

TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS

Ministerio de Ambiente y Energía - Instituto Meteorológico Nacional

Número **1**
ISSN 2953-738X



ISSN 2953-738X

Volumen 24

Diciembre 2025



San José, Costa Rica

TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS

ISSN 2953-738X

Volumen 24

Diciembre 2025



Ministerio de Ambiente y Energía
Instituto Meteorológico Nacional

Coordinación general:
Mag. Eladio Solano León

Edición:
M.Sc. Gabriela Chinchilla Ramírez

Comité editorial:
M.Sc. Daniel Poleo Brito
M.Sc. Gabriela Chinchilla Ramírez
M.Sc. Karina Hernández Espinoza

Diseño y diagramación:
Rodrigo Granados Jiménez

Imágenes de portada:
Nury Sanabria Valverde

*La revista “Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos”
es publicada por el Instituto Meteorológico Nacional,
Ministerio de Ambiente y Energía, Costa Rica. Tiene como
finalidad dar a conocer los resultados de investigaciones y
estudios en Ciencias de la Atmósfera y Oceanografía Física.*

Los artículos publicados en Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos expresan la opinión del autor y
no necesariamente del Instituto Meteorológico Nacional

CONTENIDO

Pág. Artículo

- 5 **Tornados y trombas marinas en el trópico: eventos registrados en Costa Rica (2010 al 2023)**

DANIEL POLEO BRITO
MÓNICA JIMÉNEZ MURILLO

- 26 **Generación de pronósticos retrospectivos de caudal para cuencas hidrográficas en Costa Rica por medio de la técnica de análisis de correlación canónica**

CARLOS M. MADRIGAL
ERIC J. ALFARO
HUGO G. HIDALGO
BERNY G. FALLAS LÓPEZ

Tornados y trombas marinas en el trópico: eventos registrados en Costa Rica (2010 al 2023)

DANIEL POLEO BRITO¹ Y MÓNICA JIMÉNEZ MURILLO²

Resumen

A pesar de que existe muy poca documentación sobre la ocurrencia de tornados y trombas marinas en Centroamérica, este estudio demostró que los tornados no mesociclónicos son frecuentes en ciertas regiones y épocas del año en Costa Rica. Se realizó un análisis sinóptico de todos los casos identificados del 2010 al 2023 a través de registros fotográficos, videos de torbellinos (tornados y trombas marinas) en Costa Rica, imágenes de satélite y datos de estaciones en superficie, determinando que son frecuentes la ocurrencia de tornados no mesociclónicos en la región, originados en nubes convectivas muy profundas de tipo cumulonimbos y que adquirieron rotación. Luego se comparó con las fases de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y la Oscilación de Madden Julian (MJO) con el fin de determinar su relación con estas oscilaciones intraestacionales y de baja frecuencia. Además, se determinó la estacionalidad en la ocurrencia de los tornados, así como la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENSO), los cuales son concluyentes en la formación de todos los torbellinos en la región y en particular de los tornados no mesociclónicos, siendo más (menos) frecuentes durante el fenómeno de La Niña (El Niño); al contrario de las trombas marinas que son más (menos) frecuentes durante la fase cálida (fría) del ENOS.

PALABRAS CLAVES: TORNADOS, TROMBAS MARINAS, TORBELLINOS, TORNADOS EN CENTROAMÉRICA, MJO.

Abstract

Although there is very little documentation on the occurrence of tornadoes and waterspouts in Central America, this study shows that non-mesocyclonic tornadoes are frequent in certain regions and times of the year in Costa Rica. To this end, a synoptic analysis was conducted of all identified cases from 2010 to 2023 using photographic records, videos of whirlwinds (tornadoes and waterspouts) in Costa Rica, satellite images, and data from surface stations. It was determined that non-mesocyclonic tornadoes are frequent in Costa Rica, originating in cumulonimbus convective clouds that acquired a certain rotation. This was then compared with each of the phases of the El Niño Southern Oscillation (ENSO) and the Madden Julian Oscillation (MJO) in order to determine their relationship with these intra-seasonal and low-frequency oscillations. In addition, the seasonality of tornado occurrence was determined, as well as the influence of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and the El Niño Southern Oscillation (ENSO) phenomenon, which are conclusive in the formation of all whirlwinds in the region and in particular non-mesocyclonic tornadoes, being more (less) frequent during the La Niña (El Niño) phenomenon; unlike waterspouts, which are more (less) frequent during the warm (cold) phase of ENSO.

KEYWORDS: TORNADOES, WATERSPOUTS, WHIRLWINDS, NON-MESOCYCLONIC TORNADOES, TORNADOES IN CENTRAL AMERICA, MJO.

1 Máster en Ciencias de la Atmósfera. Universidad de Costa Rica. Instituto Meteorológico Nacional. Correo electrónico dpoleo@imn.ac.cr

2 Bachiller en Meteorología. Instituto Meteorológico Nacional, área de Aeronáutica. San José, Costa Rica. Correo electrónico moni.jimenez.murillo@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Según la Organización Meteorológica Mundial en su Atlas Internacional de Nubes, en los fenómenos hidrometeoros de la atmósfera, existen aquellos que consisten en un vórtice de partículas. A estos les llamaremos torbellinos y se pueden definir como una columna de fluido, ya sea líquido o gaseoso, que presenta un rápido movimiento giratorio en torno a un eje en posición vertical que permanece relativamente estable, generando un vórtice de viento o remolino.

La Organización de la Investigación de Tornados y Tormentas (TORRO, por sus siglas en inglés) (TORRO, 2021) clasifica los torbellinos en cuatro tipos, según su formación. Además, indica que cuando el vórtice es una rotación en agua, se le conoce en inglés como “whirlpool” o tromba marina, mientras que cuando la rotación es de aire, se le conoce en inglés como “whirlwind” o tornados. Por lo que podemos clasificar los torbellinos de la siguiente manera:

- **Torbellinos principales:** tornados mesociclónicos, tornados no mesociclónicos y nubes de embudo, estas últimas hacen referencia a tornados en formación pero que no han tocado el suelo.
- **Torbellinos menores:** land devils (demonios de tierra), water devils (demonios de agua) y fire devils (demonios de fuego).
- **Torbellinos de Eddy (pequeños vórtices).**
- **Otros torbellinos:** vórtices formados al final de los planos alares de los aviones.

