de un periodo de sequía identificado por Bedoya (2024) pero que no superan el p90 de Tmax diaria. El extremo cálido termina cuando Tmax diaria disminuye por debajo del p90. Sin embargo, siguiendo lo planteado por un estudio realizado en la Amazonia (Costa et al., 2022), para garantizar la consistencia de un evento cálido extremo prolongado durante una sequía, la consecutividad se puede hacer flexible permitiendo hasta 1 día de anomalías diarias promedio por debajo del p90.

Para la caracterización de las condiciones atmosféricas asociadas a estos eventos compuestos, se identifican patrones espaciales de las variables atmosféricas y del suelo de los reanálisis ERA5-Land y ERA5 como precipitación total, TCWV, vientos a 850hPa y 500hPa, SM, HR500 y Gp500 durante la ocurrencia de ambos tipos de extremos, estimando compuestos de anomalías para eventos de CDHE (DE) para los que se tuvieron días estrictamente consecutivos con anomalías de Tmax diarias mayores (menores) al p90. Así, se plantea analizar la evolución de factores asociados a las sequías, como el sistema de alta presión en el océano Atlántico y el mar Caribe, el OLLJ y los vientos alisios, para identificar si estos patrones cambian durante la

ocurrencia de CDHE con respecto a condiciones de sequía sin ocurrencia de extremos cálidos (DE). Adicionalmente, para ver cómo cambia la actividad de incendios durante extremos tipo CDHE y DEs, se calculan las anomalías de número de incendios en la cuenca del Orinoco durante los días de concurrencia de estos extremos, a partir de la base de datos de MODIS.

Uno de los objetivos de este Trabajo de Grado es identificar cambios en la intensidad de extremos cálidos en la cuenca del Orinoco. Xu et al. (2024) define la intensidad de temperatura máxima como el valor medio de la Tmax diaria en todos los días durante un evento específico. Siguiendo este estudio, esta intensidad fue estimada para los compuestos de las anomalías de Tmax diaria durante eventos CDHE y DE para analizar los patrones espaciales y los cambios en la intensidad de la Tmax en toda la cuenca.

Asimismo, este estudio considera el uso del índice TX90p, que corresponde al porcentaje de días en el que la Tmax diaria (TX) supera su p90 por año. Este índice es empleado para calcular la frecuencia de un extremo cálido, ya que utiliza umbrales de temperatura relativos al clima local y permite la comparación entre ubicaciones y épocas del año (Barriopedro et al., 2023). Para calcular este índice, se debe de utilizar un periodo de referencia específico de al menos 30 años para calcular el p90 (Dunn et al., 2020). Para ello, se estima el p90 de las TX durante el periodo 1981-2021 y se estima el TX90p interanual de los años donde hubo eventos CDHE.

En estudios recientes en los cuales se ha abordado la misma temática, se han utilizado varios índices enfocados en representar únicamente las condiciones secas extremas, o las condiciones cálidas, mientras que otros índices buscan representar condiciones cálidas y secas combinadas. Los índices más utilizados para evaluar extremos compuestos son el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y el Índice de Temperatura Estandarizado (STI), derivados de variables como la precipitación y la temperatura (máxima, mínima y media), respectivamente (Zscheischler & Seneviratne, 2017; Mukherjee & Mishra, 2018; Z. Hao et al., 2019; Brunner et al., 2021; Afroz et al., 2023). De estos índices, Bedoya (2024) utilizó el SPI para identificar las sequías, por lo que en este estudio complementaremos con la estimación del STI.

El STI es un índice propuesto para comparar series temporales de temperatura media en diferentes ubicaciones y hacer comparables los extremos de temperatura media diaria (T) y

precipitación acumulada diaria (P). La distribución de las anomalías de T se ajusta directamente a una distribución normal estándar a cada serie temporal de temperatura mensual sin tendencia (Zscheischler et al., 2014). Li et al. (2021) proponen calcular el STI diario con base en la temperatura diaria, ajustando la distribución normal a la temperatura diaria en cada día del año y luego el STI se calcula basándose en la función de distribución acumulativa $G(x)$, como se ve a continuación:

$$G(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (1)$$

$$STI = \varphi^{-1}(q) \quad (2)$$

donde x es la serie temporal de temperatura, x y σ son los parámetros de media y desviación estándar, respectivamente, q es la probabilidad acumulada y φ es la distribución normal estándar. Para el STI, se utiliza un umbral de 0,8 (1,3) para definir condiciones de calor moderadas (graves) (Hao et al., 2021; Cunha et al., 2023).

De esta manera, el análisis del índice STI busca complementar lo obtenido de nuestro análisis proveniente del índice TX90p.

5 Resultados

5.1 Climatología de la cuenca del río Orinoco

La cuenca del río Orinoco, situada en las bajas latitudes del trópico, se destaca por un ciclo anual de temperatura con cambios leves a lo largo del año. Esto se debe a la escasa variación de las temperaturas medias mensuales, las cuales están mayormente influenciadas por el relieve característico de la región. Este relieve presenta diversos pisos térmicos, lo que contribuye significativamente a la homogeneidad térmica observada en la cuenca (Silva León, 2005). En el análisis del ciclo medio anual de los datos de referencia (CHIRTS; **Figura 5.1**), se evidencia lo mencionado anteriormente. En NORI y SORI, las temperaturas máximas (Tmax) oscilan entre los 29°C en junio y los 33°C en marzo, aproximadamente, coincidiendo con la temporada húmeda y seca, respectivamente. Al comparar el ciclo medio anual de ERA5 con el de CHIRTS, se observa un patrón similar en ambas regiones, donde la Tmax más alta se registra en marzo (temporada seca) y la más baja en junio (temporada húmeda). No obstante, ERA5 subestima los valores de Tmax en todos los meses y en las dos subregiones, mostrando valores comprendidos entre 27°C y 31.5°C en NORI, y entre 26.5°C y 29.5°C en SORI. Esta discrepancia sugiere una diferencia en la representación de las temperaturas máximas entre los datos del reanálisis y los datos de referencia. La existencia de sesgos en la representación de la topografía por parte del reanálisis (ver **Figura 5.1**) puede ser una razón para estas diferencias.

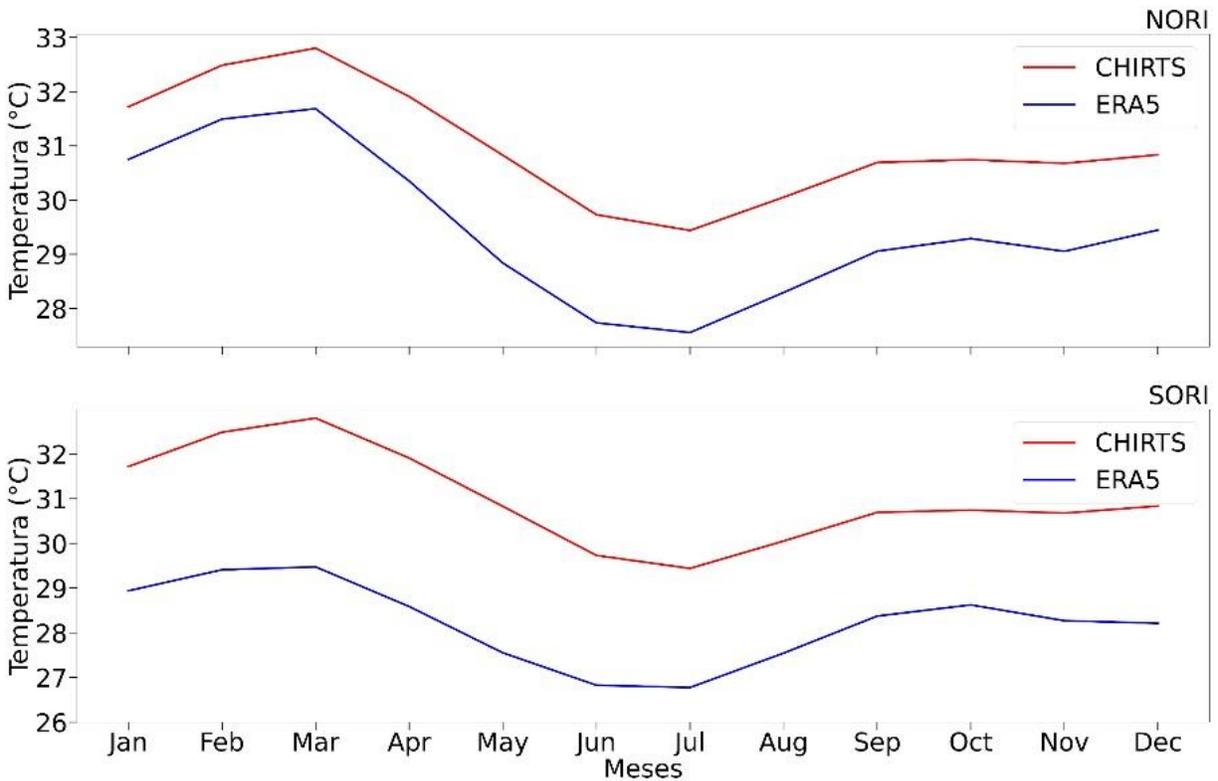


Figura 5.1. Ciclo medio anual de temperatura máxima de NORI (arriba) y SORI (abajo) a partir de información de CHIRTS (línea roja) y ERA5 (línea azul).

Para analizar estas diferencias y su manifestación espacial en la cuenca, continuamos con la Figura 5.2, que ilustra la diferencia entre el campo medio estacional de Tmax de ERA5 y CHIRTS. Se destaca una subestimación generalizada de las Tmax en la mayor parte de la cuenca durante todas las estaciones del año, llegando a ser incluso superior a los 3°C a lo largo de las cordilleras circundantes en todas las temporadas del año. En el caso de SORI, esta subestimación es más pronunciada durante la temporada seca (Diciembre a Febrero (DEF) y Marzo a Mayo (MAM)), así como en la desembocadura del río Orinoco durante la temporada seca (DEF). Además, se observa una sobreestimación de las temperaturas en el suroeste de NORI, con valores que superan los 5°C durante la temporada seca (DEF), así como en el noreste de NORI. Curiosamente, el único punto donde ERA5 muestra valores similares a CHIRTS es en el centro de SORI durante todas las temporadas. Estas discrepancias espaciales revelan la complejidad de la representación de las temperaturas en la cuenca del río Orinoco y sus alrededores.

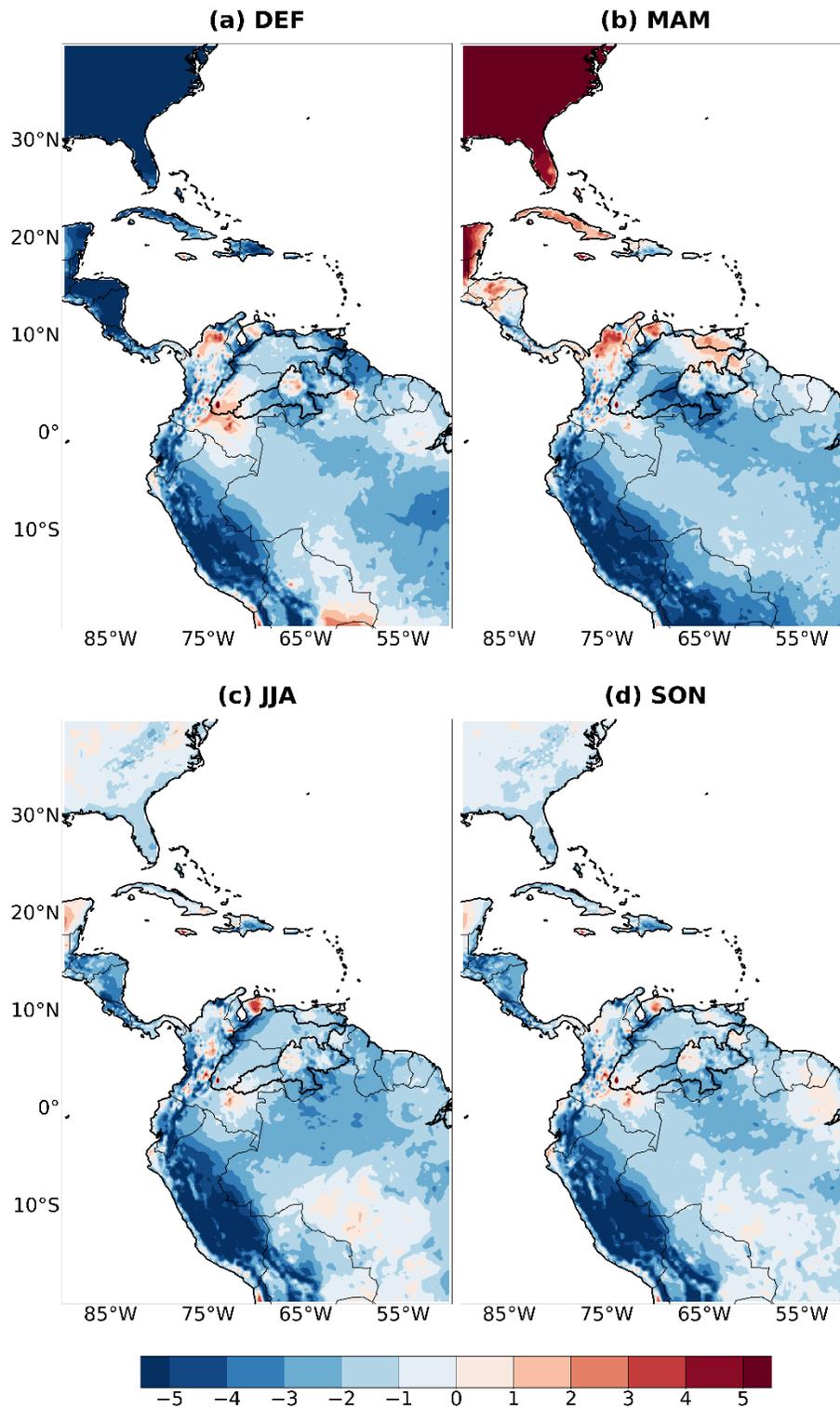


Figura 5.2. Patrón espacial estacional de la diferencia de T_{max} entre ERA5 y CHIRTS (ERA5-CHIRTS).

A pesar de la subestimación tanto espacial como temporal de la T_{max} por parte del reanálisis ERA5 para esta región, este producto proporciona una representación adecuada de los períodos en los que la T_{max} alcanza sus valores máximos y mínimos. Además, es importante destacar que al ser ERA5 una base de datos con una disponibilidad de datos más recientes que CHIRTS, su uso permitirá analizar el comportamiento de las T_{max} durante las sequías ocurridas en el Orinoco después del año 2016.

5.2 Identificación de ocurrencia de extremos combinados cálidos y secos

Para definir los periodos en donde hubo concurrencia de extremos cálidos y secos, se analizaron las temperaturas extremas durante cada periodo de sequía previamente identificados por Bedoya (2024). Para esto se utilizó un umbral correspondiente al p90 de la distribución de las anomalías de T_{max} diaria durante el periodo de estudio (1981-2021), el cual define que cualquier valor de anomalía de T_{max} diaria que exceda este valor se considera como una temperatura extrema. Por consiguiente, se determinó que el p90 de la distribución de anomalías de temperatura promedio sobre la cuenca corresponde a 1,35 °C en NORI y 1,42°C en SORI, lo cual indica que SORI ha alcanzado valores de T_{max} más altos en comparación con NORI. En la **Figura 5.3** se observa cómo se supera el p90 para NORI y SORI durante los cinco periodos cuando la cuenca atravesó por un evento extremo seco, según los periodos de sequía identificados en el trabajo de Bedoya (2024).

Para los diferentes periodos de sequía, se extrajeron intervalos desde 12 días hasta 46 días consecutivos en los que ocurrió un CDHE, es decir, días seguidos durante un evento de sequía para los que las anomalías de T_{max} diaria superan el p90, siendo flexibles hasta por un día en el que la anomalía de T_{max} no haya sido mayor al p90 (sombreado rojo en la **Figura 5.4**). Con esto, los periodos de sequías para los que se identificó ocurrencia de eventos CDHE de al menos 12 días consecutivos corresponden a la sequía 2009-2010 (**Figura 5.4a**), 2015-2016 (**Figura 5.4b**) y 2020 (**Figura 5.4c**). En las sequías 2013-2014 y 2018-2019 no se encontraron periodos tan largos de días consecutivos con temperaturas extremas, ya que la ocurrencia de extremos cálidos fue más intermitente.

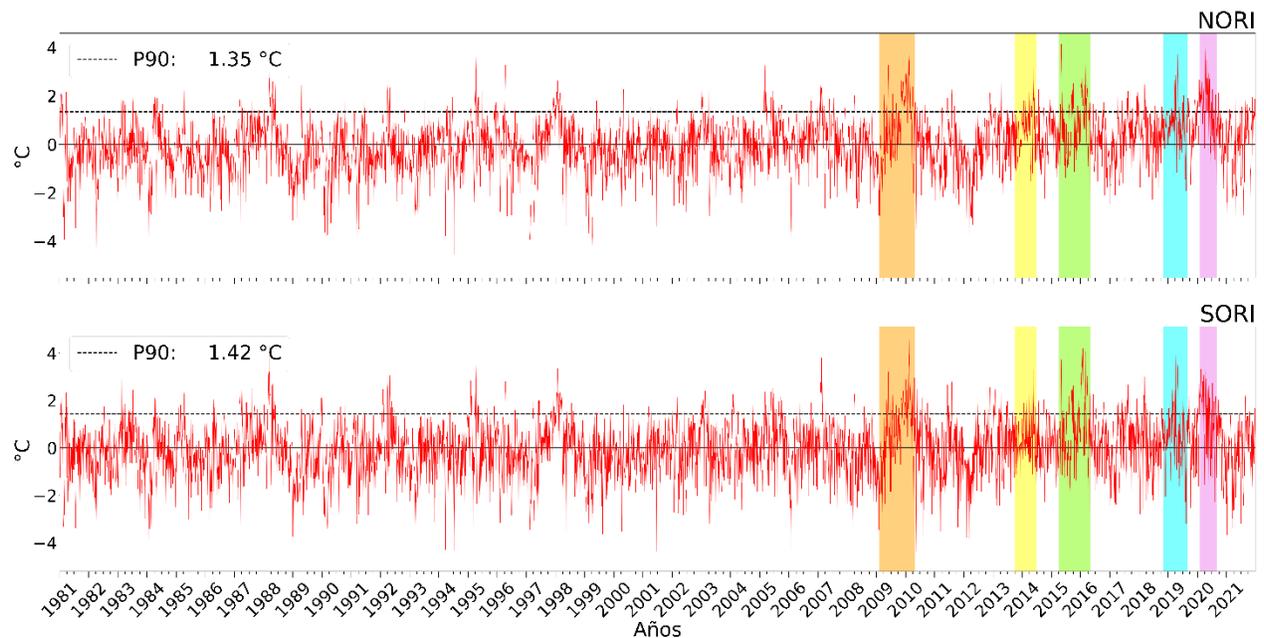


Figura 5.3. Serie de anomalías de Tmax diaria de ERA5 y su percentil 90 (p90; línea negra punteada) en NORI (arriba) y SORI (abajo). Los periodos resaltados en bloques de colores corresponden a las sequías identificadas por Bedoya (2024): 2009-2010, 2013-2014, 2015-2016, 2018-2019 y 2020. Para facilidad, la línea negra sólida muestra la línea de 0°C de anomalía de Tmax diaria.

Para los tres periodos de sequías en los que se identificó la ocurrencia de CDHE, se extrajeron los intervalos de días consecutivos en los que ocurrieron eventos de solo sequía (DE), es decir, días consecutivos para los que las anomalías de Tmax no superaron el p90, identificando intervalos desde 8 días hasta 63 días consecutivos con condiciones de solo extremo seco. Así mismo, se flexibilizó el criterio de persistencia hasta por 1 día en el que la anomalía de Tmax haya sido mayor a p90 (sombreado naranja en la **Figura 5.4**). La **Figura 5.4** muestra la evolución de las anomalías de Tmax diaria para estas tres sequías (feb/2009-abr/2010, abr/2015-abr/2016 y feb/2020-ago/2020). Se observa que NORI es la subregión con los intervalos de días consecutivos más largos, tanto de CDHE como de DE. Para SORI se consideraron los mismos eventos CDHE y DE que para NORI. Aunque los intervalos de días consecutivos en SORI son más intermitentes, indicando pulsos de recuperación en los extremos, se observa, en términos generales, que cuando ocurre un evento CDHE, muchos de los días superan el p90 de Tmax diaria mientras que cuando se trata de un evento DE, la mayoría de las anomalías de Tmax diarias son inferiores al p90.