Hablando propiamente de los tornados, se pueden definir como una violenta columna de aire en rotación que se extiende de nubes tipo cumulonimbos o cumulus congestus hasta alcanzar la superficie, ya sea en tierra o agua, con la base inferior del cono. Pueden generarse en regiones tropicales y subtropicales, y su formación está asociada tanto a ciclones tropicales como a convección severa organizada sobre continentes

cálidos o aguas someras (Edwards, 2012; Carroll-Smith, 2023). A menudo se asocia su origen con células de tormenta bien desarrolladas en frentes fríos, donde se da un choque entre una masa de aire frío que avanza desplazando una masa de aire cálido y húmedo (Piñeres, 2010). Sin embargo, la mayoría de los tornados en zonas tropicales suelen estar asociados a ciclones tropicales, como huracanes o tormentas tropicales.

Estos sistemas pueden generar tornados cuando se dan condiciones de inestabilidad y cizallamiento vertical en niveles bajos de la atmósfera, similares a otros sistemas productores de tornados. La ubicación dentro del ciclón tropical resulta clave para la formación de tornados. La mayoría de estos fenómenos ocurren en el cuadrante delantero derecho de la tormenta, donde la combinación de cizallamiento del viento y condiciones de inestabilidad convectiva es más favorable (Piñeres, 2010). En ese sector, las bandas convectivas suelen contener células que facilitan la formación de tornados, incluso a cierta distancia del centro de la tormenta tropical. Este proceso se acelera cuando el ciclón toca tierra y presenta una mayor fricción o resistencia al avance, aumentando los procesos turbulentos y facilitando la formación de tornados (National Weather Service, s. f.; Edwards, 2012; Carroll-Smith, 2023). No obstante, en los ciclones tropicales, la inestabilidad térmica es más frecuente por debajo de los 3 000 m (10 000 pies), lo que produce tormentas más diminutas y de menor profundidad que las observadas en latitudes medias (NOAA, s.f.).

Dadas las condiciones dinámicas y termodinámicas que se presenten en la atmósfera, podemos clasificar los tornados en dos tipos según su formación u origen dinámico:

- **Tornados mesociclónicos:** se dan cuando se forma un mesociclón o ciclón de mesoscala en las células de tormenta llamadas supercélulas. Esto ocurre cuando la base de la nube cumulonimbos gira

al igual que el tornado, formando una especie de “herradura”. Normalmente se producen en latitudes medias y para formarse necesitan intrusión de aire seco y frío, húmedo y cálido. Cuentan con gran vorticidad que permite la rotación de la nube (Hagemeyer, 1997).

- **Tornados no mesociclónicos:** estos no presentan un mesociclón en las células de tormenta debido a que tienen menos vorticidad, la nube es de menor tamaño y se forman con masas de aire húmedas homogéneas, a diferencia de los mesociclónicos. Son débiles, de corta duración y no son fáciles de detectar. Se pueden subclasificar en trombas terrestres, trombas marinas y “gustnados” (tornados de frente de ráfagas) (Piñeres, 2010).

El proceso de gestación de un tornado mesociclónico, según TORRO (2021), tiene varias fases:

- 1) Comienza dentro de las células de tormenta, conforme el aire ingresa por el flanco derecho delantero a baja altitud.
- 2) Persiste una fuerte corriente ascendente de aire cálido y húmedo.
- 3) El aire ascendente se ve obligado a girar debido a la variación vertical del viento con la altura y a su proximidad a una corriente descendente de aire más frío y seco.
- 4) La corriente ascendente caliente flotante adquiere rotación en sentido antihorario en el hemisferio norte (sentido horario en el hemisferio sur) a medida que sufre un estiramiento local en la vertical.
- 5) El efecto de giro en espiral se extiende gradualmente a lo largo de la corriente ascendente, y la velocidad de rotación aumenta a medida que disminuye el diámetro efectivo de la columna, este proceso principalmente ocurre con los tornados mesociclónicos.

Cuando la columna se extiende visiblemente debajo de la base de la nube como una nube en forma de embudo, es porque el vapor de agua se está condensando en su cubierta exterior debido a la caída de presión y temperatura. Tras pasar el tiempo suficiente, se presenta una velocidad de giro y estiramiento lo suficientemente alto como para que el embudo del tornado se alargue hasta el suelo. Esto ocurre mientras hay ráfagas descendentes en la nube de tormenta y vientos de alta velocidad potencialmente dañinos. Esto forma un efecto de absorción donde el embudo succiona todo lo que se encuentra a su paso.

Por otro lado, los tornados no mesociclónicos no se originan dentro de una tormenta celular o una supercelda. Existen dos principales factores que originan su formación y para llegar a la fase de madurez deben presentarse y mantenerse ambos (Alfonso, 1994). Lo primero es la existencia de convección, que normalmente se presenta en nubes de tipo cumulonimbos en la región tropical. Estas nubes son lo suficientemente altas como para generar el proceso de ascenso vertical de aire cálido y una corriente descendente fría y más seca. Y lo segundo es la rotación sostenida del aire que genera cizalladura.

Para lograr la convección existen varios mecanismos, esto puede presentarse en condiciones con un perfil termodinámico inestable, que puede hacer que el aire menos denso ascienda rápidamente. También, cuando el mar está cálido (temperaturas superficiales superiores a los 28°C) puede producir un aumento en la temperatura del aire con el que está en contacto y generar el ascenso de este. Por último, la orografía u otras masas de aire con diferente densidad también pueden causar movimientos verticales (Golden, 1974).

Ahora bien, se ha observado que las trombas marinas específicamente, tienen otro proceso particular. Se asocian a una combinación de cizalladura horizontal del viento a nivel del mar

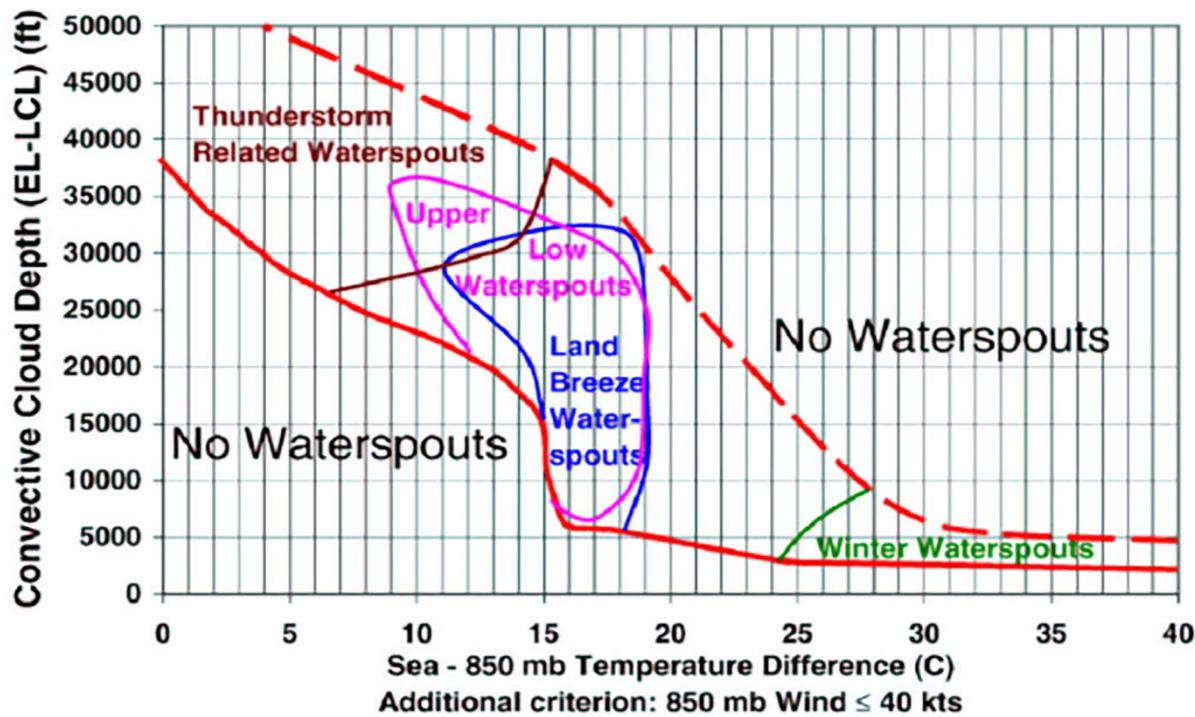


Figura 1: Monograma de Szilagyi para la formación de una tromba marina (tomado de Szilagyi, 2005)

y altas temperaturas en la superficie marina (ver Figura 1). Además, Simpson et al (1986) sugieren que la existencia de vórtices parentales a escala de cúmulos es una condición necesaria para la formación de trombas marinas, pero no suficiente por sí sola. Para que se genere un embudo visible, los vórtices deben intensificarse por debajo de la base de la nube hasta el nivel del mar durante el breve lapso de tiempo en que la corriente ascendente convectiva está activa.

Sobre aguas cálidas someras, la convección somera y la brisa marina generan líneas de convergencia y vórtices de capa límite que, con suficiente flujo ascendente y contraste térmico mar-aire, permiten el desarrollo de vórtices similares a “ motores térmicos” (teoría termodinámica para torbellinos convectivos) que al acoplarse a bases de cúmulos, producen trombas marinas delgadas de vida breve y vientos moderados (Golden, 1974). Este mecanismo explica la alta frecuencia de trombas marinas en regiones tropicales-subtropicales como Florida Keys. Por otro lado, el

mismo mecanismo ha sido observado en litorales subtropicales como Canarias bajo condiciones cálidas, húmedas y con cizalladura débil-moderada.

Luego de más de 95 observaciones, Golden (1974) identificó 5 fases para su desarrollo:

- 1) Formación de una mancha oscura en el mar. Se forma un disco oscuro, casi negro, sobre la superficie del agua. La mera presencia de la mancha implica la existencia de la columna de aire rotante sobre el agua. Una pequeña nube embudo puede o no estar presente. Muy posiblemente esta mancha oscura se deba a la sombra del embudo antes de tocar la superficie del mar. (Szilagyi, 1994).
- 2) La fase de espiral. Se forman unas bandas espirales en el agua entorno a la mancha negra. Las bandas alternan entre claras y oscuras.

Cuadro 1: Escala Fujita mejorada para clasificar los tornados según la intensidad del viento y los daños ocasionados. (OMM, 2024)

Categoría EF	Velocidad estimada del viento (km/h)	Impactos principales
EF0	105–137	Daños menores en techos y ramas pequeñas.
EF1	138–178	Daños moderados en viviendas; árboles medianos derribados.
EF2	179–218	Daños considerables en techumbres y paredes; árboles grandes arrancados.
EF3	219–266	Daños severos en edificaciones sólidas; destrucción parcial de viviendas.
EF4	267–322	Daños devastadores: colapso de casas sólidas; vehículos proyectados.
EF5	≥323	Destrucción total de construcciones; árboles despojados de corteza.

- 3) Fase del anillo de espuma. Sobre la mancha oscura comienza a formarse un torbellino de espuma a partir del agua levantada por el viento. Al mismo tiempo, se inicia el desarrollo vertical de la nube embudo.
- 4) La madurez. El anillo de espuma y la tuba alcanzan su máxima longitud y diámetro.
- 5) La disipación. Sucecede a veces de manera brusca, cuando cesa una de las condiciones que mantienen activa la tromba. Muchas veces la lluvia cercana intercepta la tromba y las corrientes de aire frío descendentes inician la disipación del fenómeno (Szilagyi, 2004).

Los modelos de formación de tornados no están lo suficientemente desarrollados, sin embargo, en los trópicos, al ser menos frecuentes condiciones extremas que permitan desarrollar superceldas convectivas, se puede determinar que la mayoría de estos eventos que ocurren en la región son tornados no mesociclónicos. Siendo así los tornados tropicales fenómenos menos intensos y poco frecuentes en comparación con sus homólogos extratropicales o mesociclónicos de latitudes medias (Page, 2005).

La velocidad del viento de los vórtices de la mayoría de los tornados tropicales se estima en

menos de 176 km/h. Duran entre pocos segundos y aproximadamente una hora; y recorren distancias entre 100 metros y decenas de kilómetros a velocidades de 18 a 46 km/h (MetEd, 2020) (Laing, 2016).

La duración de las trombas marinas varía entre 5 a 10 minutos y su velocidad de traslación puede estar entre 5 a 20 km/h. Su velocidad de rotación no sobrepasa los 130 km/h y tienden a ser levemente menos intensas que las trombas terrestres.

Todos estos diferentes tipos de tornados se comenzaron a clasificar en estudios realizados en latitudes medias por Theodore Fujita (1971). Surgiendo la escala Fujita para categorizar dichos eventos, basándose en la intensidad del viento y los daños que éstos producían. Actualmente se utiliza la escala Fujita mejorada, la cual está descrita en el cuadro 1 (NOAA, 2024).

Por lo tanto, basados en su intensidad y duración, los tornados generados por ciclones y tormentas tropicales habitualmente se clasifican en los rangos más bajos (por ejemplo, EF0 o EF1). Aun así, estos eventos representan un riesgo considerable para las zonas afectadas, particularmente porque

pueden formarse a gran velocidad y sin aviso suficiente (NOAA, s.f.).

Por otro lado, TORRO utiliza una escala diferente. El Dr. G. Terence Meaden ideó la Escala Internacional de Intensidad de Tornados en 1972 para clasificar las velocidades del viento de los tornados. Está directamente relacionada con la Escala Beaufort y es la única escala verdadera de intensidad de tornados con una base científica sólida (TORRO, 2021).