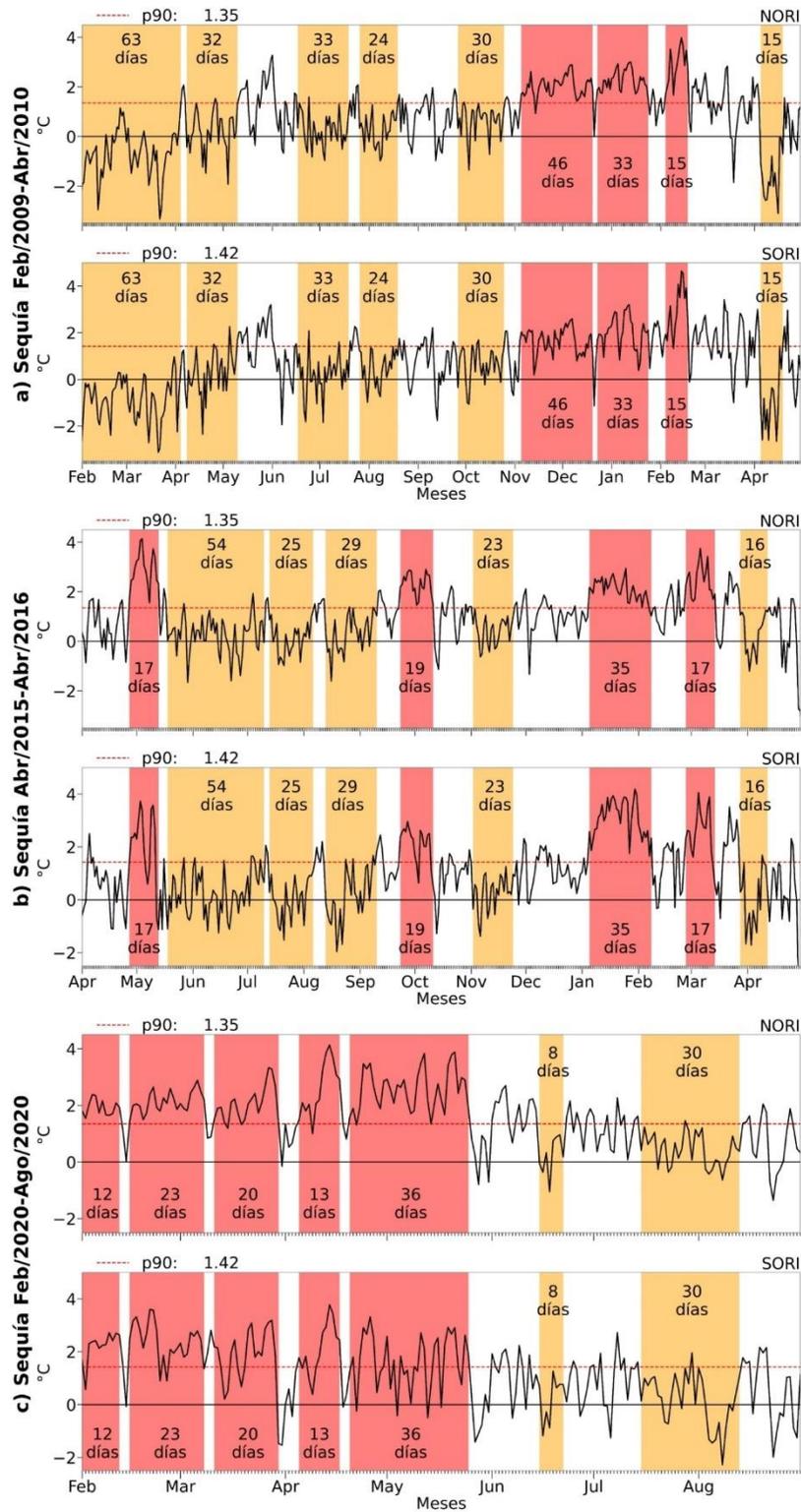


Figura 5.4. Series de anomalías de Tmax diaria de ERA5 con los subperiodos de días consecutivos de DE (sombreado naranja) y de CDHE (sombreado rojo), durante las sequías de feb/2009-abr/2010 (a), abr/2015-abr/2016 (b) y feb/2020-ago/2020(c).

Las anomalías de Tmax diaria para cada intervalo de eventos CDHE y DE identificado en orden cronológico (**Figura 5.5**) muestran cambios notables en las Tmax diarias entre los extremos simples (DE) y los extremos combinados (CHDE), lo que indica una variabilidad significativa en la Tmax durante cada una de las tres sequías. Además, al considerar que el p90 de anomalías de Tmax diaria para la región NORI fue de 1,35 °C y para la región SORI fue de 1,42°C, se observa claramente que, durante los eventos CDHE en cada subregión, las anomalías de Tmax diaria alcanzaron valores mucho más elevados que su p90, llegando incluso a superar los 4°C. En la mayoría de los subperiodos donde hubo DE (es decir, las anomalías de Tmax no superaron el p90), se logra ver que las anomalías de Tmax en ambas regiones estuvieron entre valores cercanos a cero y positivos, aunque las anomalías son negativas en su mayoría para el primer subperiodo de DE durante la sequía año 2009.

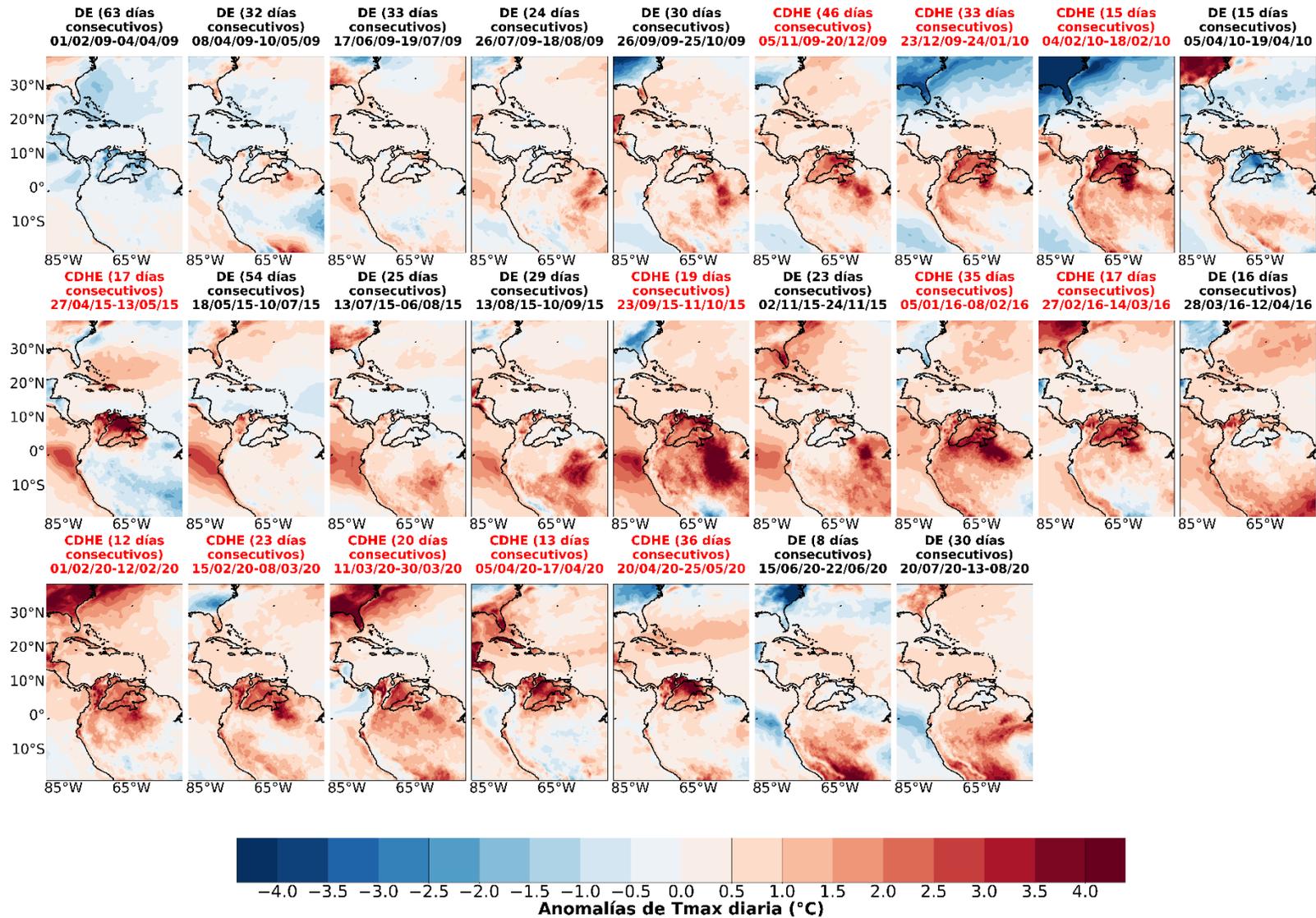


Figura 5.5. Mapas de anomalías de Tmax diaria durante los subperiodos de extremos secos (DE; título en negro) y extremos combinados (CDHE; título en rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo).

5.3 Condiciones superficiales durante extremos secos simples y extremos compuestos cálidos y secos en el Orinoco

Las sequías meteorológicas sumadas a la ocurrencia de altas temperaturas pueden desencadenar déficits de SM por un aumento de ET debido a una atmósfera más seca. En la **Figura 5.6**, podemos ver cómo en los dos primeros meses (subperiodo de 63 días seguidos durante DE) de la sequía 2009-2010, se identifica un exceso de SM en la capa superficial del suelo (primeros 7cm de la capa de suelo). A lo largo de este intervalo de sequía sin ocurrencia de temperaturas extremas, se observa que la SM disminuye a valores más cercanos a la climatología en toda la cuenca. En contraste, bajo la ocurrencia de condiciones CDHE, se identifica que la SM presenta anomalías predominantemente negativas sobre la cuenca, indicando mayor déficit de agua en el suelo superficial. En el primer periodo de CDHE elegido, de noviembre a diciembre de 2009 (46 días seguidos), se tuvo un déficit de SM en casi toda la región NORI y en el sureste de SORI que limita con el Amazonas. El déficit de SM tanto de diciembre de 2009 a enero de 2010 (33 días) como en febrero de 2010 (15 días), correspondientes a intervalos con CDHE, fue más alto en la región que limita con la cordillera oriental de los Andes colombianos, en el delta del Orinoco y en todo el este de la región SORI, extendiéndose hacia el Amazonas. El último subperiodo elegido de esta sequía, correspondiente a 15 días consecutivos de ocurrencia de DE en abril de 2010, ya estaba finalizando la sequía 2009-2010, y se tuvo una recuperación en la SM con valores muy positivos en NORI y en el este de SORI.

En el primer subperiodo elegido para la sequía 2015-2016 (**Figura 5.6**), en el cual se tuvo un CDHE de 17 días seguidos entre los meses de abril a mayo de 2015, se ve un déficit muy alto de SM en más de la mitad de NORI hacia el este, incluyendo el límite con el este de SORI y extendiéndose hacia el norte por la costa Caribe. En los siguientes subperiodos de ocurrencia de DE no se notan cambios muy marcados en la SM sobre la cuenca, tendiendo a presentar condiciones climatológicas y a recuperarse en el último subperiodo de marzo-abril de 2016, que corresponde a la etapa final de la sequía. Sin embargo, cuando la cuenca atraviesa por intervalos largos de CDHE, como en septiembre y octubre de 2015 (19 días seguidos) se vuelve a identificar un déficit de SM en toda la cuenca, siendo más fuerte por el este de NORI y en la desembocadura del río Orinoco.

Entre enero y febrero de 2016 (35 días seguidos de CDHE), el déficit de SM es mayor en SORI, mientras que en el último subperiodo de CDHE de 2016, el déficit de SM está más localizado en la franja del centro de toda la cuenca, entre NORI y SORI. Finalmente, en todos los periodos de CDHE durante la sequía 2020, se identifica un leve déficit generalizado de SM en toda la cuenca. Se observa que a mayor duración del evento CDHE, se obtiene un mayor déficit de SM. En los últimos eventos identificados en la sequía 2020, que corresponden a eventos DE, la SM se recuperó hasta lograr condiciones climatológicas en toda la cuenca.

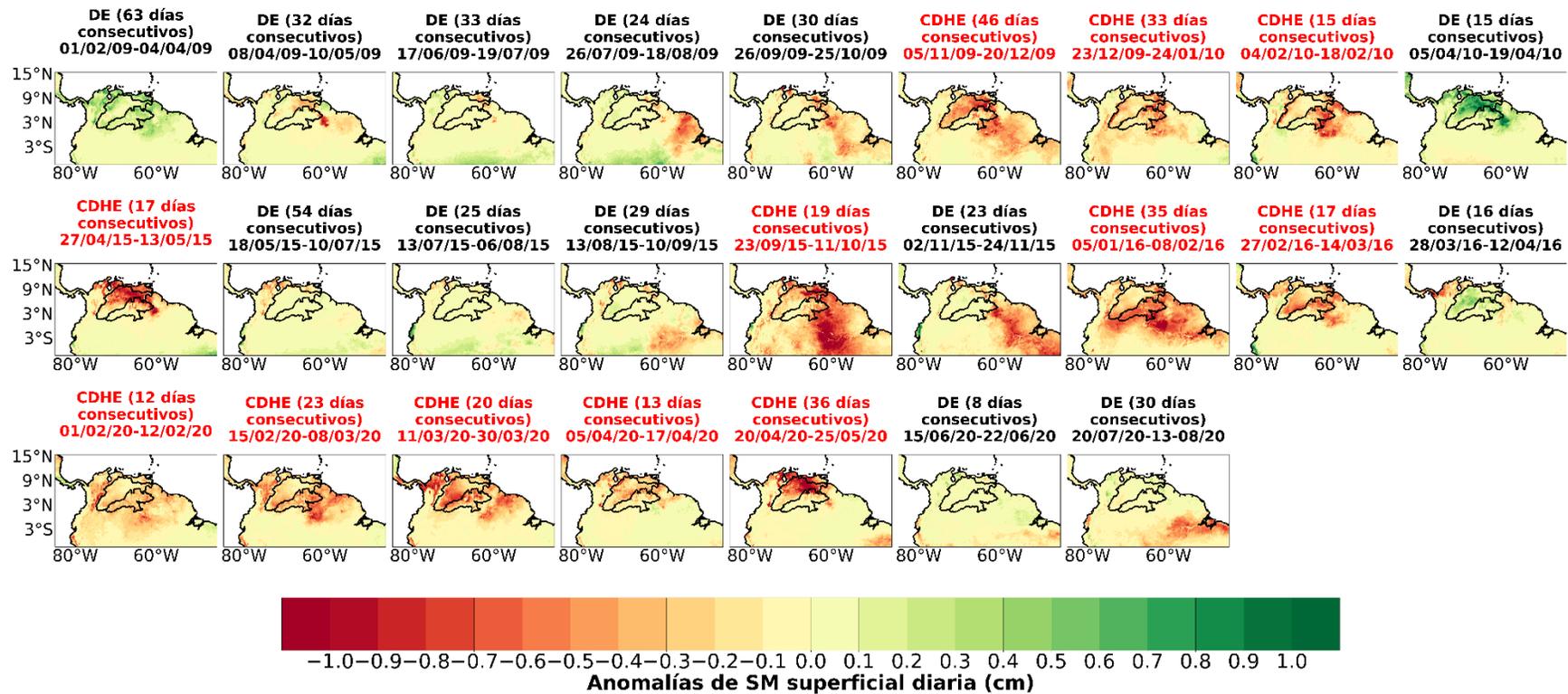


Figura 5.6. Mapas de anomalías de SM en la capa superficial del suelo (cm) durante los subperiodos de extremos secos (DE; título negro) y extremos combinados cálidos y secos (CDHE; título rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo).

Por otro lado, en cuanto a la SM en el suelo profundo (entre 7 y 289 cm de profundidad), la **Figura 5.7** muestra que, al igual que en el suelo superficial, en la sequía 2009-2010, hubo un exceso de SM en toda la cuenca, mayormente en SORI durante los primeros dos meses de la sequía (febrero-abril de 2009) y, a partir de esta fecha, los eventos DE siguientes comenzaron a mostrar un déficit de SM en toda la cuenca. El comportamiento de la SM en la capa profunda durante la ocurrencia de un evento CDHE sugiere que el déficit de SM es mucho mayor que para eventos DE, abarcando el área total y los alrededores de la cuenca (costa Caribe, Amazonas y Guayanas). Al finalizar esta sequía, esta capa muestra una recuperación en su SM con excesos en NORI y en algunos puntos en SORI; sin embargo, el déficit de SM persistió en el este de NORI, por donde desemboca el río Orinoco.

En esa misma **Figura 5.7**, la región NORI y parte de SORI muestran un déficit de SM en el primer periodo de CDHE de la sequía 2015-2016. Este déficit experimentó una reducción espacial en los periodos subsiguientes de DE, quedando con déficit en la parte noreste de NORI (por la costa Caribe), por la cordillera de los Andes y la cordillera de la Costa. Finalmente, mientras que el déficit de SM en el suelo profundo se volvió a extender por toda la cuenca y alcanzó valores más negativos cuando la región experimentó un CDHE en septiembre de 2015, para los últimos dos subperiodos de eventos CDHE de esta sequía se localizó una SM cerca del promedio climatológico en el centro de NORI mientras que en el resto de la cuenca la SM mostró un déficit.

En el transcurso de la sequía 2020 se observa que en los cuatro eventos de CDHE, el déficit de SM comienza en el sur de ambas regiones (NORI y SORI). A medida que cada subperíodo de CDHE tiene mayor duración, el déficit se expande gradualmente hacia el norte, siendo SORI la región que más entra déficit de SM. En los últimos dos subperíodos, cuando solo se registraron días de DE, se observó una recuperación de la SM en términos del área afectada, siendo esta recuperación leve en NORI y más significativa en SORI.

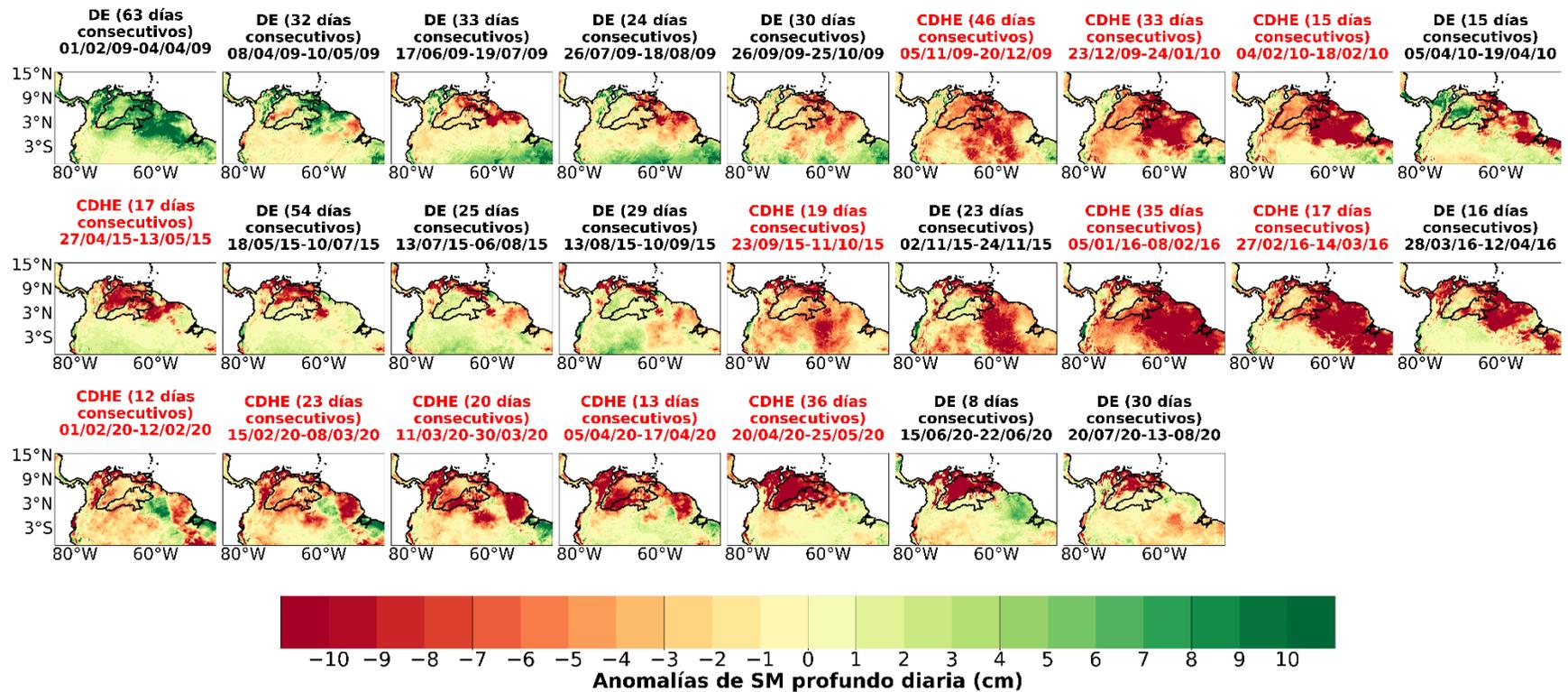


Figura 5.7. Mapas de anomalías de SM) del suelo profundo durante los subperiodos de extremos secos (DE; título negro) y extremos combinados cálidos y secos (CDHE; título en rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo).

La **Figura 5.8** muestra un compuesto de la SM en el suelo superficial y profundo para todos los eventos en los que se superó el p90 de la Tmax durante las sequías estudiadas (CDHE) y para todos los eventos en los que no se superó el p90 de la Tmax durante estas sequías (DE). La figura indica que al tener ocurrencia de un extremo seco individual (DE) como es el caso de una sequía meteorológica, el suelo sigue teniendo sus condiciones climatológicas de SM; sin embargo, cuando esta condición de sequía se combina con la ocurrencia de temperaturas extremas, el suelo en promedio responde rápidamente a estos déficits de precipitación (y aumentos en la ET), exacerbando los efectos en la SM de la región, lo que provoca déficits de SM, como se observa para el suelo superficial (**Figura 5.8**, arriba) .

En cuanto al suelo profundo (**Figura 5.8**, abajo), cuando la cuenca experimentó un periodo de sequía sin temperaturas extremas (DE), la subregión NORI mostró un déficit pronunciado y mucho mayor que SORI. Cuando se identificaron condiciones de CDHE, se observa que el déficit en NORI se mantuvo igual de elevado que durante eventos DE y la SM en SORI muestra déficits mayores, alcanzando valores similares a los de NORI.

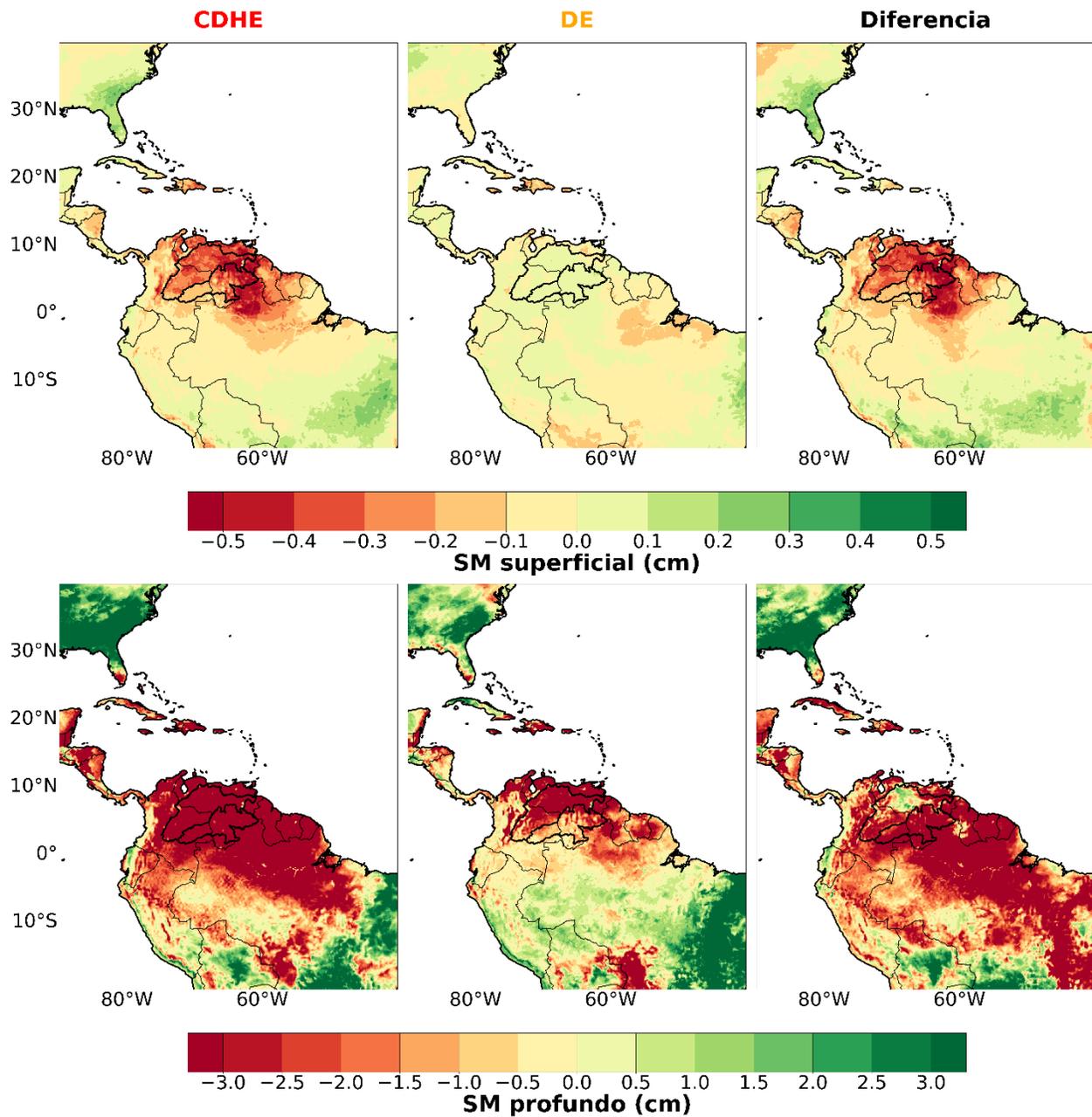


Figura 5.8. *Compuestos de anomalías de SM del suelo superficial (arriba) y del suelo profundo (abajo) para extremos combinados cálidos y secos (CDHE; derecha), extremos secos (DE; centro) y la diferencia entre ambos tipos de extremos (izquierda).*

5.4 Patrones atmosféricos durante extremos secos simples y extremos compuestos cálidos y secos en el Orinoco.

5.4.1 Vapor de agua en la columna atmosférica y vientos en niveles bajos de la troposfera.

Con el objeto de identificar las condiciones atmosféricas durante los eventos DE y CDHE identificados, analizamos las anomalías de TCWV y el comportamiento promedio de los vientos en la baja tropósfera a 850hPa (**Figura 5.9**). De los cinco primeros subperiodos de DE durante la sequía 2009-2010, solo en dos hubo anomalías negativas de TCWV en toda la cuenca, durante los meses de abril-mayo y septiembre-octubre de 2009. Durante la ocurrencia de eventos CDHE, las anomalías de TCWV decrecen a valores muy negativos en toda la cuenca, mostrando un déficit de vapor de agua en la atmósfera que agrava la sequía meteorológica. En cuanto a los vientos en niveles bajos, se observa la presencia de condiciones anticiclónicas en el Atlántico norte y el mar Caribe durante todos los subperiodos. Sin embargo, estas condiciones anticiclónicas se localizan más cercanas a la cuenca del Orinoco durante eventos CDHE.

En la sequía 2015-2016 (**Figura 5.9**) se logra ver que en los periodos de ocurrencia de eventos CDHE hay mucho menos vapor de agua de lo normal, lo que puede reducir la cantidad de precipitación sobre el Orinoco, mientras que en los periodos de DE, la cuenca tuvo un incremento en el TCWV, con valores más altos de lo normal sobre la cuenca. En esta sequía, los vientos en niveles bajos también mostraron una circulación anticiclónica en el Atlántico norte y el mar Caribe, sugiriendo que este anticiclón se extendió sobre la cuenca del Orinoco durante los eventos de CDHE.

La sequía 2020 (**Figura 5.9**) inicia en febrero bajo condiciones de CDHE, con un déficit alto de TCWV en toda cuenca. En los siguientes subperiodos de CDHE, se sigue observando anomalías muy negativas de TCWV, aunque SORI se recupera a condiciones climatológicas para marzo-mayo de 2020. Al salir de los CDHE y entrar en condiciones DE, las anomalías de TCWV aumentan en toda la cuenca y sus alrededores, mostrando anomalías positivas. En esta sequía se observa un sistema anticiclónico en niveles bajos sobre el Atlántico norte y el mar Caribe en los subperiodos de CDHE de 12, 20 y 36 días consecutivos, mientras que para los subperiodos de DE, este sistema se identifica en el evento de 30 días consecutivos.

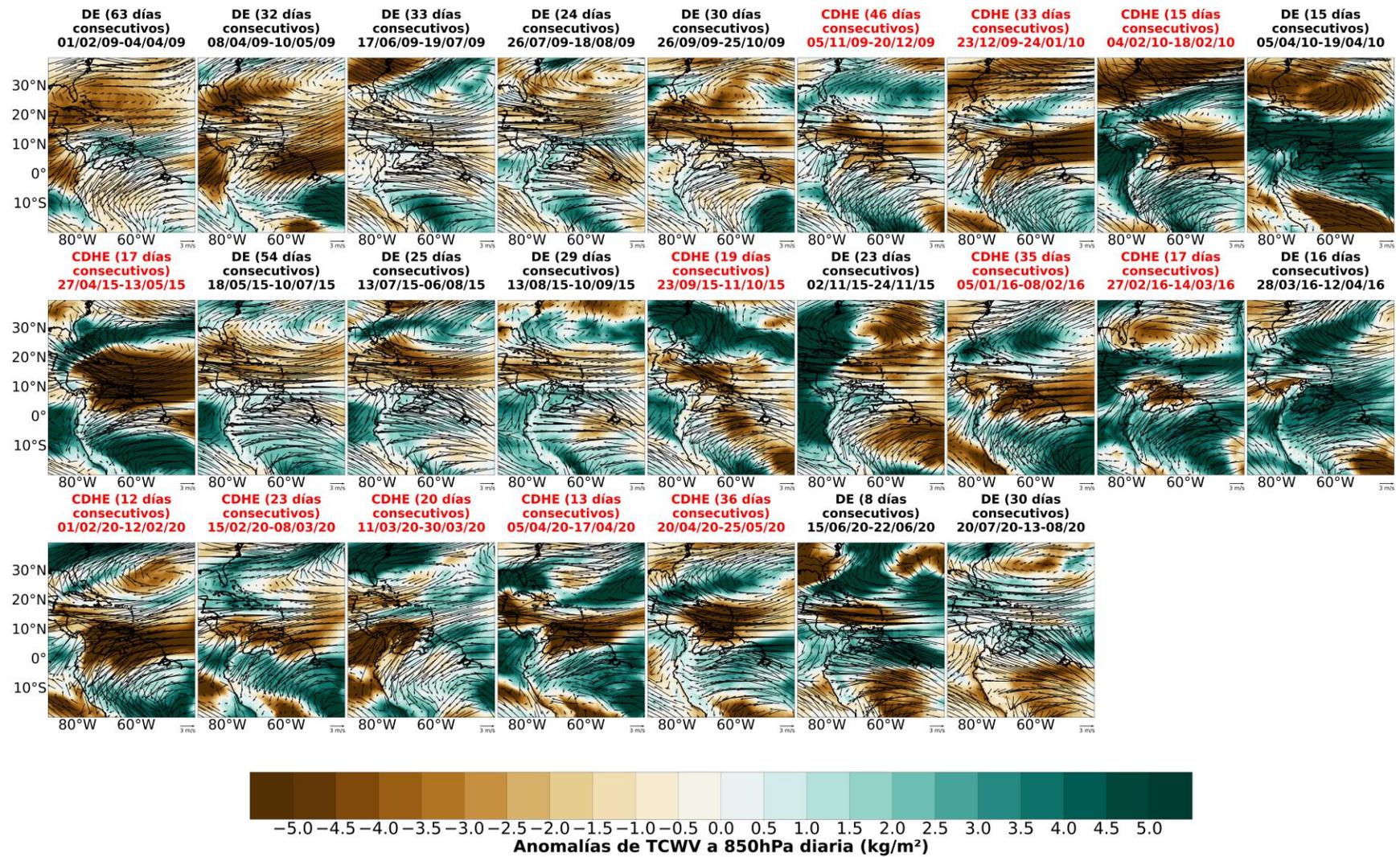


Figura 5.9. Mapas de anomalías de TCWV (kg/m^2 ; en colores) y vientos a 850hPa (vectores) durante los subperiodos de extremos secos (DE; título negro) y extremos combinados cálidos y secos (CDHE; título en rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo).

La **Figura 5.10** muestra las anomalías de vientos a 850hPa, tanto en magnitud (en colores) como en dirección (vectores). A comienzos de la sequía 2009-2010, durante los dos primeros subperiodos de DE (febrero-abril y mayo de 2009), se observa un fortalecimiento de los vientos alisios sobre NORI, con una dirección hacia el suroeste. Estos vientos se debilitan en velocidad en los siguientes meses (junio, julio y agosto de 2009), correspondientes a condiciones DE. Los vientos alisios se vuelven a fortalecer para septiembre y octubre de 2009, subperiodo en el que se continuaba bajo condiciones DE. Al entrar en el subperiodo de CDHE entre noviembre y diciembre de 2009, estos vientos continuaron fortalecidos sobre la cuenca, y se identifica un sistema anticiclónico fortalecido sobre el Atlántico norte y el mar Caribe (comparar **Figura 5.10** con **Figura 5.9**). Sin embargo, para los últimos dos periodos de CDHE, los vientos alisios se debilitaron mostrando una dirección hacia el noreste.

La sequía 2015 inicia con un sistema anticiclónico en el Atlántico norte y el mar Caribe durante el primer subperiodo, bajo la ocurrencia de un CDHE entre los meses de abril y mayo; además se observa unos vientos alisios fortalecidos con una dirección hacia el suroeste de la cuenca. Durante los siguientes tres periodos siguientes en los que ocurrieron condiciones DE, la velocidad de los vientos alisios sobre la cuenca disminuyó. Este debilitamiento se pronuncia durante los últimos dos eventos de CDHE de esta sequía, con valores muy negativos en la velocidad y una desviación en los vientos con componentes más hacia el noreste (en el evento de 35 días consecutivos) y hacia el sureste (en el evento de 17 días consecutivos).

Al igual que en la sequía 2015-2016, en la sequía 2020 (**Figura 5.10**) se observa que esta inicia con un sistema anticiclónico fortalecido en el Atlántico norte y el mar Caribe y, en este caso, unos vientos alisios más cercanos a los climatológicos sobre la cuenca, tanto en velocidad como en dirección. En el siguiente subperiodo de CDHE (febrero-marzo de 2020), el sistema anticiclónico ya no se observa y sobre la cuenca se identifican unos vientos alisios con menor velocidad de lo normal. Estos vientos se fortalecen sobre la región en los siguientes subperiodos de CDHE para finalmente debilitarse en el último subperiodo de CDHE, durante abril-mayo de 2020. En este último subperiodo de CDHE, vuelve a fortalecerse la circulación anticiclónica sobre el Atlántico norte y el mar Caribe.

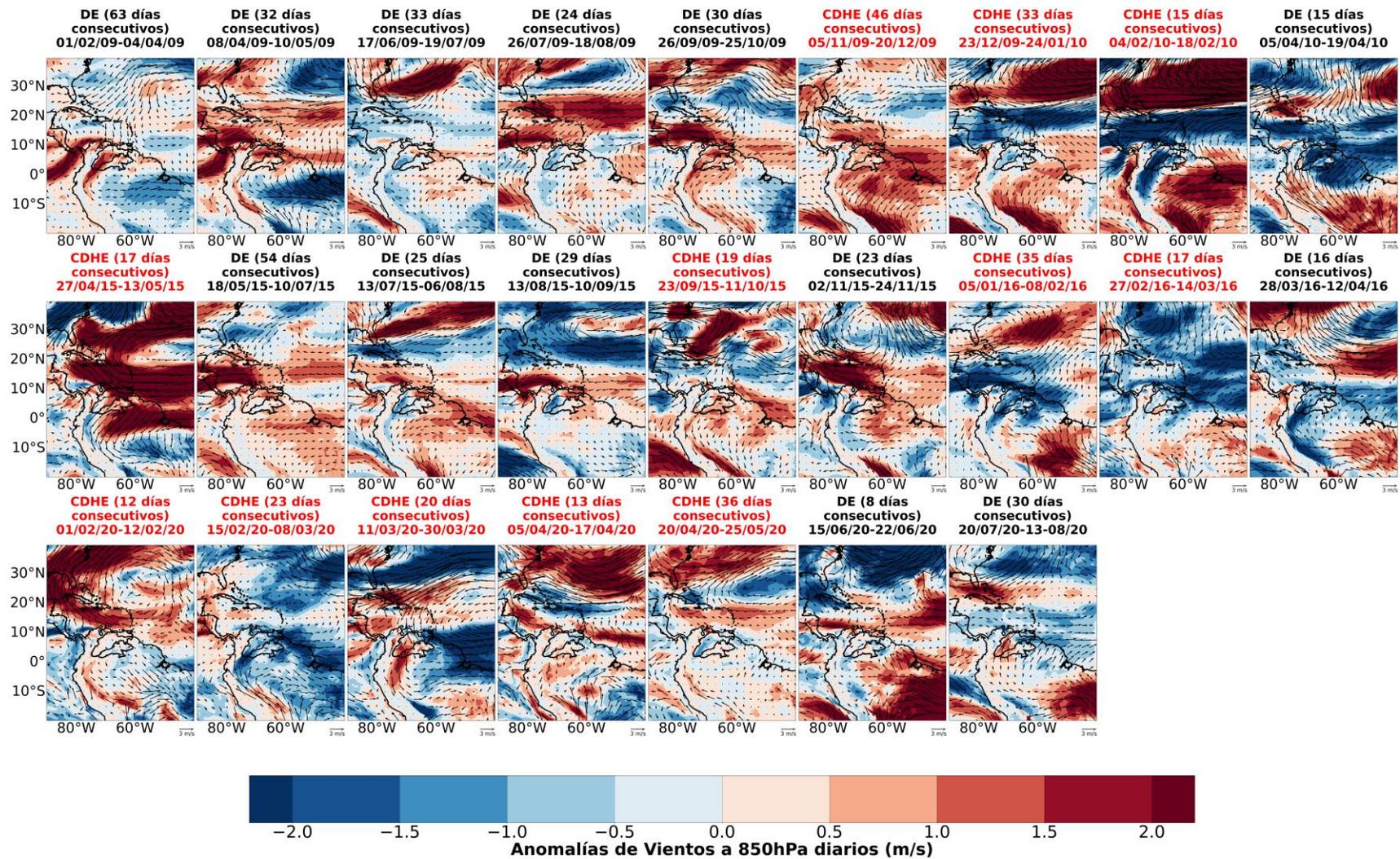


Figura 5.10. Mapas de anomalías de vientos (m/s) a 850hPa durante los subperiodos de extremos secos (DE; título negro) y extremos combinados cálidos y secos (CDHE; título en rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo).

El comportamiento promedio del TCWV y los vientos en la baja troposfera durante estos dos tipos de extremos (**Figura 5.11**) sugiere que el déficit de TCWV se fortaleció al ocurrir la combinación de extremos cálidos y secos, lo que se traduce en que cuando ocurre un CDHE, hay menos vapor de agua de lo normal en toda la columna atmosférica sobre el Orinoco y sobre el mar Caribe, lo cual agrava las sequías meteorológicas.

El OLLJ es una corriente de vientos que transporta humedad desde el Atlántico norte. Climatológicamente, esta circulación muestra un fortalecimiento durante los meses de diciembre, enero y febrero, típicamente, y exhibiendo un núcleo por debajo de los 800hPa (Builes-Jaramillo et al., 2022; Martínez et al., 2022; Correa et al., 2024). En la **Figura 5.10** se observa que en la mayoría de los eventos CDHE que ocurren en uno de los meses de fortalecimiento típico del OLLJ, este no se vio fortalecido. Al analizar el promedio de todos los eventos, se observa un debilitamiento de los vientos alisios sobre la cuenca durante los eventos CDHE (**Figura 11**, abajo), que debilita su vez la activación del OLLJ. Finalmente, la **Figura 5.11** (arriba) muestra que en ambos tipos de extremos (CDHE y DE) se observa un sistema anticiclónico en el Atlántico norte y el mar Caribe. Sin embargo, estos sistemas anticiclónicos en niveles bajos no parecen fortalecerse con respecto a la climatología para ninguno de los dos tipos de extremos (**Figura 5.11**, abajo).

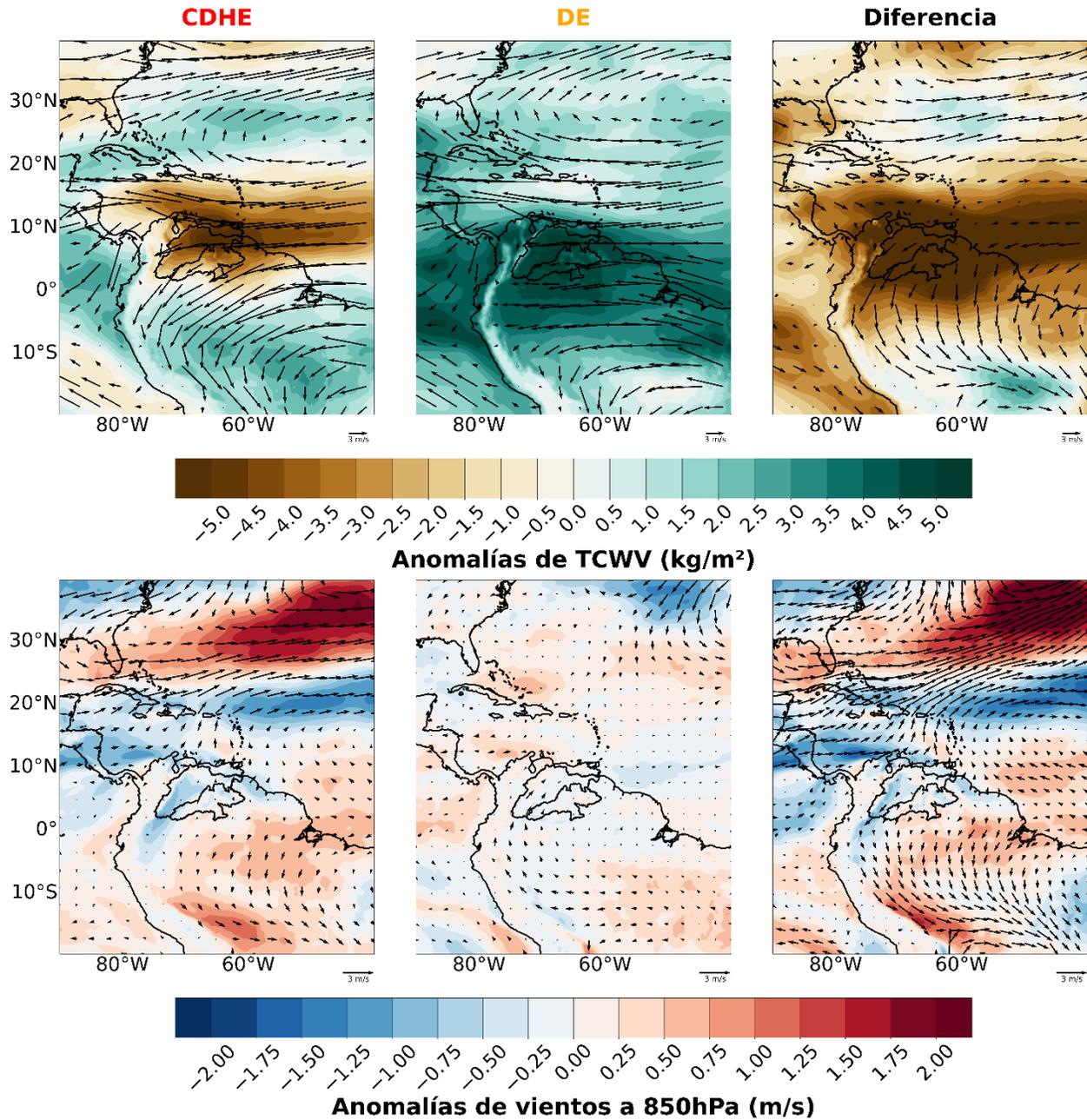


Figura 5.11. *Compuestos de anomalías de TCWV (arriba) y anomalías de vientos a 850hpa (abajo) para extremos compuestos cálidos y secos (CDHE; derecha), extremos secos (DE; centro) y diferencia entre ambos tipos de extremos (izquierda).*

5.4.2 Humedad relativa y vientos en niveles medios de la troposfera

La HR a 500 hPa desempeña un papel crucial en la comprensión de la dinámica atmosférica durante eventos secos como los DE y CDHE. Esta variable nos proporciona información sobre la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera en la mitad de la troposfera. Su análisis, junto con los vientos a 500hPa, nos permite evaluar la disponibilidad y transporte de humedad en niveles medios de la troposfera, lo que puede influir en la formación y mantenimiento de sistemas meteorológicos relevantes para la generación de precipitación en esta región. De esta manera, la **Figura 5.12** muestra anomalías de HR a 500 hPa y vientos a 500hPa. Durante la sequía 2009-2010, específicamente en el tercer subperíodo de DE que duró 33 días consecutivos, se observa que la cuenca experimenta una HR500 ligeramente por debajo de lo normal. Además, se comienza a notar la aparición de una circulación de vientos anticiclónicos en el Atlántico norte. En el siguiente subperíodo DE, que duró 24 días consecutivos, esta circulación anticiclónica se intensifica y la HR comienza a disminuir, tanto en el Atlántico norte como en el mar Caribe.