Existen otros fenómenos que se generan en las nubes cumulonimbos los cuales provocan daños severos debido a la intensidad de los vientos y son las ráfagas descendentes. Se forman por efecto del arrastre de la precipitación, del enfriamiento evaporativo y de la incorporación de aire seco. Las corrientes descendentes más intensas pueden provocar vientos muy fuertes (más de 190 km/h) y daños en la superficie. En ocasiones pueden ser confundidas con tornados no mesociclónicos, a consecuencia de su intensidad (Barnes, 2001).

Las corrientes descendentes se clasifican en microrráfagas, que tienen un alcance horizontal inferior a los 4 km y una duración de algunos minutos; y las macrorráfagas, que exceden los 4 km de extensión, duran entre 5 y 30 minutos y son capaces de provocar daños similares a un tornado F0 o F1 en la escala Fujita debido a sus ráfagas de viento superiores a los 120 km/h y en ocasiones superiores a los 140 km/h (MetEd, 2020).

Como existe muy poca documentación sobre la ocurrencia de tornados y trombas en Centroamérica, no se considera como una región tornádica en muchas de las clasificaciones y publicaciones, sin embargo, este estudio demuestra que dichos fenómenos son frecuentes en ciertas regiones climáticas y épocas del año en Costa Rica, así como las variables meteorológicas predominantes para su ocurrencia.

Además, se analiza la correlación que tienen estos eventos con las fases tanto de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) como de la Oscilación de Madden-Julian (MJO), la cual tiene afectación en la precipitación sobre la región de Centroamérica y el Caribe (Poleo et al 2014-a). Por otro lado, aunque los eventos extremos de precipitación se asocian a la cercanía de la Zona de Convergencia Intertropical, también se puede inferir que la presencia de mayores sistemas convectivos de mesoscala y complejos convectivos se debe principalmente a la presencia de la fase 1 y 2 de la MJO (Poleo et al 2014-b), debilitando los alisios y generando mayor probabilidad de ocurrencia de fenómenos extremos asociados a la generación de cumulonimbos.

En México, Macías y Avendaño (2014) realizaron una climatología de tornados ocurridos en este país entre los años 2000 y 2012. Consideraron necesario empezar a construir una base de datos que permitiera ir conformando el panorama global de su existencia, sus características meteorológicas y condiciones de aparición, para ilustrar ese potencial de amenaza y sus condiciones que han sido ignoradas durante muchos años. Ellos concluyen que la construcción de la base de datos de tornados es un instrumento de análisis que permite apreciar la extensión de la ocurrencia de tornados en el país en sus dimensiones temporal y espacial.

Por otro lado, León-Cruz et al. (2025) identificaron tres “tipos de entornos tornádicos” en México con inestabilidad moderada y cizalladura de marginal a moderada, modulados por contrastes térmicos regionales y topografía. Además, en costas del Caribe y el Golfo de México, las trombas marinas son frecuentes y distinguen variantes tornádicas y no tornádicas en la tipología operativa del Servicio Meteorológico Nacional (SMN-CONAGUA, s. f.).

En Cuba, Aguilar et al. (2005) realizaron una climatología de las tormentas locales severas (TLS) en el período entre 1987 y 2002. Encontraron que

las TLS presentan una clara variación estacional y una variabilidad interanual que sugieren una relación entre los eventos de La Niña y los máximos de actividad de TLS.

En Brasil, Silva (2011) realizó un estudio sobre el aumento de reportes de tornados en dicho país. Comparó el aumento en los informes sobre tornados con la evolución de la densidad de población y las comunicaciones, representadas estas últimas por la evolución de las cadenas de televisión locales y la popularización de Internet. Además, voluntarios espontáneos han contribuido a concienciar sobre la existencia de tornados y el peligro que suponen para la vida y la propiedad. Concluye que, aunque este tipo de noticias son irregulares y poco científicas, son la única fuente disponible sobre este fenómeno, aparte de los pocos casos que han llegado a la literatura científica. Y recalca la importancia de que exista un registro oficial de informes sobre tornados en Brasil.

En 2025, Lopes y de Lima realizaron un estudio en el sur de Brasil, donde se muestra una concentración de tornados dentro del corredor severo del Cono Sur; una climatología recopiló 310 ocurrencias con estacionalidad y distribución espacial definidas en Rio Grande do Sul, Santa Catarina y Paraná. Entre los casos emblemáticos destaca el tornado de Xanxerê (Santa Catarina, 20 de abril de 2015), con víctimas y gran destrucción, documentado por la prensa y por análisis de daños de la comunidad científica brasileña (Agencia Brasil, 2015). Estos hallazgos confirman que, aun fuera de los “pasillos” clásicos de latitudes medias, la confluencia de humedad tropical y forzamientos frontales o de mesoscala favorece convección tornádica intensa en el sur de Brasil.

2. METODOLOGÍA

Se buscaron los registros de publicaciones en medios de comunicación en Costa Rica, boletines

meteorológicos, redes sociales que evidencian con fotografías, videos y testimonios de testigos toda la ocurrencia de eventos de torbellinos en Costa Rica en el período entre los años 2010 y 2023. Luego se analizaron todas las condiciones sinópticas de cada evento encontrado para clasificarlos en los diferentes tipos de torbellinos descritos anteriormente, basándose en la evidencia recolectada, y se identificaron todos los tornados y trombas que ocurrieron, diferenciándolas con otros eventos que tienden a ser confundidos con tornados.

Para ello se analizaron datos de estaciones meteorológicas suministradas por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y otras instituciones (estaciones de la red de Wunderground, UCR cercanas al evento), imágenes de satélite y radar, bitácoras del Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica (DMSA) del IMN y boletines meteorológicos del IMN, así como productos derivados de satélites suministrados por el Instituto Cooperativo para el Estudio Satelital Meteorológico (CIMSS, por sus siglas en inglés).

Para entender las razones termodinámicas que influyeron en la ocurrencia de tornados, se observó la temperatura potencial equivalente generada por una climatología de radiosondeos en el Valle Central, lugar donde se presentaron la mayor cantidad de eventos, esto con el fin de determinar si existían condiciones climatológicas que influyeran en el desarrollo tornádico en la región.

Se clasificaron todos los eventos detectados según la localización, fecha, tipo de evento y región climática establecida por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN, 2021). Con base en esto, se realizó una climatología de eventos ocurridos en el país durante el período de estudio. Luego se clasificaron mensualmente cada uno de los torbellinos y se seleccionaron únicamente los torbellinos principales para conocer su

frecuencia de ocurrencia. Los torbellinos menores se descartaron y no fueron presentados en el presente trabajo puesto que nuestro interés son los tornados propiamente.