Durante el primer evento de CDHE del año 2009 (**Figura 5.12**), que duró 46 días consecutivos, el centro del sistema anticiclónico se desplaza hacia el sur, entrando en el mar Caribe y extendiéndose hasta la cuenca del río Orinoco. Esto genera un déficit de HR500 en la cuenca, asociado al transporte de aire seco por parte del anticiclón del Caribe. En los últimos dos subperíodos de CDHE, se observa que el sistema anticiclónico aumenta su extensión horizontal y se posiciona sobre la cuenca, agravando el déficit de HR500 en la región y sus alrededores.

Durante el primer periodo CDHE de la sequía 2015-2016 (**Figura 5.12**), se observa un marcado déficit en HR500, con valores inferiores al 24%. Simultáneamente, se registra la presencia de un sistema anticiclónico en el Atlántico norte, localizado al este del mar Caribe, que abarcó a su vez la cuenca del Orinoco. En los subperíodos siguientes, caracterizados por eventos DE, se observa que la cuenca del río Orinoco experimenta una HR500 con valores cercanos a la climatología. Durante estos períodos, se identifica la presencia de un sistema anticiclónico durante el evento DE que duró 25 días consecutivos, así como otro sistema durante un período continuo de 29 días de condiciones DE. Ambos sistemas anticiclónicos se ubicaron más al norte del mar Caribe, lo que provocó un mayor déficit de HR500 en el mar Caribe que en la cuenca del Orinoco. Al

comenzar un nuevo período de CDHE, la HR500 disminuyó nuevamente por debajo del promedio en el Orinoco y sus alrededores, incluyendo la región del Amazonas, coincidiendo con la presencia de un sistema anticiclónico en el Atlántico norte, cuyo centro se ubica muy próximo al Orinoco. En el subperíodo siguiente de condiciones DE, el sistema anticiclónico se desplazó más hacia el norte, ubicando su centro al norte del Caribe, lo que resultó en una recuperación de la HR500 en la cuenca, alcanzando valores por encima de lo normal. Finalmente, en los dos últimos períodos de CDHE, se observa un déficit de HR500, con valores significativamente por debajo de lo normal sobre la cuenca, mientras que el sistema anticiclónico correspondiente a estos subperíodos se posiciona principalmente sobre el mar Caribe.

La sequía 2020 (**Figura 5.12**) tuvo un inicio caracterizado por un déficit de HR500 que se prolongó por 12 días consecutivos, seguido por otro período de 23 días consecutivos con condiciones de déficit de HR500 en la cuenca del río Orinoco, debido a la ocurrencia de episodios de CDHE. Durante estos eventos, se observa la presencia de un sistema anticiclónico situado en el mar Caribe, con su centro ubicado cerca de las Antillas Mayores y Centroamérica. En el siguiente subperíodo de CDHE, no se identifica la presencia de este sistema anticiclónico, aunque se continúa observando un déficit de HR500 en la cuenca, con mayor incidencia en la región NORI que en SORI. Sin embargo, en los dos últimos subperíodos de CDHE, el sistema anticiclónico reaparece, con su centro localizado en Centroamérica y las Antillas Mayores, similar a los dos primeros subperíodos de CDHE de esta sequía. Durante estos periodos, el déficit de HR500 en la cuenca continuó siendo significativamente alto, abarcando toda su extensión. Por último, en esta sequía se tienen dos subperiodos de DE de varios días consecutivos de duración. Se observa que la HR500 se recupera en estos periodos, con valores más altos de lo normal y los sistemas anticiclónicos que se observan en estos periodos están ubicados más hacia el norte, lejos de la cuenca, con centro de convergencia entre 20°N y 30°N.

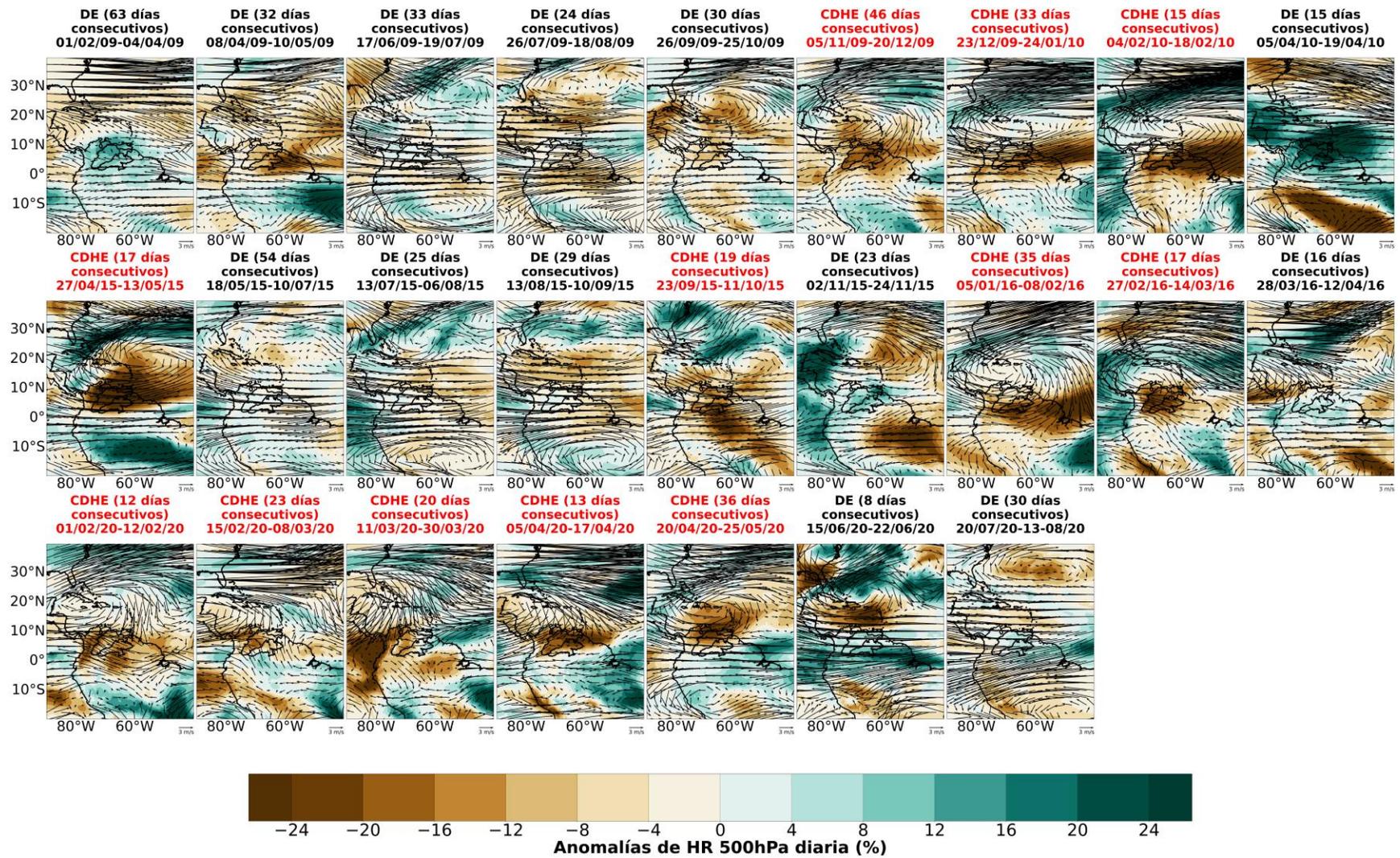


Figura 5.12. Mapas de anomalías de HR (en colores) y vientos a 500hPa (vectores) durante subperiodos de extremos secos (DE; título negro) y extremos combinados cálidos y secos (CDHE; título en rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo).

Para examinar con mayor detalle el comportamiento de los vientos en niveles medios de la troposfera, a 500 hPa, la **Figura 5.13** presenta las anomalías, tanto en magnitud como en dirección, de los vientos a esta altura, durante los tres períodos de sequía analizados. Se evidencia que al inicio de la sequía 2009-2010, en los dos primeros subperíodos de DE, los vientos tuvieron una velocidad menor a lo normal. El sistema anticiclónico a 500hPa, previamente observado durante el subperíodo de 33 días consecutivos bajo condiciones DE (**Figura 5.12**), se identifica también en las anomalías de vientos a 500hPa, indicando un fortalecimiento de esta circulación durante dicho período de DE. Más adelante, en otro subperíodo de DE con duración de 30 días consecutivos, se aprecia un refuerzo similar en el sistema anticiclónico ubicado en el Atlántico norte, al norte del mar Caribe, al igual que en el período previo. Al avanzar hacia los dos últimos subperíodos de CDHE de esta sequía y contrastarlos con los subperíodos de DE, se destaca que en cada subperíodo de CDHE se presenta un sistema anticiclónico significativamente más extenso y fortalecido, localizado al sur del Atlántico norte, abarcando toda la región tropical del norte de Suramérica, Centroamérica y el mar Caribe. Simultáneamente, las velocidades del viento asociadas a este sistema anticiclónico de media troposfera son considerablemente mayores que las habituales sobre la cuenca, y se identifica una marcada dirección anticiclónica del viento (rotación horaria).

En el primer subperíodo CDHE de la sequía 2015-2016 (**Figura 5.13**), se observa un anticiclón fortalecido de gran extensión en todo el mar Caribe y Atlántico norte, acompañado de un fortalecimiento en los vientos sobre la cuenca. Esta misma tendencia se repite en los últimos dos eventos CDHE de esta sequía, para los que se identifica un sistema anticiclónico más fortalecido sobre el Caribe y Suramérica tropical. Sin embargo, en el subperíodo de 23 días consecutivos de DE, no se registra un fortalecimiento en el anticiclón previamente identificado (**Figura 5.12**), y así como durante el subperíodo de 16 días consecutivos de DE, se observa un debilitamiento en los vientos de media troposfera sobre la cuenca.

Al inicio de la sequía 2020, en la **Figura 5.13** se aprecia un fortalecimiento en todos los sistemas anticiclónicos previamente identificados **5** durante los eventos de CDHE (ver **Figura 5.12**). No obstante, solo aquellos de mayor extensión mostraron vientos más rápidos de lo normal en la rama sur de estos sistemas, provocando un fortalecimiento de los vientos a 500hPa sobre la cuenca. El único subperíodo de CDHE durante esta sequía que presentó vientos a 500hPa más

débiles de lo normal fue en el segundo, que tuvo una duración de 23 días consecutivos, dado que el sistema anticiclónico no mostró una extensión anómala hacia Suramérica tropical. Finalmente, durante los períodos de condiciones DE, los vientos a mitad de la troposfera se fortalecieron en el mar Caribe, dejando a la cuenca con vientos menos veloces y una componente marcada hacia el sur.

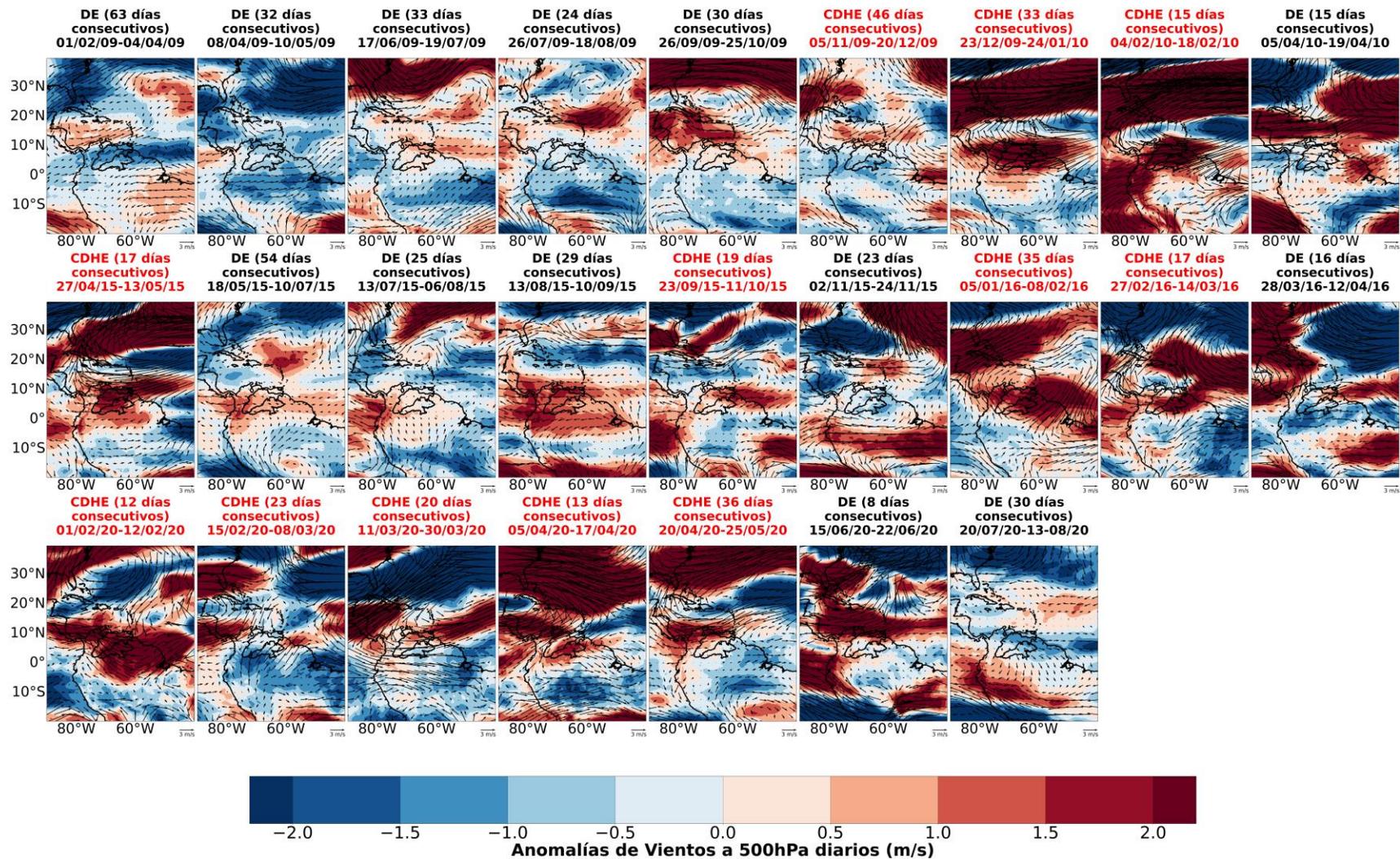


Figura 5.13. Mapas de anomalías de vientos (m/s) a 500hPa durante los subperiodos de extremos secos (DE; título negro) y extremos combinados cálidos y secos (CDHE; título en rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo).

La **Figura 5.14** muestra los compuestos de las anomalías de HR a 500hPa (arriba) y los compuestos de las anomalías del viento a esta misma altura (abajo). Estas figuras muestran que tanto en los eventos CDHE como en los DE se observa la ocurrencia de una circulación anticiclónica de vientos en mitad de la troposfera sobre el mar Caribe. De estas dos circulaciones, la única que se ve fortalecida con respecto a la climatología es la que ocurre durante los CDHE. Además, si bien durante los eventos DE se observa que, en promedio, este sistema anticiclónico se ubica sobre el Caribe, cuando la cuenca se encuentra bajo la ocurrencia de un CDHE, este sistema anticiclónico en niveles medios de la troposfera se fortalece. En cuanto a la HR500, durante los CDHE se observa un mayor déficit de humedad en niveles medios, que puede verse favorecido por el transporte de aire seco desde el sistema anticiclónico ubicado en el Atlántico norte.

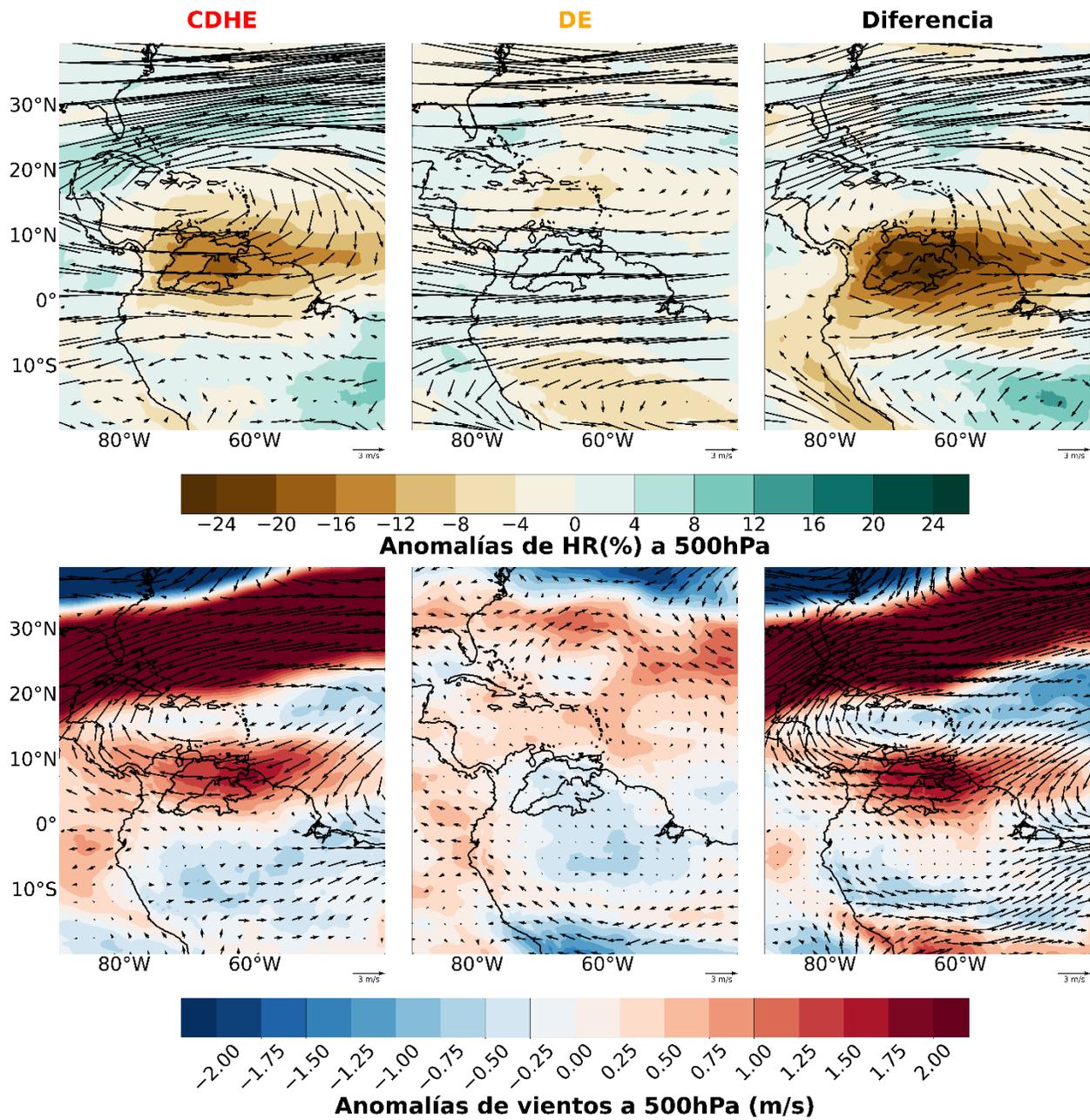


Figura 5.14. Compuestos de anomalías de HR500 (arriba) y anomalías de vientos a 500hPa (abajo) para extremos compuestos cálidos y secos (CDHE; derecha), extremos secos (DE; centro) y diferencia entre ambos tipos de extremos (izquierda).

5.4.3 *Altura geopotencial a 500 hPa*

Las anomalías de vientos a 500hPa mostraron patrones de intensificación de unas formaciones anticiclónicas en el mar Caribe/Atlántico norte tanto para eventos DE como para eventos CDHE, las cuales están asociadas al transporte de aire seco sobre la cuenca, reduciendo la disponibilidad del vapor de agua necesario para la formación de precipitación. Ese déficit de humedad en mitad de la troposfera se ve más pronunciado durante eventos CDHE. Por lo tanto, en este trabajo se busca complementar mediante el análisis de la altura geopotencial a 500 hPa para examinar la magnitud de los sistemas anticiclónicos identificados durante cada sequía.

En la **Figura 5.15** se observa que para la sequía 2009-2010, las alta presiones asociadas al sistema anticiclónico sobre el Atlántico norte comienzan a manifestarse desde el subperiodo de 24 días consecutivos de DE (julio-agosto 2009), ubicado al norte de los 30°N por Estados Unidos. A partir de este subperiodo, se evidencia el déficit de HR500 en la cuenca del río Orinoco (**Figura 5.12**). En el siguiente periodo de 30 días consecutivos de DE, el centro de alta presión se encuentra más cercano a la cuenca, al igual que en el primer subperiodo de CDHE de 46 días consecutivos y se extiende más hacia el sur del Caribe. En los últimos dos subperiodos de CDHE de esta sequía, se observa una alta presión evidenciada por mayores alturas potenciales a 500hPa, con valores muy elevados en sus centros, ubicados hacia el este en el Atlántico norte, y con una gran extensión, abarcando Centroamérica, el Caribe y todo el norte de Suramérica.

A comienzos de la sequía 2015-2016, que se da bajo la ocurrencia de un CDHE, se evidencia una zona extensa de alta presión en el Atlántico norte, con una anomalía en la altura geopotencial a 500hPa muy positiva en el centro y un gradiente de presión elevado hacia la cuenca, lo cual se asocia a la circulación anticiclónica de vientos de alta velocidad que se observa en las anomalías de vientos a 500hPa de la **Figura 5.13**. En los subperiodos siguientes bajo condiciones DE, la alta presión del Atlántico se debilita y vuelve a aparecer con su centro hacia el este del Caribe durante el periodo CHDE de 35 días consecutivos, con gran extensión que abarca la cuenca del Orinoco. En el último subperiodo de esta sequía de 17 días consecutivos de CDHE, la alta presión se sigue observando fortalecida, centrada en el Caribe y en NORI. En el último subperiodo de DE de 16 días consecutivos, el centro de alta presión del sistema anticiclónico se ubica sobre

Centroamérica; sin embargo, no se observa déficit de HR500 para este periodo (**Figura 5.12**) pues los vientos de este anticiclón no pasaron sobre la cuenca del Orinoco para aportar aire seco a la región.

El patrón común de las altas presiones que se observan en la sequía 2020 (**Figura 5.15**) indican un fortalecimiento del sistema anticiclónico en mitad de la troposfera, con alturas geopotenciales más altas de lo normal y una ubicación entre el Caribe y el Atlántico norte, hacia el este del Caribe. Debido a que los vientos de estas circulaciones anticiclónicas ingresan a la cuenca del Orinoco, se genera el transporte de aire seco que promovió al déficit de HR500 sobre la región. En el subperiodo de 8 días consecutivos de DE, se continúa viendo un sistema de alta presión de menor extensión horizontal a la observada durante los eventos CDHE y ubicada hacia el norte del Caribe.

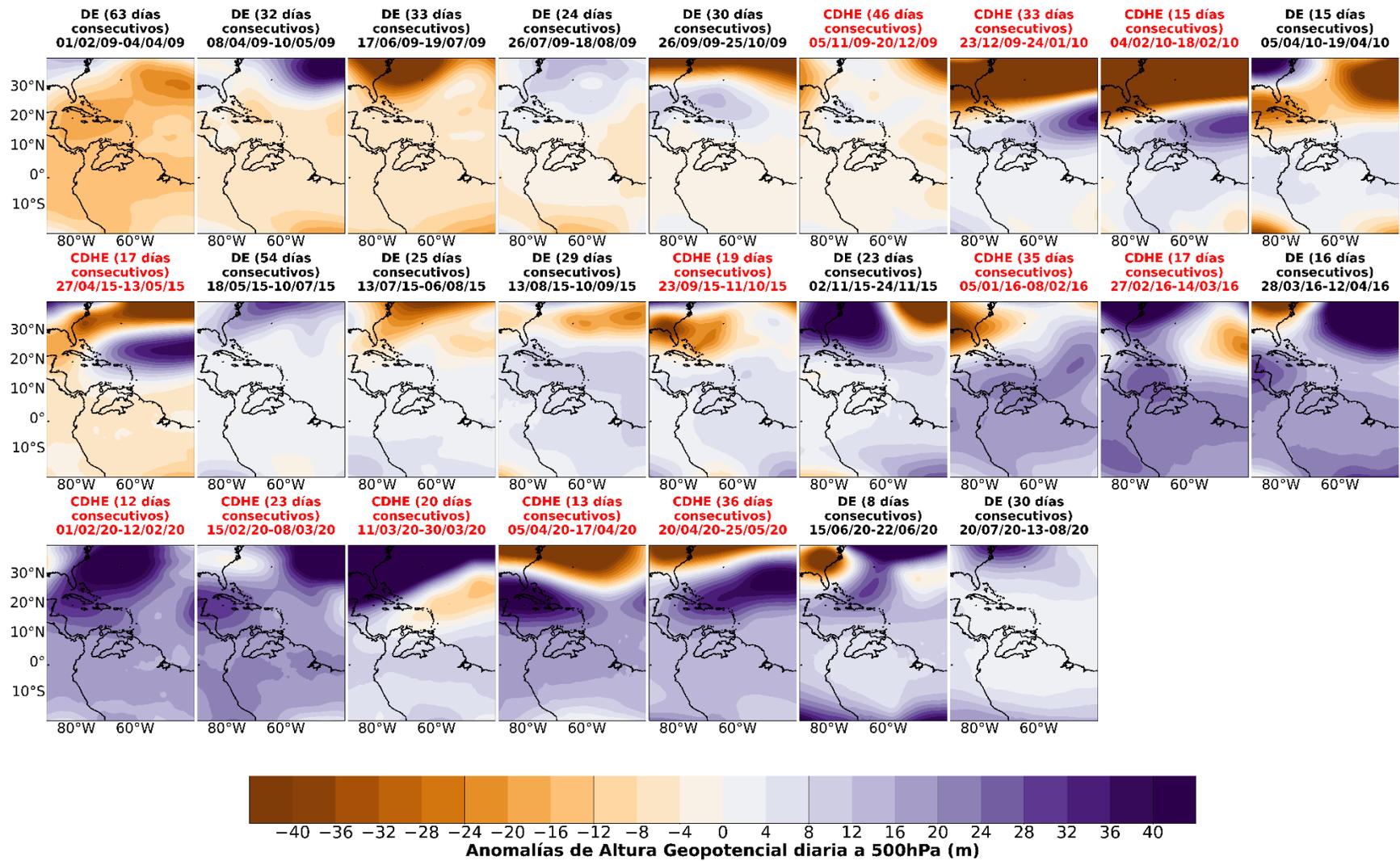


Figura 5.15. Mapas de anomalías de altura geopotencial a 500hPa (m) durante los subperiodos de extremos secos (DE; título negro) y extremos combinados cálidos y secos (CDHE; título en rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo).

5.4.4 Precipitación total

En relación con las alta presiones y el transporte de aire seco en la troposfera media hacia la cuenca, en la **Figura 5.16** se observa el comportamiento de la precipitación total (TP) durante las tres sequías analizadas. En general, se observa que no todos los periodos de sequías meteorológicas identificadas por Bedoya (2024) presentaron un déficit de precipitación; por el contrario, La clasificación de sequías desarrollada por Bedoya (2024) se basa en datos mensuales de precipitación, y no en datos diarios, que es la escala de análisis de este Trabajo de Grado. De esta manera, se observa que existe una variabilidad en la precipitación a una escala intramensual. La **Figura 5.16** muestra que durante la sequía 2009-2010 hubo subperiodos de DE en los que no se registró déficit de precipitación como al inicio de la sequía, entre febrero y abril y junio y agosto de 2009, y al final de la sequía, en abril del 2010. En los subperiodos donde el déficit de precipitación presenta valores más negativos se da bajo la ocurrencia de CDHE. Para el primer evento CDHE de esta sequía, de 46 días consecutivos, este déficit se observa en toda la cuenca del Orinoco, mientras que en los últimos dos subperiodos CDHE, de 33 y 15 días consecutivos, el déficit de precipitación se concentró más en SORI.

En el primer subperiodo CHDE durante la sequía 2015-2016 (**Figura 5.16**) se observa un déficit de precipitación no sólo en toda la cuenca sino en todo Suramérica tropical, al igual que durante el CDHE ocurrido en septiembre de 2015. En los subperiodos siguientes de condiciones DE, se observa una recuperación en la precipitación en toda la cuenca. Sin embargo, al entrar en un intervalo de tiempo en el que se tienen días consecutivos con condiciones CDHE, se vuelve a ver que la precipitación es menor que la climatología, con un mayor déficit en SORI.

Los primeros días de la sequía 2020 se dieron bajo condiciones CDHE, con déficits de TCWV (**Figura 5.9**) y HR500 (**Figura 5.12**), un sistema anticiclónico de media troposfera fortalecido en el Atlántico norte (**Figura 5.15**) y un déficit de precipitación en todo Suramérica tropical (**Figura 5.16**), con mayor déficit en SORI que en NORI. Este déficit de precipitación se mantiene en los siguientes subperiodos de CDHE y se fortalece en toda la cuenca en abril y mayo de 2020. En los eventos DE, la precipitación se recupera en toda la cuenca en junio de 2020 y a final de la sequía, la precipitación disminuye nuevamente por debajo de la climatología en SORI y en el centro de NORI.

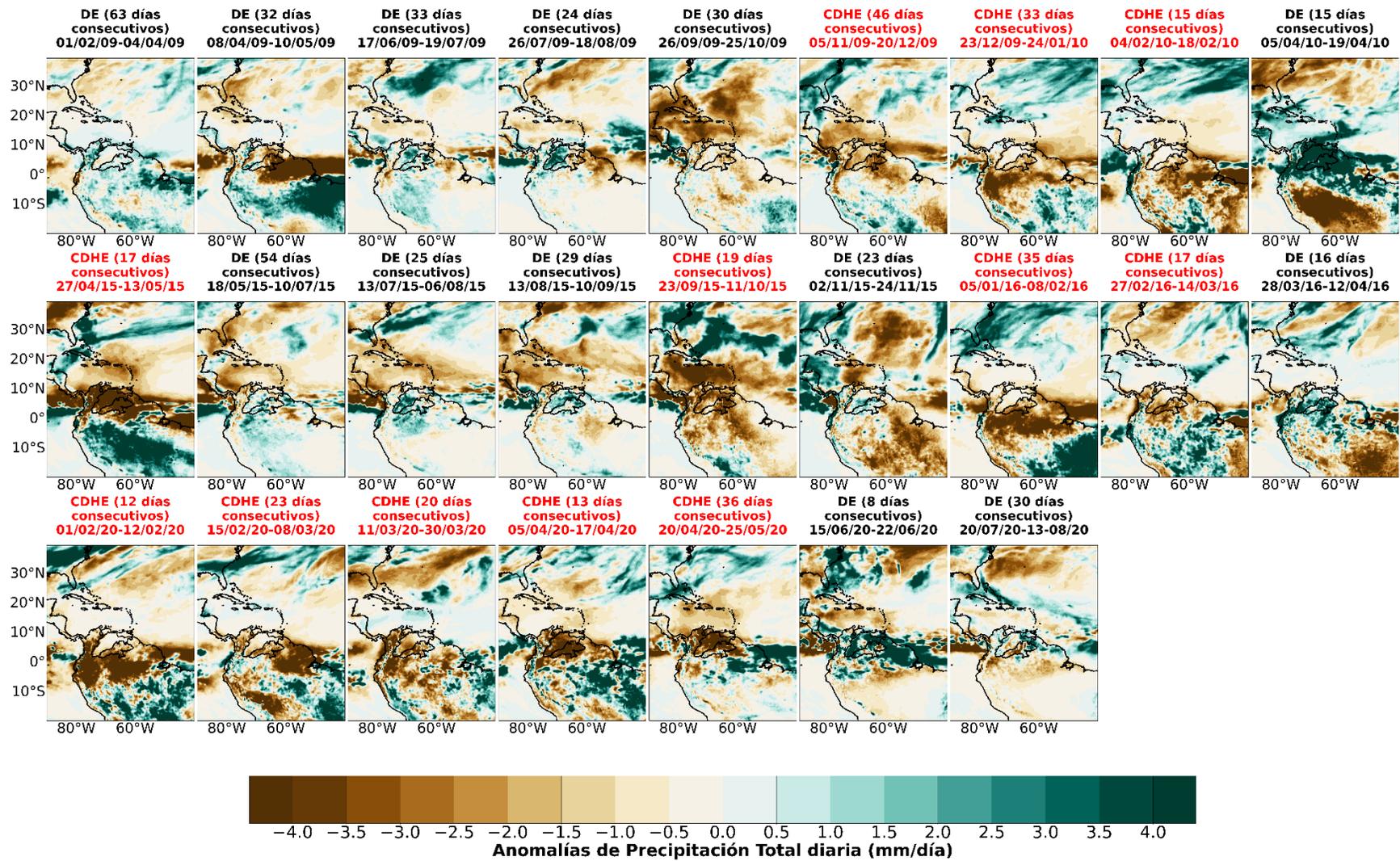


Figura 5.16. Mapas de anomalías de precipitación total (mm/día) durante los subperiodos de extremos secos (DE; título negro) y extremos combinados cálidos y secos (CDHE; título en rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo).

Tal y como se identifica en los vientos a 500hPa (**Figura 5.14**), la circulación anticiclónica sobre el Atlántico norte/mar Caribe está asociada a la presencia de altas presiones en esa misma región. Esto se corrobora en la **Figura 5.17** (arriba), que muestra el promedio de las anomalías de altura geopotencial a 500hPa para eventos CDHE y DE. El comportamiento de esta variable reafirma el fortalecimiento del sistema anticiclónico debido a un aumento de la altura geopotencial durante las tres sequías, particularmente bajo la ocurrencia de eventos CDHE.

Con respecto al exceso de precipitación total (TP) en la cuenca durante eventos DE (**Figura 5.17**, abajo), este fenómeno se atribuye al hecho de que, precisamente durante estos subperiodos se observó una variabilidad intramensual en cada una de las tres sequías consideradas **Figura 5.16**). Durante dichos lapsos, se registra una recuperación en la TP, lo que resulta en un promedio positivo de anomalías de TP durante los eventos DE. Por otro lado, cuando se combinan las condiciones secas y cálidas (CDHE), se evidencia un déficit significativo en la TP sobre la cuenca. Este déficit se correlaciona con el déficit de agua precipitable y la influencia de los sistemas de alta presión fortalecidos que inhiben la formación de precipitación debido al transporte de aire seco a 500hPa desde el Atlántico norte.

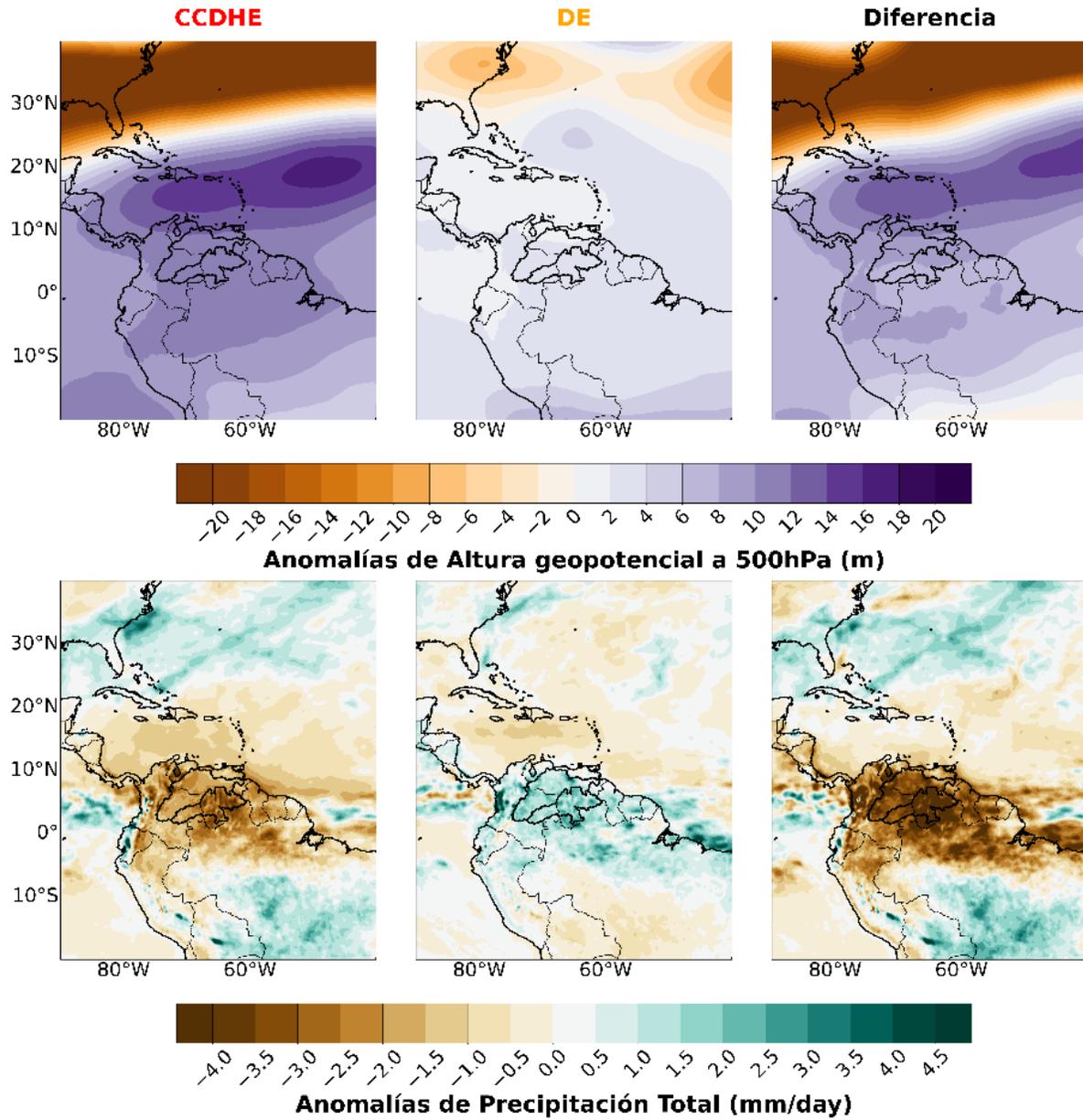


Figura 5.17. *Compuestos de anomalías de altura geopotencial a 500hPa (arriba) y anomalías de precipitación total (abajo) para extremos compuestos cálidos y secos (CDHE; derecha), extremos secos (DE; centro) y diferencia entre ambos tipos de extremos (izquierda).*

5.5 Intensidad y frecuencia de extremos cálidos en la cuenca del Orinoco

Para evaluar la intensidad de los extremos cálidos, tanto simples como combinados con sequías, en la cuenca del río Orinoco, se calculó el promedio de Tmax diaria para todos los días durante los eventos de DE y CDHE, tal como se muestra en la **Figura 5.18**. El análisis del promedio de Tmax durante los CDHE revela una predominancia de anomalías que excedieron los 2°C en toda la cuenca. Al considerar el p90 para cada subregión (1,35 para NORI y 1,42 para SORI), se confirma la presencia de condiciones de temperatura extrema en gran parte del área estudiada durante este tipo de eventos. Se destaca especialmente que la subregión NORI experimenta las Tmax diarias más elevadas, superando anomalías de +3°C para los eventos CDHE.

Por el contrario, durante los eventos DE, la Tmax diaria no muestra cambios significativos y se mantiene en condiciones cercanas a la climatología, con valores de anomalías cercanos a cero. Al comparar la distribución de las anomalías de Tmax diaria entre ambos tipos de eventos, se observa que las Tmax diarias registradas durante eventos CDHE no solo son mayores, sino que también abarcan una mayor extensión territorial en comparación con los eventos DE.