Por otro lado, se clasificaron los tornados no mesociclónicos según la fase del El Niño Oscilación del Sur (ENOS) usando los períodos que la NOAA con el índice de oscilación del Niño (ONI) y el índice de oscilación del Sur determinaron que se tenía un fenómeno cálido o frío del ENOS.

Además, se determinó la fase de la oscilación Madden Julian (MJO) según la metodología de Wheeler y Hendon (2004) para la fecha de ocurrencia de cada evento, para así determinar la frecuencia de tornados y trombas marinas en cada una de ellas y clasificarlos.

Para el análisis sinóptico las variables que se utilizaron fueron:

- 1) La presión atmosférica al nivel del mar (SLP, por sus siglas en inglés) medida en hectopascales (hPa), esto para determinar las zonas de altas y bajas presiones.
- 2) El vector del viento en el nivel de 850 hPa medido en metros por segundo (m/s), esto para determinar el comportamiento del viento predominante.
- 3) Los valores de la variable omega medidos en Pascales por segundo (Pa/s), los cuales miden el flujo advectado de aire cálido o frío a la atmósfera. Si el flujo de aire es ascendente (descendente), los valores serán negativos (positivos) y están asociados a sistemas de baja presión (alta presión).
- 4) Líneas de corriente en los niveles de 250 hPa, 500 hPa y 850 hPa para determinar ubicación de la ZCIT y patrones favorables para los cumulonimbos.
- 5) La vorticidad relativa (VR) en el nivel de 850 hPa medida en (s^{-1}), la cual indica la rotación del aire a través de la atmósfera. Siendo positiva cuando es ciclónico (giro

antíhorario en el hemisferio norte) y negativa cuando es anticiclónica (giro horario en el hemisferio norte). Está asociado a bajas presiones y ascensos cuando es positiva, mientras que cuando es negativa está asociado a altas presiones.

- 6) La cortante del viento medida en nudos (Kt) la cual es una variable importante para determinar el favorecimiento o no de la convección profunda y el desarrollo de nubes cumulonimbos.
- 7) Finalmente se usaron Imágenes satelitales de radiación infrarroja (IR, por sus siglas en inglés) medida en Celsius ($^{\circ}$ C), la cual estima la temperatura de los topes nubosos para determinar la altura del cumulonimbo que generó el tornado y la tromba.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego del análisis sinóptico de los 61 días con eventos registrados, se identificaron 64 torbellinos principales en los 14 años de estudio, dado que en uno de los eventos sucedieron 4 trombas marinas al mismo tiempo y se contabilizaron por separado. Los eventos están ubicados espacialmente en un mapa de Costa Rica en la figura 2. Además, se clasificaron en el cuadro 2 por regiones climáticas y por tipo de evento, siendo la mayoría específicamente trombas terrestres, a las que nombraremos simplemente tornados en adelante.

Se identificó una mayor cantidad de tornados representando un 67.2 % del total de eventos, un 21.9% fueron trombas marinas y finalmente un 10.9 % de nubes de embudo (ver Cuadro 3). Estas últimas fueron fenómenos que no llegaron a tocar tierra, desarrollándose la mayoría de las condiciones para la ocurrencia del tornado, pero sin llegar a formarse completamente.

Las regiones con menor ocurrencia de eventos son el Pacífico Central y Zona Norte (ver Figura 3). Probablemente por menos presencia de

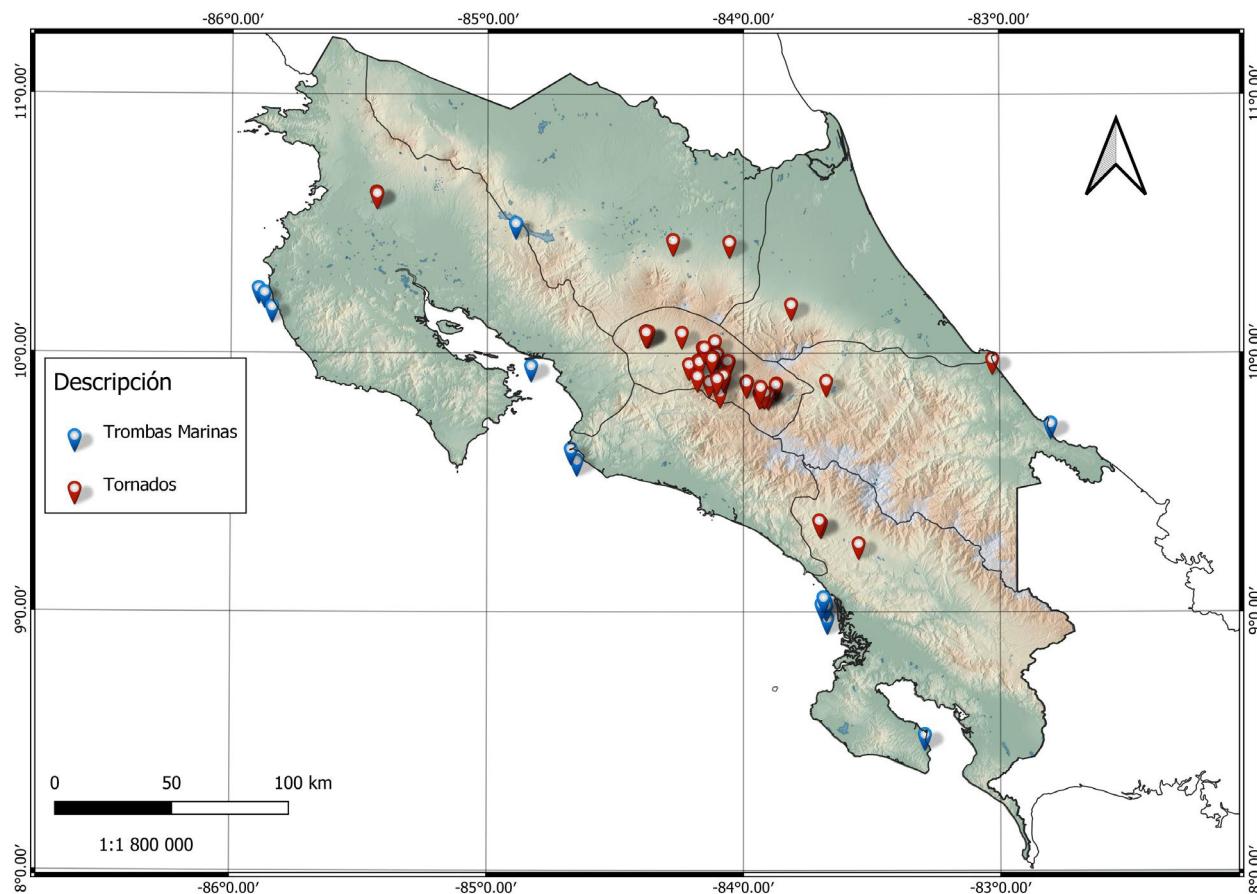


Figura 2. Ubicación espacial de los principales tornados (rojo) y trombas marinas (azul) registrados en Costa Rica entre el período 2010-2023. Fuente: Propia.