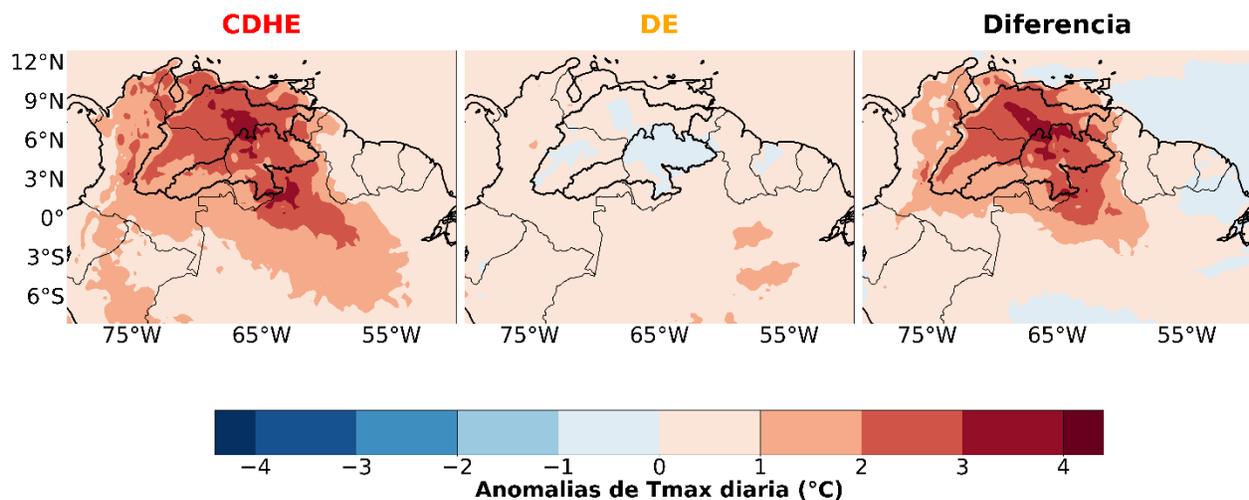


Figura 5.18. Compuestos de anomalías de Tmax diaria para extremos compuestos cálidos y secos (CDHE; derecha), extremos secos (DE; centro) y diferencia entre ambos tipos de eventos (izquierda).

Para ver la gravedad de los extremos cálidos durante los subperiodos clasificados como CDHE, se analiza el STI (**Figura 5.19**). Este índice se ha utilizado en otras investigaciones para identificar y definir los periodos en los que ocurren condiciones cálidas extremas, y al utilizarlo en conjunto con el SPI, se ha avanzado en la identificación de eventos CDHE (Cunha et al., 2023; Hao et al., 2021).

Durante los CDHE de la sequía 2009-2010 previamente identificados con el p90 de Tmax diaria (**Figura 5.9a**), se tiene que el STI muestra igualmente condiciones más cálidas en la cuenca, comenzando de moderada (sombreado amarillo) en los dos primeros subperiodos (46 días y 33 días de duración) y avanzando a condiciones graves (sombreado rojo) para el último subperiodo de CDHE (de 15 días de duración). Además, el STI sugiere que el último subperiodo de esta sequía pudo haber sido más largo, ya que se observan condiciones graves de temperatura media en la cuenca hasta mediados de marzo de 2010, aunque el final del periodo de condiciones de CDHE según la Tmax diaria se da para mediados de febrero de 2010.

Para la sequía 2015-2016 (**Figura 5.19b**), se tiene que en los subperiodos de condiciones de CDHE en mayo de 2015 y enero y marzo de 2016, se identifican temperaturas extremas graves en ambas subregiones del Orinoco. En el subperiodo de septiembre a octubre de 2015, las temperaturas oscilan entre moderadas y graves en NORI, mientras que en SORI son graves.

Finalmente, la intensidad de los eventos extremos cálidos durante los CDHE de la sequía de 2020 (**Figura 5.19c**) indican condiciones graves desde el inicio de la sequía, aunque baja a condiciones de temperatura moderada durante el último subperiodo de CDHE de esta sequía.

En general, para los extremos secos simples (DE) en la cuenca del Orinoco, el STI alcanza a mostrar hasta extremos cálidos moderados, y no graves. Además, se observa claramente que cuando la cuenca experimenta condiciones CDHE, hay aumentos de STI, alcanzando por muchos días consecutivos rangos de temperaturas graves.

Continuando con el análisis de los extremos cálidos en la cuenca del río Orinoco, es crucial examinar la frecuencia de ocurrencia de estos eventos para comprender mejor su impacto en la

región, particularmente si se considera que el IPCC identifica que ha habido un aumento en la frecuencia e intensidad de los extremos cálidos en las regiones que componen a Suramérica tropical. Muchos estudios a escala regional han examinado las tendencias en las temperaturas extremas utilizando diferentes métricas que se basan en las temperaturas diarias, como los Índices del Equipo de Expertos sobre Detección e índices de Cambio Climático (ETCCDI por sus iniciales en inglés) de la Comisión de Climatología/Programa Mundial de Investigación del Clima/Comisión de Oceanografía y Meteorología Marina (Dunn et al., 2020; Seneviratne et al., 2021). De esos índices, se consideró el índice TX90p (**Figura 5.19**), el cual establece la frecuencia de los días cálidos por mes, durante los años en los que se identificaron eventos CDHE en la cuenca del Orinoco (2009, 2010, 2015, 2016 y 2020).

Para la subregión de NORI (**Figura 5.19a**), se observa que los meses del año en los cuales se observa una mayor frecuencia de ocurrencia de extremos cálidos durante extremos secos (CDHE) son enero, febrero, marzo y abril. Las frecuencias más altas identificadas para esos meses (>50%) se observan en los años 2010 y 2016 (enero, febrero y marzo), y en 2020 (febrero, marzo y abril). Esos meses corresponden a extremos cálidos que ocurrieron durante una sequía, ya que en 2010 y 2016, las sequías finalizaron en el mes de abril, mientras que en 2020, la sequía comenzó en febrero.

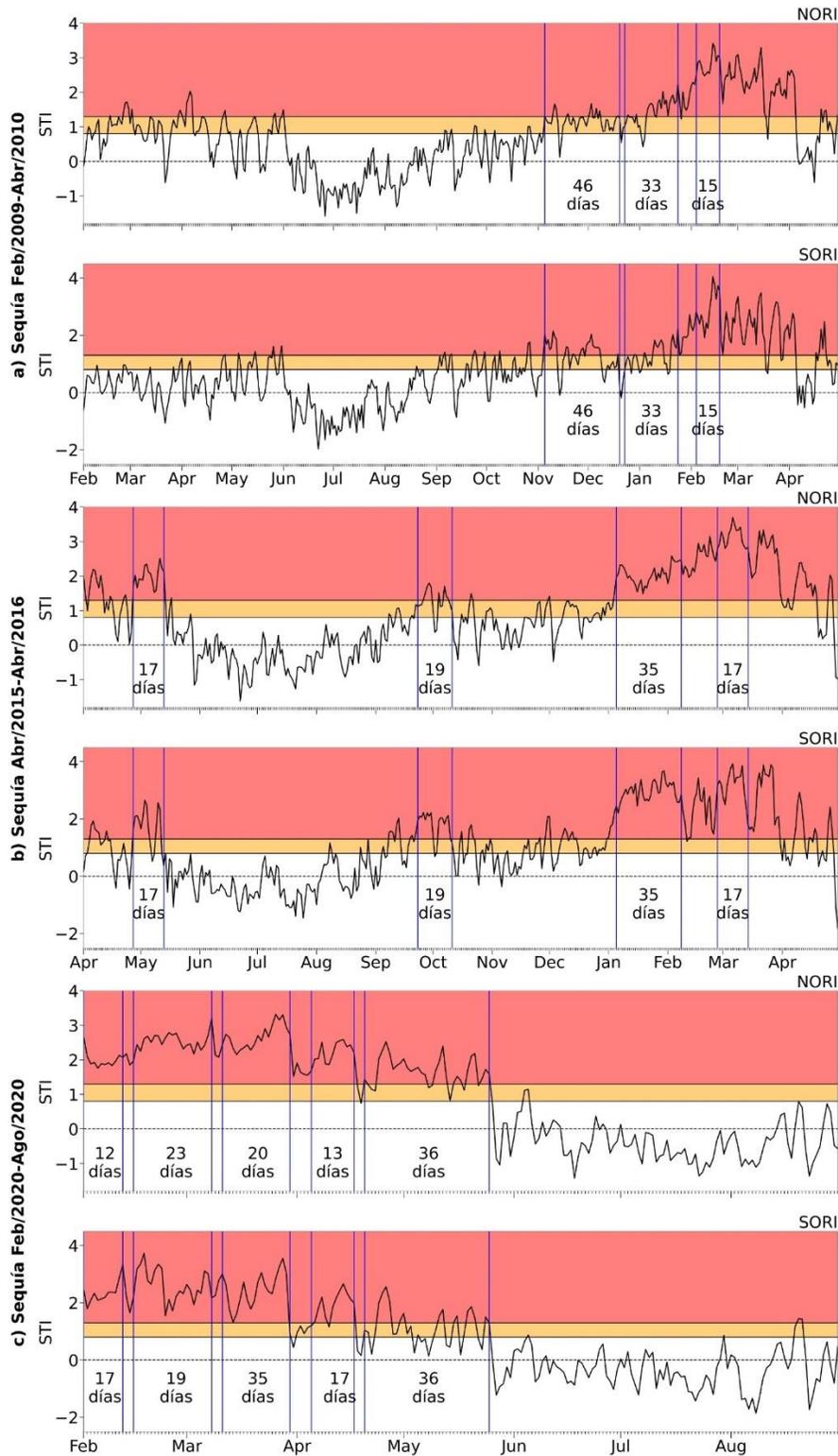


Figura 5.19. Serie de tiempo del STI según ERA5 durante las sequías 2009-2010 (a), 2015-2016 (b) y 2020 (c) para NORI y SORI. Las franjas de colores indican la severidad del STI. Amarilla: moderada (>+0.8°C). Roja: grave (>+1.3°C).

Algo a destacar es que a pesar de que la sequía 2015-2016 comenzó en abril de 2015, en toda la cuenca (NORI y SORI) se tuvo mayores TX90p dos meses antes de que comenzara la sequía (en febrero y marzo), al igual que la sequía 2020, que comenzó en febrero, pero que para enero, aproximadamente el 50% de las Tmax de ese mes superaron el p90.

Para los meses de enero, febrero, marzo, abril, septiembre, octubre y noviembre se registró la mayor cantidad de años en los que las temperaturas medias superaron el p90 en SORI (**Figura 5.19b**). A diferencia de NORI, que sólo tuvo un periodo de varios meses con TX90p altas a principio de año (enero-mayo), las frecuencias de Tmax durante cada año vuelve a aumentar para finales de cada año (septiembre-diciembre). Adicionalmente, así como en NORI, los años que tuvieron mayor actividad de extremos cálidos fueron 2010 y 2016 (en enero, febrero y marzo) y 2020 (en febrero, marzo y abril).

La **Figura 5.19**, permite identificar que hay una variabilidad intra-anual en la frecuencia de días cálidos, para cada año de sequía considerado y en cada subregión del Orinoco, siendo los meses de enero a abril cuando la TX90p es más alta para SORI y NORI.

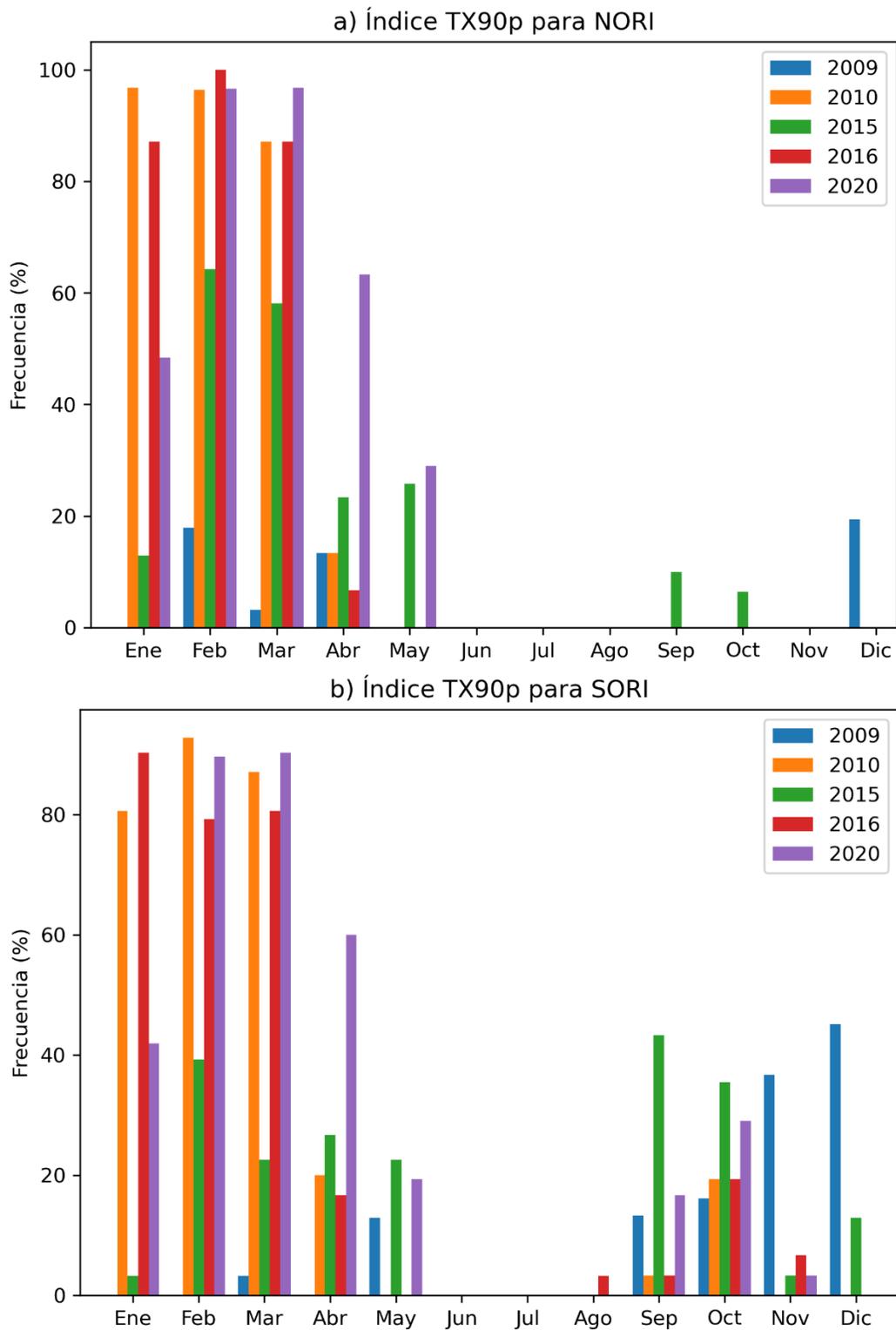


Figura 5.20. Histograma de frecuencia de ocurrencia de extremos combinados cálidos y secos (CDHE) según el índice TX90p, durante cada año de sequía considerado (colores), para NORI (a) y SORI (b).

5.6 Actividad de incendios durante la ocurrencia de extremos secos simples y extremos compuestos cálidos y secos en la cuenca del Orinoco

A partir de la información de cantidad de incendios proveniente de la observación satelital del producto MODIS, se obtiene la **Figura 5.21**. La sequía 2009-2010 comienza con cinco subperiodos de condiciones DE, de los cuales los dos primeros (de febrero a comienzos de mayo de 2009) muestran una gran cantidad de incendios en NORI, con una mayor cantidad de incendios (1007 en total) durante el primer evento de 63 días consecutivos (alrededor de 15 incendios diarios sobre la región). Luego en los siguientes subperiodos bajo condiciones DE (de mediados de junio a finales de octubre de 2009), la cantidad de incendios disminuye considerablemente, con un pico de 26 incendios por 30 días (casi 1 incendio por día). Bajo condiciones CDHE, durante el periodo comprendido entre noviembre de 2009 y febrero de 2010, los incendios aumentan significativamente en NORI, con 255 incendios en el primer subperiodo, 956 incendios en el siguiente y 603 en el último (aprox. 5, 28 y 40 incendios por día, respectivamente). Este último subperiodo de CDHE de la sequía 2009-2010, para el que se registraron 603 incendios corresponde al evento con una mayor cantidad de incendios en un intervalo más corto (16 días consecutivos). En cuanto a SORI, aunque no se identifican cantidades de incendios tan altas como en NORI, se observa el aumento de incendios, con mayores valores durante el CDHE de 15 días consecutivos correspondientes a 93 incendios en total (aprox. 6 incendios por día). Finalmente, en el último subperiodo de 15 días consecutivos bajo un DE en durante el año 2010, la única región que mostro actividad de incendios fue NORI, con 23 incendios (aprox. 1 incendio por día), lo cual es mucho menor a lo identificado en el mes de abril de 2009 (32 días consecutivos bajo condiciones DE), cuando se identifican aproximadamente 13 incendios diarios.

En la sequía 2015-2016 (**Figura 5.21**), e tres de los eventos CDHE, que ocurrieron a finales de abril de 2015, enero de 2016 y finales de febrero de 2016, presentan las mayores cantidades de incendios. El CDHE ocurrido en septiembre-octubre de 2015 (con una duración de 19 días) muestra una actividad de solo 11 incendios en todo NORI y 5 incendios en SORI, que corresponde a una cantidad mucho menor en comparación con los otros CDHE de esta sequía. Otro subperiodo con

alta actividad de fuego es el último evento DE (ocurrido a finales de marzo de 2016), con 128 incendios en NORI durante 16 días.

Finalmente, en la sequía 2020 (**Figura 5.21**), se tienen 5 subperiodos de CDHE entre febrero (a inicios de la sequía) y abril, en los cuales NORI presenta la mayor cantidad de incendios en la cuenca, con 733 incendios por 12 días, 1213 por 23 días, 1523 por 20 días, 390 por 13 días y 374 por 36 días (aprox. 61, 52, 76, 30 y 10 incendios diarios, respectivamente). Esta sequía contiene los periodos bajo condiciones CDHE con mayor cantidad de incendios en NORI.

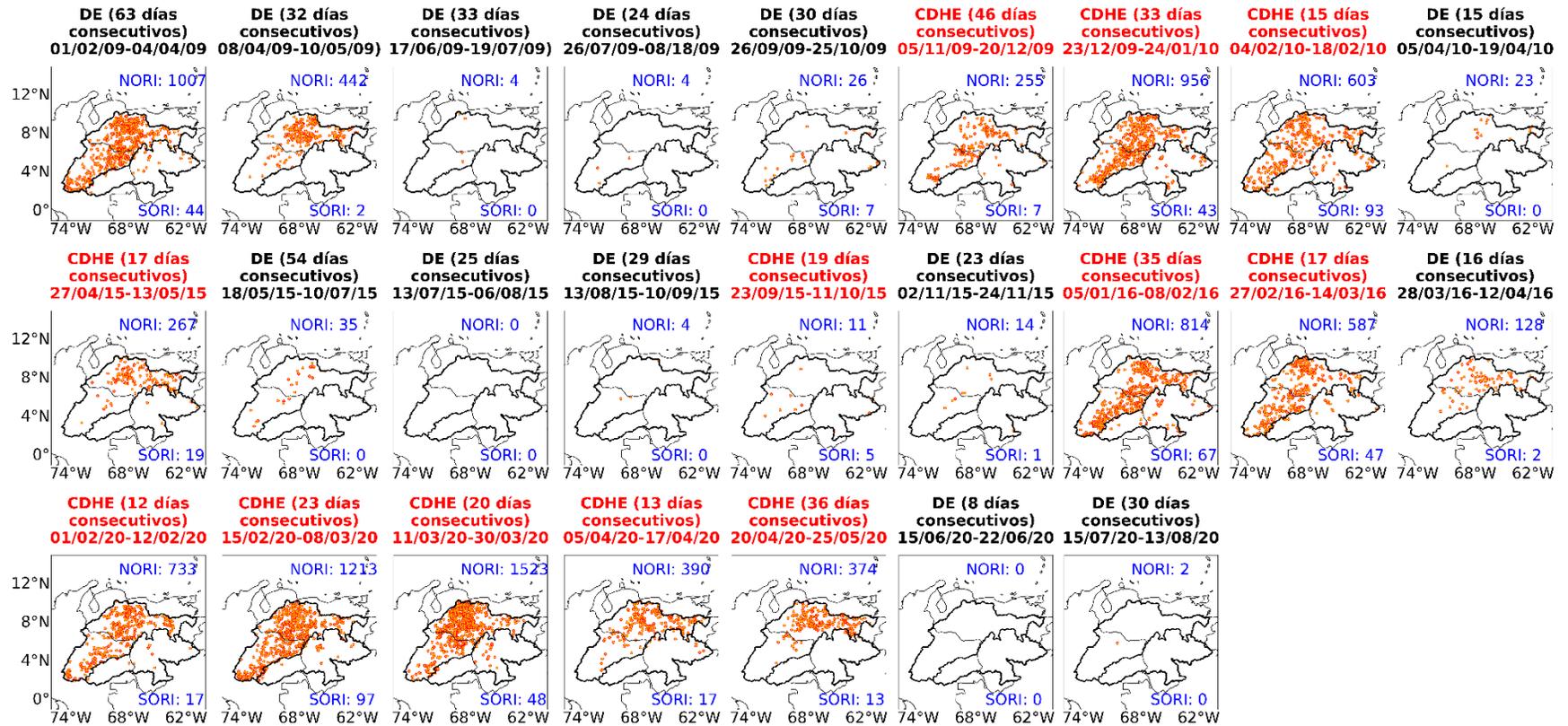


Figura 5.21. Ubicación de incendios detectados por MODIS (puntos rojos) y número de incendios para NORI y SORI (números en azul) durante los subperiodos de extremos secos (DE; título negro) y extremos combinados cálidos y secos (CDHE; título en rojo) para las sequías de feb/2009-abr/2010 (arriba), abr/2015-abr/2016 (mitad) y feb/2020-ago/2020 (abajo).

Según la **Figura 5.21**, la mayor cantidad de incendios se observa en NORI durante la ocurrencia de CDHE. Sin embargo, también se identifica una alta actividad de incendios en NORI bajo condiciones DE durante el año 2009 (con 1007 y 442 incendios, respectivamente). Además, se identifica un periodo bajo condiciones CDHE durante 19 días consecutivos con una baja actividad de incendios durante el mes de septiembre de 2015.

La **Figura 5.22** compara las anomalías del número de incendios con las anomalías de humedad del suelo (superficial y profundo) para la región NORI, en la que se registra la mayor actividad de incendios. Se observa que, en general, la cantidad de incendios en NORI aumenta por encima de lo normal cuando se tiene una SM que se mantiene por debajo del promedio durante varios días consecutivos, lo que ocurre típicamente durante la ocurrencia de eventos CDHE. Al analizar los tres casos expuestos en el párrafo anterior, se observa que, aunque el primer subperiodo de condiciones DE de la sequía 2009, que tuvo un total 1007 incendios por alrededor de dos meses (**Figura 5.22a**), en realidad se identifica una cantidad de incendios por debajo del promedio. En el siguiente subperiodo de condiciones DE del mismo año, que registra una cantidad de 442 incendios, se observa una mayor cantidad de incendios con respecto al promedio. Para este caso, la SM superficial fluctúa entre condiciones más húmedas de lo normal y condiciones de déficit, mientras que la SM de la capa profunda del suelo indica valores por encima de lo normal. En la **Figura 5.22b** se observa que para el evento de CDHE en septiembre de 2015, de 19 días de duración, no se identifican anomalías en cuanto al número de incendios; sin embargo, la SM superficial y de suelo profundo muestra condiciones de déficit durante todo el evento.

Como se discute en la **sección 3**, existen diversos factores que pueden favorecer la aparición o propagación de incendios. En particular, la ocurrencia de condiciones muy secas, temperaturas muy altas, vientos favorables y materia orgánica que sirva de combustible, son elementos que favorecen la ocurrencia y propagación de incendios. En efecto, los periodos para los que se identificó una mayor cantidad de incendios en la región NORI corresponden a eventos CDHE (**Figura 5.23**)

El único periodo de condiciones DE, en el cual identifica una mayor cantidad de incendios de lo usual sin haber ocurrido bajo temperaturas cálidas extremas, pudo estar determinado por la

ocurrencia de vientos alisios más fuertes de lo normal, que hayan favorecido la propagación, además del déficit de TCWV, HR500 y TP, también ocurrido en el mes de abril, que corresponde a la temporada seca y de incendios de la región. Por otro lado, el único evento CDHE en el cual no se detectó una mayor cantidad de incendios con respecto a la climatología, aunque presentó déficit en la SM, se registró durante el mes de septiembre, el cual se encuentra dentro de la temporada húmeda de la región con poca actividad de incendios.

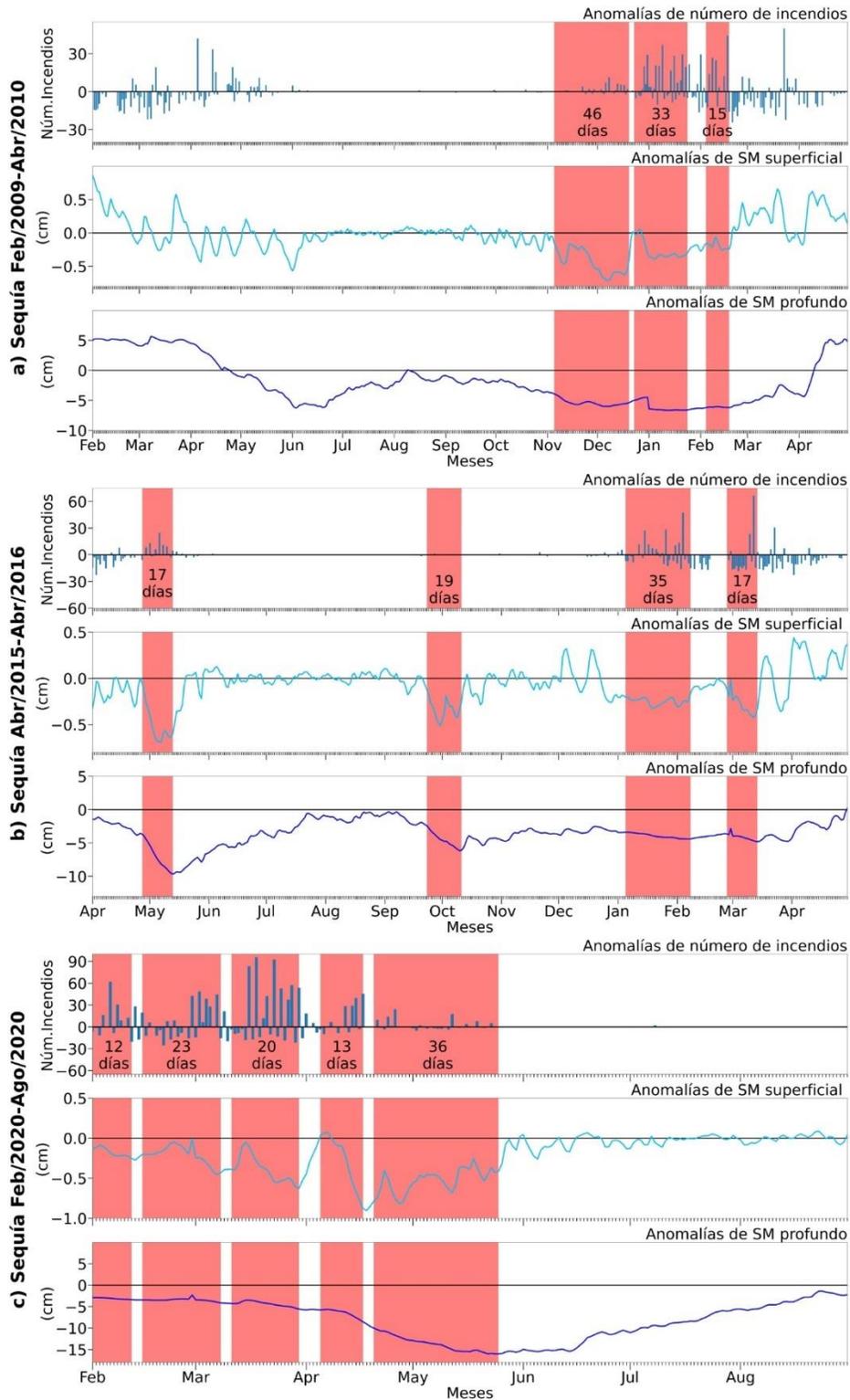


Figura 5.22. Series de anomalías en NORI de: número de incendios [(arriba)], SM de la capa superficial de suelo (cm) [centro] y SM de la capa profunda del suelo (cm) (abajo) durante las sequías 2009-2010 (a), 2015-2016 (b) y 2020 (c). Las barras rojas indican los periodos con ocurrencia de CDHE.

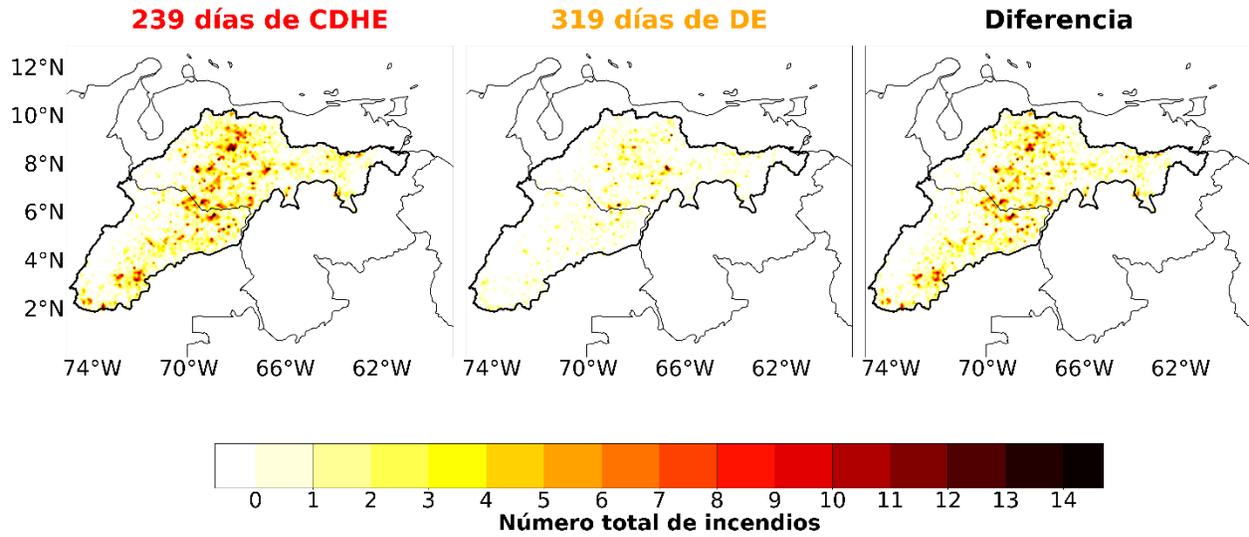


Figura 5.23. Número total de incendios, según MODIS, bajo la ocurrencia de extremos compuestos cálidos y secos (CDHE; derecha), extremos secos (DE; centro) y la diferencia entre ambos tipos de extremos (izquierda).

6 Discusión y conclusiones

En los últimos años, se ha observado un notable aumento en la cantidad de estudios que se centran en la identificación, caracterización y proyección de cambios en los extremos climáticos en Suramérica, tanto simples como compuestos (Espinoza et al., 2024; Portalanza et al., 2024). En particular, la cuenca del río Orinoco ha sido objeto de atención para la comprensión de eventos extremos combinados cálidos y secos, dado que estos extremos implican impactos sobre los sistemas naturales y socioeconómicos en la región. Muchos estudios se basan en el análisis de las interacciones suelo-atmósfera. Debido a que se proyecta un aumento en la severidad de la ocurrencia de eventos extremos compuestos secos y cálidos (CDHE) y un incremento en la frecuencia de extremos cálidos a medida que el cambio climático avanza (Hao et al., 2018; Seneviratne et al., 2021), se hace importante el desarrollo de este tipo de estudios.

Mediante la estimación del percentil 90 (p90) de las anomalías de temperatura máxima (Tmax) diaria durante el periodo 1981-2021, se establece el umbral a partir del cual, las temperaturas comienzan a ser extremas ($>+1,35^{\circ}\text{C}$ en NORI y $>+1,42^{\circ}\text{C}$ en SORI) y junto con los extremos secos previamente identificados por Bedoya (2024), se identificaron 12 periodos de condiciones CDHE con al menos 12 días de duración: tres de estos eventos ocurren durante la sequía febrero/2009-abril/2010, cuatro en la sequía de abril/2015-abril/2016 y cinco en la sequía de febrero/2020-agosto/2020

El estado de la superficie de la región durante cada una de las sequías analizadas no muestra cambios en la humedad del suelo (SM) sino hasta que ocurre un aumento de las temperaturas hacia condiciones extremas. La respuesta rápida durante eventos de sequía meteorológica bajo temperaturas cálidas extremas en el Orinoco muestra un déficit de humedad en toda la columna del suelo. Dado que las temperaturas altas aumentan la capacidad de la atmósfera de contener vapor de agua, la demanda de evapotranspiración (ET) de la atmósfera aumenta, disminuyendo así la humedad que le queda al suelo. En el estudio realizado por Bedoya (2024) se identifica que la ET y la SM en el Orinoco tienen una correlación positiva, por lo tanto, a medida que la SM disminuye, la ET también disminuye.

Según el trabajo de Bedoya (2024) las sequías en el Orinoco están asociadas a la ocurrencia de condiciones como el fortalecimiento de un sistema de alta presión (una circulación anticiclónica) en niveles bajos y medios de la troposfera sobre el océano Atlántico norte y el mar Caribe, la ocurrencia de un evento El Niño, un jet de bajo nivel del Orinoco (OLLJ por sus iniciales en inglés) más intenso y vientos alisios fortalecidos. Con el objetivo de analizar cómo se modifican estas condiciones bajo la ocurrencia de extremos secos (DE) y CDHE, se analizaron los compuestos de las anomalías de variables atmosféricas como: agua precipitable, vientos zonales y meridionales a 850hPa y 500hPa, humedad relativa a 500hPa, altura geopotencial a 500hPa y precipitación total.

Durante eventos CDHE, se identifica que la cantidad de agua precipitable presenta un déficit mayor que bajo la ocurrencia de sequías sin temperaturas cálidas extremas (eventos DE), lo cual indica que cuando la cuenca se encuentra bajo la ocurrencia de un CDHE, hay menos vapor de agua disponible en la atmósfera. A este déficit se le suma un debilitamiento en la velocidad de los vientos alisios sobre el norte del Orinoco, mientras que en el sur, los vientos no muestran grandes variaciones, conllevando a un debilitamiento del OLLJ (Correa et al., 2024). Correa et al. (2024) identifican que el aumento en el flujo de calor sensible en superficie en la región del Orinoco está vinculado a un incremento en la temperatura del aire cerca de la superficie, lo que a su vez provoca una disminución en la presión atmosférica a nivel del mar en la región, conduciendo al debilitamiento del gradiente de presión entre el Orinoco y la salida del jet, que finalmente se traduce en un debilitamiento en el flujo de humedad asociado al OLLJ.

Los vientos a 500 hPa revelan un fortalecimiento en la circulación anticiclónica sobre el Atlántico norte y el mar Caribe tanto en los eventos DE como en eventos CDHE. No obstante, al comparar esta formación en la región del mar Caribe/Atlántico norte, se observa que, durante los eventos con temperaturas máximas extremas, este sistema anticiclónico se fortalece aún más en comparación con aquellos eventos donde no se supera el umbral de temperatura extrema. Este fortalecimiento promueve el transporte de aire seco y contribuye al aumento del déficit de humedad relativa a 500 hPa sobre el Orinoco.

Esta circulación anticiclónica fortalecida durante los CDHE se asocia, igualmente, a un sistema de alta presión en niveles bajos y medios de la troposfera, de gran extensión y fortalecido

sobre el Atlántico norte. Este sistema de alta presión está asociado a condiciones atmosféricas estables, con masas de aire que descienden por la tropósfera, generando calentamiento adiabático e inhibiendo la formación de nubes y precipitación, lo que contribuye a la disminución de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera. A su vez, la disminución en nubosidad está asociada con un aumento en la radiación neta en superficie, lo cual al inicio de la sequía aumenta la evaporación y exagera la disminución en la humedad del suelo. Además, el aumento en radiación neta contribuye al aumento en calor sensible, y con ello a las temperaturas altas. (Wallace & Hobbs, 2006).

Al realizar un análisis de la precipitación total en promedio durante los eventos CDHE y DE, se observa que la precipitación tiene una variabilidad al interior cada sequía. Se resalta que Bedoya (2024) utilizó una escala de tiempo mensual para la identificación de las sequías consideradas en este Trabajo de Grado. En el presente trabajo, al usar información diaria, el análisis intramensual durante cada sequía sugiere que los periodos en los que la precipitación presenta valores por debajo de lo normal corresponden a eventos CDHE. Para los eventos de sequía sin la ocurrencia de temperatura cálida extrema (DE) se identifican señales de recuperación de la precipitación durante algunos días dentro de cada periodo de sequía, denotando una variabilidad de menor escala a la mensual en la precipitación, posiblemente asociada a variaciones sinópticas, como las asociadas a los sistemas anticiclónicos que se desarrollan sobre el mar Caribe y el Atlántico norte.

En cuanto al fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), el índice ONI (Oceanic Niño Index) sugiere que los CDHE de la sequía 2009-2010 y de la sequía 2015-2016 se dieron bajo condiciones El Niño. Por su parte, en la sequía 2020 se identifican varios periodos de muchos días consecutivos bajo un CDHE bajo condiciones ENSO neutral.

La intensidad de las anomalías de Tmax durante la ocurrencia de los CDHE muestra valores significativamente altos en toda la cuenca ($>+2^{\circ}\text{C}$). Algunos puntos en la subregión NORI registran aumentos de temperatura por encima de los $+3^{\circ}\text{C}$ durante eventos CDHE, lo que posiciona a NORI como la zona con mayor intensidad de Tmax durante estos extremos cálidos y secos. Además, mediante la estimación del Índice Estandarizado de Temperatura (STI por sus iniciales en inglés)

se identifica que los periodos clasificados como extremos cálidos coinciden con un STI que muestra una señal de temperaturas extremas moderadas (entre 0.8 y 1.3) y severas (>1.3). Por lo tanto, este índice se puede considerar como un buen método para identificar periodos de calor extremo en regiones como el Orinoco

En cuanto a la frecuencia en la que ocurren extremos cálidos durante periodos de sequía, se calculó el índice TX90p, el cual indica los meses con una mayor ocurrencia de temperaturas extremas en la región durante las sequías discutidas anteriormente. Este índice determina el porcentaje de días en que la Tmax supera el p90 por mes. Los resultados indican que los meses con la mayor cantidad de días de extremos cálidos sobre el Orinoco ($>+50\%$) son enero, febrero y marzo. Este hallazgo coincide con el estudio de Feron et al. (2019), quienes observaron un aumento en los extremos cálidos durante los meses de diciembre, enero y febrero en el norte de Suramérica en las últimas décadas.

Teniendo en cuenta la vulnerabilidad de la cuenca del Orinoco frente a la ocurrencia de CDHE, dada su periódica actividad de incendios debido a las dinámicas de usos de suelo en la región, en este Trabajo de Grado se observa que la subregión con mayor registro de incendios es NORI. De hecho, esta subregión del Orinoco, dominada por la presencia de sabanas, ha sido reconocida como la región donde se producen incendios con mayor frecuencia, seguida por las regiones del Amazonas y el Caribe (Hoyos et al., 2017; Bolaño-Díaz et al., 2022). La cantidad de incendios registrados durante los eventos CDHE identificados en este Trabajo es mayor que cuando ocurren extremos secos simples (DE). De hecho, la mayoría de los eventos CDHE ocurren durante los meses de temporada seca en la región, de noviembre a abril. Es importante resaltar que, aunque se identificaron periodos en el mes de abril en los que no se registraron temperaturas extremas ni déficit de SM, se registró una cantidad de incendios comparable a los identificados durante los eventos CDHE. En el caso del Orinoco, aún no se cuenta con estudios publicados que caractericen las condiciones meteorológicas asociadas a la formación de incendios. Sin embargo, se sabe que históricamente el fuego ha sido utilizado en el Orinoco, al igual que en otras regiones de Suramérica, para el manejo de pastizales, y la renovación y expansión de áreas destinadas a actividades agrícolas. Esta práctica se considera la más efectiva y económica para estos fines (Oliveira-Júnior et al., 2021).

A diferencia del Amazonas, que aunque se conoce que las tasas de deforestación han estado estrechamente relacionadas con los incendios, estas tasas han disminuido en las últimas dos décadas y se ha demostrado que durante los años en los que ha habido sequía, la incidencia de incendios en regiones modificadas por la actividad antrópica ha aumentado (Aragão et al., 2018). Esto ha creado que las retroalimentaciones entre extremos climáticos y el uso del suelo generen cambios en los regímenes de incendios, degraden los bosques y sabanas tropicales, volviéndolos más secos e inflamables (Brando et al., 2020; Ribeiro et al., 2022).

Aunque las condiciones atmosféricas puedan influir en la ocurrencia de incendio, la actividad antrópica en la cuenca del río Orinoco sigue siendo uno de los factores que más determina el aumento alarmante en la probabilidad de ocurrencia de incendios (Barreto & Armenteras, 2020). Además, si la ocurrencia de extremos climáticos cálidos y secos aumentan como lo muestran las proyecciones de Feron et al. (2019) y Correa et al. (2024) esto conllevará a un aumento de las áreas quemadas, de la frecuencia e intensidad de incendios, e incluso a temporadas más largas (Armenteras-Pascual et al., 2011; van der Werf et al., 2008). Como lo ocurrido en una región de plantaciones forestales en Chile, que en los años 2017 y 2023, la combinación de condiciones extremas como altas temperaturas, vientos fuertes y baja humedad, más bosques altamente inflamables, contribuyeron al aumento del tamaño e intensidad de los incendios registrados en esta región (Armenteras & de la Barrera, 2023).