Cuadro 2. Tornados, trombas marinas y nubes de embudo registrados en Costa Rica durante el 2010 al 2023.

Día	Mes	año	Ubicación	Región climática	Tipo de evento
6	5	2010	Barva de Heredia	Valle Central	Tornado
15	6	2010	Belén de Heredia	Valle Central	Tornado
27	7	2010	Naranjo de Alajuela	Valle Central	Tornado
2	9	2011	Pococí de Limón	Vertiente del Caribe	Tornado
22	6	2012	San Pedrito de Pérez Zeledón	Pacífico Sur	Tornado
28	11	2012	Bella Vista de Sarapiquí	Vertiente del Caribe	Tornado
4	6	2013	Naranjo de Alajuela	Valle Central	Tornado
27	6	2014	Aserrí	Valle Central	Tornado
28	4	2015	Santa Bárbara de Heredia	Valle Central	Tornado
20	6	2015	Sierpe de Osa	Pacífico Sur	Tromba marina
12	4	2016	Naranjo de Alajuela	Valle Central	Tornado
12	7	2016	Santa Cruz de Guanacaste	Pacífico Norte	Tromba marina
30	9	2016	Turrialba de Cartago	Vertiente del Caribe	Tornado
14	3	2017	Puerto Jiménez de Golfito	Pacífico Sur	Tromba marina
27	3	2017	Santa Cruz de Guanacaste	Pacífico Norte	Tromba marina
11	4	2017	Liberia de Guanacaste	Pacífico Norte	Tornado

Día	Mes	año	Ubicación	Región climática	Tipo de evento
23	4	2017	Guadalupe de Cartago	Valle Central	Tornado
8	5	2017	San Isidro del General	Pacífico Sur	Tornado
19	6	2017	Cartago centro	Valle Central	Tornado
6	7	2017	San Rafael de Alajuela	Valle Central	Tornado
12	7	2017	Tres Ríos de Cartago	Valle Central	Nube de embudo
31	7	2017	San Antonio de Escazú	Valle Central	Tornado
5	8	2017	Tres Ríos de Cartago	Valle Central	Tornado
19	8	2017	Zona Sur	Pacífico Sur	Tornado
23	8	2017	Hatillo de San José	Valle Central	Tornado
9	9	2017	Plaza González Víquez	Valle Central	Tornado
16	9	2017	San José centro	Valle Central	Nube de embudo
24	9	2017	Oreamuno de Cartago	Valle Central	Tornado
22	3	2018	Limón centro	Vertiente del Caribe	Tornado
30	5	2018	Quircot de Cartago	Valle Central	Nube de embudo
12	9	2018	Heredia y San José	Valle Central	Tornado
20	9	2018	Junquillal de Guanacaste	Pacífico Norte	Tromba Marina
10	4	2019	Liberia de Guanacaste	Pacífico Norte	Tornado
6	8	2019	Belén de Heredia	Valle Central	Tornado
18	8	2019	Lago del Arenal, San Carlos	Zona Norte	Tromba marina
26	5	2020	Pital de San Carlos	Zona Norte	Tornado
15	6	2020	Santo Domingo de Heredia	Valle Central	Nube de embudo
19	10	2020	Volcán Poás	Valle Central	Tornado
22	10	2020	Naranjo de Alajuela	Valle central	Tornado
14	11	2020	San Rafael de Heredia	Valle Central	Tornado
9	1	2021	Mercedes Norte de Heredia	Valle Central	Tornado
5	5	2021	Santa Ana	Valle Central	Nube de embudo
5	8	2021	Santa Bárbara de Heredia	Valle Central	Tornado
14	9	2021	Santo Domingo de Heredia	Valle Central	Tornado
15	9	2021	Cartago centro	Valle Central	Tornado
9	10	2021	Heredia	Valle Central	Nube de embudo
18	5	2022	La Aurora de Heredia	Valle Central	Tornado
26	6	2022	Jacó, Garabito	Pacífico Central	Tromba marina
2	8	2022	La Lima Cartago	Valle Central	Tornado
11	8	2022	San Blas Cartago	Valle Central	Tornado
23	8	2022	Centro Cartago	Valle Central	Tornado
31	8	2022	Cot de Oreamuno, Cartago	Valle Central	Tornado
21	5	2023	Osa	Pacífico Sur	4 trombas marinas
7	6	2023	Puntarenas	Pacífico Norte	Tornado
1	7	2023	Herradura	Pacífico Central	Tromba marina
1	7	2023	Manzanillo	Vertiente del Caribe	Tromba marina
17	8	2023	Heredia	Valle Central	Nube de embudo
1	9	2023	Garabito	Pacífico Central	Tromba marina
23	9	2023	Heredia	Valle Central	Tornado
10	10	2023	Poás	Valle Central	Tornado
14	11	2023	Oreamuno de Cartago	Valle Central	Tornado

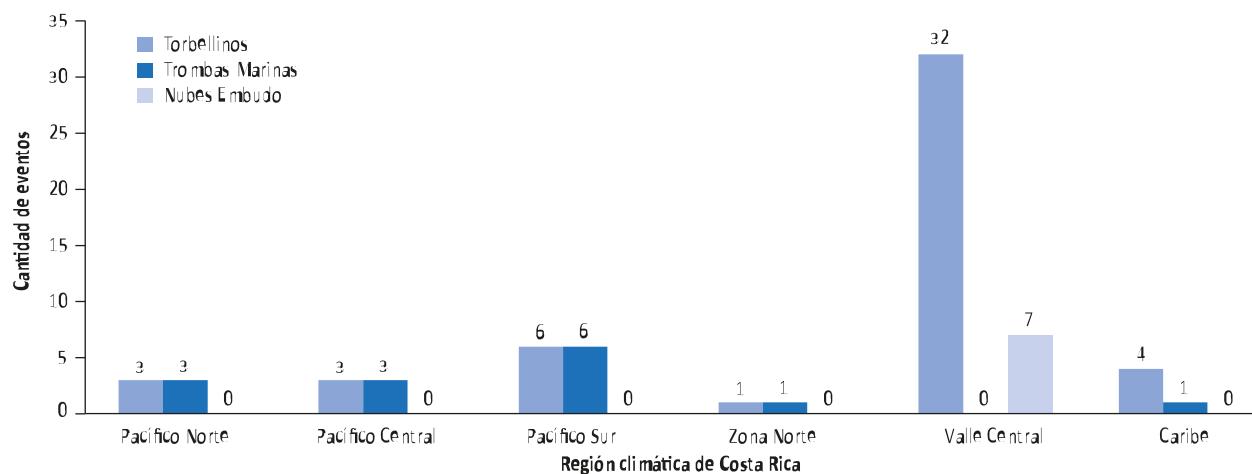


Figura 3. Clasificación por región climática de los tornados no mesociclónicos y nubes de embudo registrados en Costa Rica entre el período 2010-2023. Fuente: Propia.