7 Referencias

- Afroz, M., Chen, G., & Anandhi, A. (2023). Drought- and heatwave-associated compound extremes: A review of hotspots, variables, parameters, drivers, impacts, and analysis frameworks. *Frontiers in Earth Science*, *10*. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.914437>
- Allan, R. P., Barlow, M., Byrne, M. P., Cherchi, A., Douville, H., Fowler, H. J., Gan, T. Y., Pendergrass, A. G., Rosenfeld, D., Swann, A. L. S., Wilcox, L. J., & Zolina, O. (2020). Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1472*(1), 49–75. <https://doi.org/10.1111/nyas.14337>
- Anderson, L. O., Burton, C., dos Reis, J. B. C., Pessôa, A. C. M., Bett, P., Carvalho, N. S., Junior, C. H. L. S., Williams, K., Selaya, G., Armenteras, D., Bilbao, B. A., Xaud, H. A. M., Rivera-Lombardi, R., Ferreira, J., Aragão, L. E. O. C., Jones, C. D., & Wiltshire, A. J. (2022). An alert system for Seasonal Fire probability forecast for South American Protected Areas. *Climate Resilience and Sustainability*, *1*(1). <https://doi.org/10.1002/cli2.19>
- Aragão, L. E. O. C., Anderson, L. O., Fonseca, M. G., Rosan, T. M., Vedovato, L. B., Wagner, F. H., Silva, C. V. J., Silva Junior, C. H. L., Arai, E., Aguiar, A. P., Barlow, J., Berenguer, E., Deeter, M. N., Domingues, L. G., Gatti, L., Gloor, M., Malhi, Y., Marengo, J. A., Miller, J. B., ... Saatchi, S. (2018). 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nature Communications*, *9*(1), 536. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>
- Arias, P. A., Martínez, J. A., Mejía, J. D., Pazos, M. J., Espinoza, J. C., & Wongchuig-Correa, S. (2020). Changes in Normalized Difference Vegetation Index in the Orinoco and Amazon River Basins: Links to Tropical Atlantic Surface Temperatures. *Journal of Climate*, *33*(19), 8537–8559. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0696.1>
- Armenteras, D., & de la Barrera, F. (2023). Landscape management is urgently needed to address the rise of megafires in South America. *Communications Earth & Environment*, *4*(1), 305. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00964-6>
- Armenteras-Pascual, D., Retana-Alumbroeros, J., Molowny-Horas, R., Roman-Cuesta, R. M., González-Alonso, F., & Morales-Rivas, M. (2011). Characterising fire spatial pattern interactions with climate and vegetation in Colombia. *Agricultural and Forest Meteorology*, *151*(3), 279–289. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.11.002>

- Barreto, J. S., & Armenteras, D. (2020). Open Data and Machine Learning to Model the Occurrence of Fire in the Ecoregion of “Llanos Colombo–Venezolanos.” *Remote Sensing*, *12*(23), 3921. <https://doi.org/10.3390/rs12233921>
- Barriopedro, D., García-Herrera, R., Ordóñez, C., Miralles, D. G., & Salcedo-Sanz, S. (2023). Heat Waves: Physical Understanding and Scientific Challenges. *Reviews of Geophysics*, *61*(2), e2022RG000780. <https://doi.org/10.1029/2022RG000780>
- BBC. (2014, April 15). *Casanare drought raises Colombia climate fears - BBC News*. BBC Mundo. <https://bbc.in/3UcD6qu>
- Bedoya, V. (2024). *Diagnóstico de sequías en la cuenca del río Orinoco* [Trabajo de Investigación Maestría en Ingeniería Ambiental]. Universidad de Antioquia.
- Bilbao, B., Steil, L., Urbietta, I. R., Anderson, L., Pinto, C., González, M. E., Millán, A., Falleiro, R. M., Morici, E., & Ibarregaray, V. (2020). Wildfires. In J. M. Moreno, C. Laguna-Defior, V. Barros, E. Calvo Buendía, J. A. Marengo, & U. Oswald Spring (Eds.). *In: Adaptation to Climate Change Risks in Ibero-American Countries — RIOCCADAPT Report* (pp. 435–496). McGraw Hill. <https://bit.ly/3TYsWJR>
- Bolaño-Díaz, S., Camargo-Caicedo, Y., Soro, T. D., N’Dri, A. B., & Bolaño-Ortiz, T. R. (2022). Spatio-Temporal Characterization of Fire Using MODIS Data (2000–2020) in Colombia. *Fire*, *5*(5), 134. <https://doi.org/10.3390/fire5050134>
- Bonal, D., Burban, B., Stahl, C., Wagner, F., & Hérault, B. (2016). The response of tropical rainforests to drought—lessons from recent research and future prospects. *Annals of Forest Science*, *73*(1), 27–44. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0522-5>
- Brando, P. M., Soares-Filho, B., Rodrigues, L., Assunção, A., Morton, D., Tuchsneider, D., Fernandes, E. C. M., Macedo, M. N., Oliveira, U., & Coe, M. T. (2020). The gathering firestorm in southern Amazonia. *Science Advances*, *6*(2). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay1632>
- Brunner, M. I., Gilleland, E., & Wood, A. W. (2021). Space–time dependence of compound hot–dry events in the United States: assessment using a multi-site multi-variable weather generator. *Earth System Dynamics*, *12*(2), 621–634. <https://doi.org/10.5194/esd-12-621-2021>
- Builes-Jaramillo, A., Yepes, J., & Salas, H. D. (2022). The Orinoco Low-Level Jet and Its Association with the Hydroclimatology of Northern South America. *Journal of Hydrometeorology*, *23*(2), 209–223. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0073.1>

- Calim Costa, M., Marengo, J. A., Alves, L. M., & Cunha, A. P. (2023). Multiscale analysis of drought, heatwaves, and compound events in the Brazilian Pantanal in 2019–2021. *Theoretical and Applied Climatology*. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04655-2>
- Castellanos, E. J., Lemos, M. F., Astigarraga, L., Chacón, N., Cuvi, N., Huggel, C., Miranda, L., Vale, M. M., Ometto, J. P., Peri, P. L., Postigo, J. C., Ramajo, L., Roco, L., & Rusticucci, M. (2022). Central and South America. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability* (pp. 1689–1816). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.014>
- Ciais, Ph., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogée, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, Chr., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A. D., Friedlingstein, P., Grünwald, T., Heinesch, B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., ... Valentini, R. (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, *437*(7058), 529–533. <https://doi.org/10.1038/nature03972>
- Climate Hazards Center*. (2024, April 5). CHIRTSdaily.
- Correa, I. C., Arias, P. A., Vieira, S. C., & Martínez, J. A. (2024). A drier Orinoco basin during the twenty-first century: the role of the Orinoco low-level jet. *Climate Dynamics*, *62*(3), 2369–2398. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-07028-7>
- Costa, D. F., Gomes, H. B., Silva, M. C. L., & Zhou, L. (2022). The most extreme heat waves in Amazonia happened under extreme dryness. *Climate Dynamics*, *59*(1), 281–295. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-06134-8>
- Cunha, A. P. M. A., Buermann, W., & Marengo, J. A. (2023). Changes in compound drought-heat events over Brazil’s Pantanal wetland: an assessment using remote sensing data and multiple drought indicators. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06937-x>
- Dunn, R. J. H., Alexander, L. V., Donat, M. G., Zhang, X., Bador, M., Herold, N., Lippmann, T., Allan, R., Aguilar, E., Barry, A. A., Brunet, M., Caesar, J., Chagnaud, G., Cheng, V., Cinco, T., Durre, I., de Guzman, R., Htay, T. M., Wan Ibadullah, W. M., ... Bin Hj Yussof, M. N. (2020). Development of an Updated Global Land In Situ-Based Data Set of Temperature and Precipitation Extremes: HadEX3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *125*(16). <https://doi.org/10.1029/2019JD032263>
- El Espectador. (2014, April 11). *Sequía en Casanare consumió en total 45.395 hectáreas*. <https://bit.ly/43V1hxS>

- El Nacional. (2023, March 17). *Fenómeno de El Niño puede causar graves problemas energéticos en Venezuela*. El Nacional. <https://bit.ly/3xpKRRV>
- Espinoza, J. C., Jiménez, J. C., Marengo, J. A., Schongart, J., Ronchail, J., Lavado Casimiro, W., & Ribeiro, J. V. M. (2024). The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. *Scientific Reports*, *14*(1), 8107. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5>
- Feron, S., Cordero, R. R., Damiani, A., Llanillo, P. J., Jorquera, J., Sepúlveda, E., Asencio, V., Laroze, D., Labbe, F., Carrasco, J., & Torres, G. (2019). Observations and Projections of Heat Waves in South America. *Scientific Reports*, *9*(1), 8173. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44614-4>
- Flores, B. M., & Holmgren, M. (2021). White-Sand Savannas Expand at the Core of the Amazon After Forest Wildfires. *Ecosystems*, *24*(7), 1624–1637. <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00607-x>
- Gottelman, A., & Rood, R. B. (2016). *Demystifying Climate Models* (Vol. 2). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48959-8>
- Ghanbari, M., Arabi, M., Georgescu, M., & Broadbent, A. M. (2023). The role of climate change and urban development on compound dry-hot extremes across US cities. *Nature Communications*, *14*(1), 3509. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39205-x>
- Giglio, L., Schroeder, W., Hall, J. V., & Justice, C. (2021). MODIS Collection 6 and Collection 6.1 Active Fire Product User's Guide. *National Aeronautical and Space Administration—NASA: Washington, DC, USA*, 64.
- Hao, Y., Hao, Z., Fu, Y., Feng, S., Zhang, X., Wu, X., & Hao, F. (2021). Probabilistic assessments of the impacts of compound dry and hot events on global vegetation during growing seasons. *Environmental Research Letters*, *16*(7), 074055. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1015>
- Hao, Z., Hao, F., Singh, V. P., & Zhang, X. (2018). Changes in the severity of compound drought and hot extremes over global land areas. *Environmental Research Letters*, *13*(12), 124022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaee96>
- Hao, Z., Hao, F., Singh, V. P., & Zhang, X. (2019). Statistical prediction of the severity of compound dry-hot events based on El Niño-Southern Oscillation. *Journal of Hydrology*, *572*, 243–250. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.001>
- Hao, Z., Hao, F., Xia, Y., Feng, S., Sun, C., Zhang, X., Fu, Y., Hao, Y., Zhang, Y., & Meng, Y. (2022). Compound droughts and hot extremes: Characteristics, drivers, changes, and impacts. *Earth-Science Reviews*, *235*, 104241. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104241>

- Hastenrath, S. (2002). The intertropical convergence zone of the eastern Pacific revisited. *International Journal of Climatology*, 22(3), 347–356. <https://doi.org/10.1002/joc.739>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., & Thépaut, J.-N. (2023). ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*, 10. <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>
- Hoyos, N., Correa-Metrio, A., Sisa, A., Ramos-Fabiel, M. A., Espinosa, J. M., Restrepo, J. C., & Escobar, J. (2017). The environmental envelope of fires in the Colombian Caribbean. *Applied Geography*, 84, 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.05.001>
- Hunt, E., Femia, F., Werrell, C., Christian, J. I., Otkin, J. A., Basara, J., Anderson, M., White, T., Hain, C., Randall, R., & McGaughey, K. (2021). Agricultural and food security impacts from the 2010 Russia flash drought. *Weather and Climate Extremes*, 34, 100383. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100383>
- IPCC. (2021). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis* (pp. 3–32). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Iturbide, M., Gutiérrez, J. M., Alves, L. M., Bedia, J., Cerezo-Mota, R., Gimenez, E., Cofiño, A. S., Di Luca, A., Faria, S. H., Gorodetskaya, I. V., Hauser, M., Herrera, S., Hennessy, K., Hewitt, H. T., Jones, R. G., Krakovska, S., Manzanar, R., Martínez-Castro, D., Narisma, G. T., ... Vera, C. S. (2020). An update of IPCC climate reference regions for subcontinental analysis of climate model data: definition and aggregated datasets. *Earth System Science Data*, 12(4), 2959–2970. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2959-2020>
- Jiménez-Sánchez, G., Markowski, P. M., Jewtoukoff, V., Young, G. S., & Stensrud, D. J. (2019). The Orinoco Low-Level Jet: An Investigation of Its Characteristics and Evolution Using the WRF Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(20), 10696–10711. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2019JD030934>
- Lasso, C. A., Usma Oviedo, J. Saulo., Trujillo Gonzalez, Fernando., & Rial B., Anabel. (2010). *Biodiversidad de la cuenca del Orinoco: bases científicas para la identificación de áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad*. Instituto de investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

- Leonard, M., Westra, S., Phatak, A., Lambert, M., van den Hurk, B., McInnes, K., Risbey, J., Schuster, S., Jakob, D., & Stafford-Smith, M. (2014). A compound event framework for understanding extreme impacts. *WIREs Climate Change*, 5(1), 113–128. <https://doi.org/10.1002/wcc.252>
- Li, J., Wang, Z., Wu, X., Zscheischler, J., Guo, S., & Chen, X. (2021). A standardized index for assessing sub-monthly compound dry and hot conditions with application in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(3), 1587–1601. <https://doi.org/10.5194/hess-25-1587-2021>
- Manning, C., Widmann, M., Bevacqua, E., Van Loon, A. F., Maraun, D., & Vrac, M. (2019, August 29). Increased probability of compound long-duration dry and hot events in Europe during summer (1950-2013). *Environmental Research Letters*, 14(9). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab23bf>
- Marengo, J. A., Souza, C. M., Thonicke, K., Burton, C., Halladay, K., Betts, R. A., Alves, L. M., & Soares, W. R. (2018). Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. *Frontiers in Earth Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>
- Martínez, J. A., Arias, P. A., Junquas, C., Espinoza, J. C., Condom, T., Dominguez, F., & Morales, J. S. (2022). The Orinoco Low-Level Jet and the Cross-Equatorial Moisture Transport Over Tropical South America: Lessons From Seasonal WRF Simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(3). <https://doi.org/10.1029/2021JD035603>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *8th Conference on Applied Climatology*, 22–17.
- Miralles, D. G., Gentine, P., Seneviratne, S. I., & Teuling, A. J. (2019). Land–atmospheric feedbacks during droughts and heatwaves: state of the science and current challenges. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1436(1), 19–35. <https://doi.org/10.1111/nyas.13912>
- Morales, J. S., Arias, P. A., Martínez, J. A., & Durán-Quesada, A. M. (2021). The role of low-level circulation on water vapour transport to central and northern South America: Insights from a 2D Lagrangian approach. *International Journal of Climatology*, 41(S1). <https://doi.org/10.1002/joc.6873>
- Moses, O., Blamey, R. C., & Reason, C. J. C. (2023). Drought metrics and temperature extremes over the Okavango River basin, southern Africa, and links with the Botswana high. *International Journal of Climatology*, 43(14), 6463–6483. <https://doi.org/10.1002/joc.8215>
- Mukherjee, S., & Mishra, V. (2018). A sixfold rise in concurrent day and night-time heatwaves in India under 2 °C warming. *Scientific Reports*, 8(1), 16922. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35348-w>

- Muñoz Sabater, J. (2019). ERA5-Datos horarios terrestres desde 1950 hasta la actualidad. *Almacén de Datos Climáticos (CDS) Del Servicio de Cambio Climático de Copernicus (C3S)*. <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>
- Muthuvel, D., & Mahesha, A. (2021). Spatiotemporal Analysis of Compound Agrometeorological Drought and Hot Events in India Using a Standardized Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002101](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002101)
- Oliveira-Júnior, J. F. de, Mendes, D., Correia Filho, W. L. F., Silva Junior, C. A. da, Gois, G. de, Jardim, A. M. da R. F., Silva, M. V. da, Lyra, G. B., Teodoro, P. E., Pimentel, L. C. G., Lima, M., Santiago, D. de B., Rogério, J. P., & Marinho, A. A. R. (2021). Fire foci in South America: Impact and causes, fire hazard and future scenarios. *Journal of South American Earth Sciences*, 112, 103623. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103623>
- Olmo, M., Bettolli, M. L., & Rusticucci, M. (2020). Atmospheric circulation influence on temperature and precipitation individual and compound daily extreme events: Spatial variability and trends over southern South America. *Weather and Climate Extremes*, 29, 100267. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100267>
- Páscoa, P., Gouveia, C. M., Russo, A., & Ribeiro, A. F. S. (2022). Summer hot extremes and antecedent drought conditions in Australia. *International Journal of Climatology*, 42(11), 5487–5502. <https://doi.org/10.1002/joc.7544>
- Portalanza, D., Ortega, C., Garzon, L., Bello, M., Zuluaga, C. F., Bresciani, C., Durigon, A., & Ferraz, S. (2024). Projected Heat Waves in Ecuador under Climate Change: Insights from HadGEM-RegCM4 Coupled Model. *Earth*, 5(1), 90–109. <https://doi.org/10.3390/earth5010005>
- Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Adams, H., Adelekan, I., Adler, C., Adrian, R., Aldunce, P., Ali, E., Begum, R. A., Friedl, B. B., Kerr, R. B., Biesbroek, R., Birkmann, J., Bowen, K., Caretta, M. A., Carnicer, J., Castellanos, E., Cheong, T. S., Chow, W., ... Ibrahim, Z. Z. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.002>
- Poveda, G., Waylen, P. R., & Pulwarty, R. S. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(1), 3–27. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.10.031>
- Ribeiro, A. F. S., Brando, P. M., Santos, L., Rattis, L., Hirschi, M., Hauser, M., Seneviratne, S. I., & Zscheischler, J. (2022). A compound event-oriented framework to tropical fire risk assessment in

a changing climate. *Environmental Research Letters*, 17(6), 065015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac7342>

Ribeiro, A. F. S., Russo, A., Gouveia, C. M., Páscoa, P., & Zscheischler, J. (2020). Risk of crop failure due to compound dry and hot extremes estimated with nested copulas. *Biogeosciences*, 17(19), 4815–4830. <https://doi.org/10.5194/bg-17-4815-2020>

Romero, M., Galinod G, O. J., & Armenteras, D. (2004). *La cuenca del Orinoco en el contexto mundial*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander van Humboldt.

Ruiz-Vásquez, M., Arias, P. A., Martínez, J. A., & Espinoza, J. C. (2020). Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation and water vapor transport towards tropical South America. *Climate Dynamics*, 54(9), 4169–4189. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05223-4>

Russo, A., Gouveia, C. M., Dutra, E., Soares, P. M. M., & Trigo, R. M. (2019). The synergy between drought and extremely hot summers in the Mediterranean. *Environmental Research Letters*, 14(1), 014011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf09e>

Seneviratne, S. I. (2012). Historical drought trends revisited. *Nature*, 491(7424), 338–339. <https://doi.org/10.1038/491338a>

Seneviratne, S. I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C. M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., Mc Innes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., Zhang, X., Rusticucci, M., Semenov, V., Alexander, L. V., Allen, S., Benito, G., ... Zwiers, F. W. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Vol. 9781107025066, pp. 109–230). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.006>

Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynsk, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S. M., Wehner, M., & Zhou, B. (2021). Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In V. Masson-Delmotte, 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, Y. Rong, & B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis* (pp. 1513–1766). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>

Silva León, G. (2005). La cuenca del río Orinoco: visión hidrográfica y balance hídrico. *Revista Geográfica Venezolana*, 46, 75–108. <https://bit.ly/3JdkAZM>

- Stendel, M., Francis, J., White, R., Williams, P. D., & Woollings, T. (2021). Chapter 15 - The jet stream and climate change. In T. M. Letcher (Ed.), *Climate Change (Third Edition)* (Third Edition, pp. 327–357). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821575-3.00015-3>
- Taylor, M. A., & Alfaro, E. J. (2005). Central America and the Caribbean, Climate of. In J. E. Oliver (Ed.), *Encyclopedia of World Climatology* (pp. 183–189). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/1-4020-3266-8_37
- Tripathy, K. P., Mukherjee, S., Mishra, A. K., Mann, M. E., & Williams, A. P. (2023). Climate change will accelerate the high-end risk of compound drought and heatwave events. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *120*(28), e2219825120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2219825120>
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Gobron, N., & Dolman, A. J. (2008). Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics. *Global Biogeochemical Cycles*, *22*(3). <https://doi.org/10.1029/2007GB003122>
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). 2 - The Earth System. In J. M. Wallace & P. V. Hobbs (Eds.), *Atmospheric Science (Second Edition)* (Second Edition, pp. 25–61). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-732951-2.50007-7>
- Wu, X., Hao, Z., Hao, F., Singh, V. P., & Zhang, X. (2019). Dry-hot magnitude index: a joint indicator for compound event analysis. *Environmental Research Letters*, *14*(6), 064017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1ec7>
- Xu, L., Yu, W., Yang, S., & Zhang, T. (2024). Concurrent drought and heatwave events over the Asian monsoon region: insights from a statistically downscaling CMIP6 dataset. *Environmental Research Letters*, *19*(3), 034044. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad2cad>
- Yu, R., & Zhai, P. (2020). Changes in compound drought and hot extreme events in summer over populated eastern China. *Weather and Climate Extremes*, *30*, 100295. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100295>
- Zscheischler, J., & Fischer, E. M. (2020). The record-breaking compound hot and dry 2018 growing season in Germany. *Weather and Climate Extremes*, *29*, 100270. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100270>
- Zscheischler, J., Martius, O., Westra, S., Bevacqua, E., Raymond, C., Horton, R. M., van den Hurk, B., AghaKouchak, A., Jézéquel, A., Mahecha, M. D., Maraun, D., Ramos, A. M., Ridder, N. N., Thiery, W., & Vignotto, E. (2020). A typology of compound weather and climate events. *Nature Reviews Earth & Environment*, *1*(7), 333–347. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0060-z>

- Zscheischler, J., Michalak, A. M., Schwalm, C., Mahecha, M. D., Huntzinger, D. N., Reichstein, M., Berthier, G., Ciais, P., Cook, R. B., El-Masri, B., Huang, M., Ito, A., Jain, A., King, A., Lei, H., Lu, C., Mao, J., Peng, S., Poulter, B., ... Zeng, N. (2014). Impact of large-scale climate extremes on biospheric carbon fluxes: An intercomparison based on MsTMIP data. *Global Biogeochemical Cycles*, 28(6), 585–600. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2014GB004826>
- Zscheischler, J., & Seneviratne, S. I. (2017). Dependence of drivers affects risks associated with compound events. *Science Advances*, 3(6). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700263>
- Zscheischler, J., Westra, S., van den Hurk, B. J. J. M., Seneviratne, S. I., Ward, P. J., Pitman, A., AghaKouchak, A., Bresch, D. N., Leonard, M., Wahl, T., & Zhang, X. (2018). Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, 8(6), 469–477. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>