Cuadro 3. Representación porcentual por tipo de evento de los fenómenos registrados en Costa Rica entre el período 2010-2023

Tipo de evento	Cantidad de eventos	%
Tornado	43	67,2
Tromba Marina	14	21,9
Nubes embudo	7	10,9
Total	64	100,0

Fuente: Propia.

avistamientos, además de condiciones menos propicias para la convergencia de vientos y formación de cumulonimbos con rotación.

La mayor ocurrencia de eventos se dio en el Valle Central (ver Figura 3). Esto debido a la presencia del frente de convergencia de vientos en el centro del país. Es decir, por la confluencia de la brisa marina que ingresa de la región del Pacífico y los vientos alisios provenientes del este. Aunado a esto, la presencia de temperaturas convectivas superiores a 28°C, además de valores muy altos de temperatura potencial equivalente que llegan al menos hasta 600 hPa.

Estas condiciones, que no se evidenciaron en otras regiones del país, permitieron el desarrollo de cúmulos de alto crecimiento vertical con

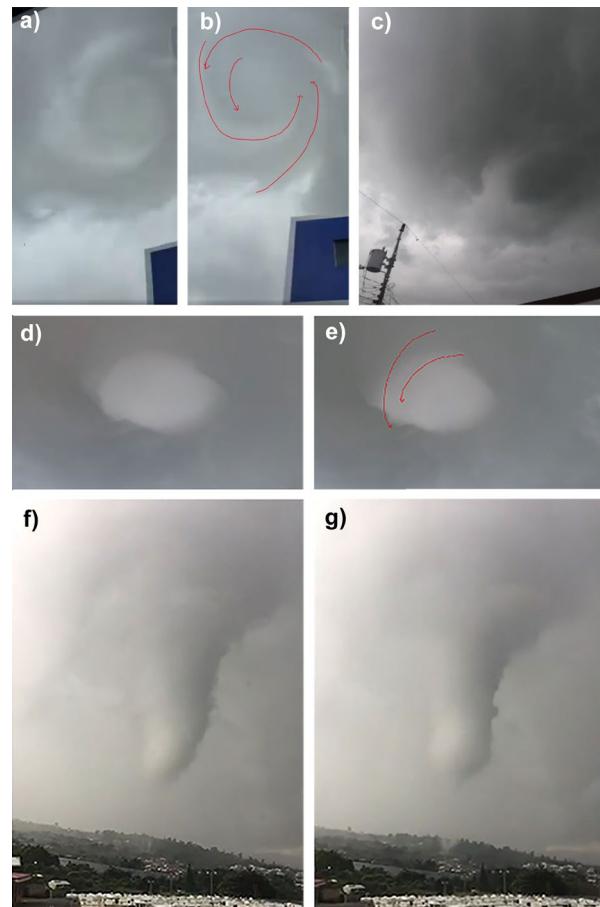


Figura 4: Fases de formación de los tornados (trombas terrestres) observadas en el trópico. Imágenes tomadas en Costa Rica extraídas de varios eventos. Fuente: Elaboración propia, (extraída de video de la Nación 5 agosto 2021).

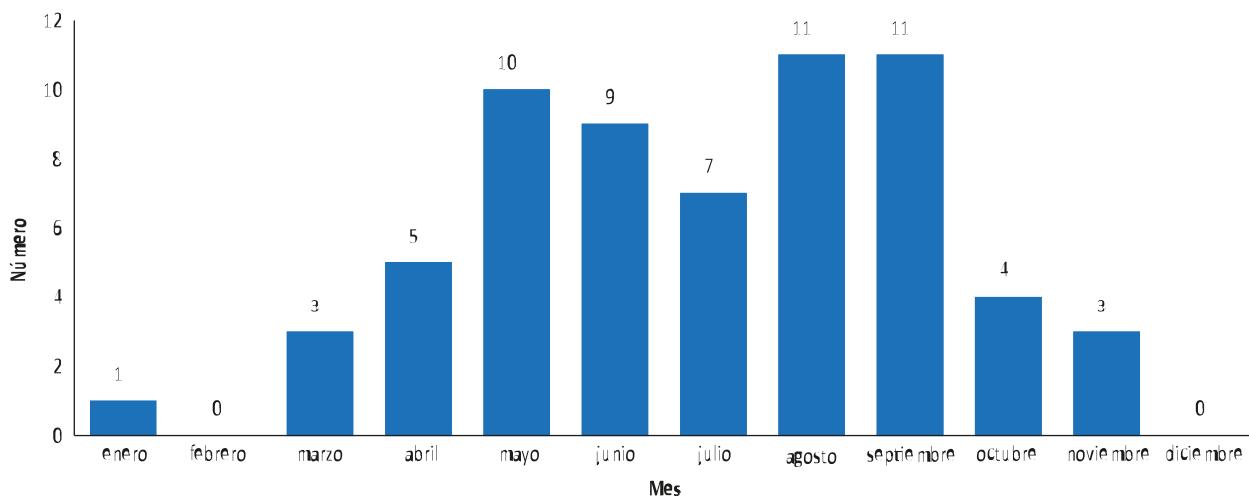


Figura 5. Distribución mensual de los tornados no mesociclónicos y nubes de embudo registrados en Costa Rica entre el período 2010-2023. Fuente: Propia.

temperaturas en los topes nubosos inferiores a los -75°C , así como la rotación de los núcleos nubosos. Permitiendo identificar el proceso de formación de los tornados (trombas terrestres) en la mayoría de los eventos (ver Figura 4):

- Etapa de convergencia de vientos húmedos (alisios-oestes) a temperaturas superiores a los 28°C en superficie.
- Formación de cumulonimbos con temperaturas por debajo de los -75°C y hasta -90°C .
- Alta vorticidad del cumulonimbo y presencia de fuertes microráfagas descendentes. En la base de la nube comienza a notarse el vórtice y giro.
- Fuertes ráfagas descendentes comienzan a empujar el embudo a la superficie. En ocasiones se observa granizo pequeño.
- Formación del embudo en la base (centro) de la nube.
- El tornado toca tierra, esto puede ser observable quizás algunos metros sobre la superficie, pueden percibirse escombros resultados de las microráfagas y en rotación alrededor del embudo.
- Disipación del evento, la base de la nube tiende a subir.

Las trombas marinas, aunque se registraron en ambas vertientes del país, hubo una mayor ocurrencia de fenómenos en la vertiente del Pacífico, no habiendo preferencia para ninguna subregión. Esto probablemente ocurrió porque para todos estos eventos se necesitó que la temperatura del tope de la nube alcanzara promedios de casi -90°C , siendo más sencillo en el Pacífico al tener temperaturas más cálidas y la presencia de la ZCIT con mayor divergencia. Esto se evidenció en los análisis sinópticos realizados en cada uno de los eventos.

La mayoría de los núcleos convectivos asociados a las trombas marinas tuvieron temperaturas por debajo de los -85°C a -95°C en sus topes nubosos, es decir, tendían a ser más frías que las nubes que desarrollaron los tornados en tierra.

Los análisis sinópticos no se incluyeron en el artículo por ser demasiado extensos pero se determinó en todos los eventos ciertas características recurrentes: anomalías de presión negativa en el Pacífico o Caribe circundante, las presiones a nivel del mar promedios estuvieron entre 1010 y 1012 hPa; grandes regiones de Omegas negativas en toda la región por debajo de -0.12 Pa/s ; posicionamiento de la ZCIT sobre

el Pacífico como vaguada monzónica (conformada por circulaciones ciclónicas) y no como una simple convergencia de vientos; anomalías de vientos del oeste, valores de vorticidad relativa por sobre $45\text{--}50\text{ s}^{-1}$ y cortante débil del viento favorable para ciclogénesis.

Se observó una marcada estacionalidad de la ocurrencia de estos fenómenos entre mayo y septiembre, con una disminución en julio, muy posiblemente asociada a un incremento en la cortante del viento debido al Veranillo o Canícula (ver Figura 5).

No se registraron eventos ni en febrero ni en diciembre, ambos meses del invierno del hemisferio norte. Muy posiblemente esta merma se debió a una disminución de las temperaturas convectivas y la ausencia de cumulonimbos de alto crecimiento vertical.

Se determinó que los meses con mayor inestabilidad atmosférica y menor velocidad en los vientos alisios, coincidieron con los meses con mayor actividad tornádica, particularmente junio y septiembre.

Este comportamiento se puede inferir con el calentamiento en el verano boreal, condiciones más inestables consecuencia de la presencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), una mayor inestabilidad atmosférica a causa de mayor presencia de ondas tropicales que arriban a Centroamérica, entre otros factores.

Por otro lado, pareciera existir un aumento en la tendencia de fenómenos en los últimos años, sin embargo, esto pudiera obedecer a una mayor documentación videográfica con la cual validar la ocurrencia del evento (ver Figura 6).

Cuando se analizó el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) separando cada evento según la fase de ocurrencia del fenómeno (ver Cuadro 4), se observó que hay una gran influencia de la fase fría del ENOS (La Niña) durante la ocurrencia de tornados, el 69,8% de los eventos se presentaron durante esta fase. Mientras que cuando se tuvieron condiciones de El Niño, hubo más eventos de trombas marinas registradas. Incluso en uno de los eventos en la península de Osa se observaron 4 trombas al mismo tiempo (ver Figura 7).

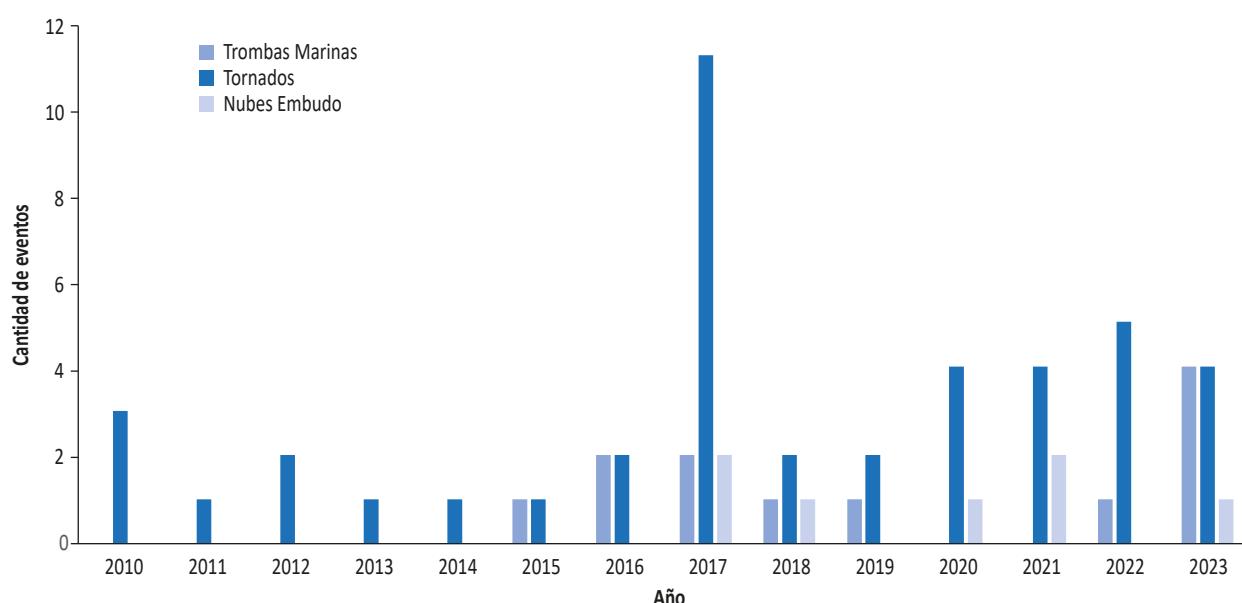


Figura. 6. Distribución anual de los tornados no mesociclónicos y nubes de embudo ocurridos en Costa Rica entre el período 2010-2023. Fuente: Propia.

Cuadro 4. Cuadro comparativo de la frecuencia de tornados, trombas marinas y nubes de embudo durante el fenómeno ENOS entre el período 2010-2023.

Fase ENOS	Tornados	%
Niña	30	69,8
Niño	7	16,3
Neutro	6	14,0
Total	43	100,0

Fase ENOS	Trombas marinas	%
Niña	1	7,1
Niño	6	42,9
Neutro	7	50,0
Total	14	100,0

Fase ENOS	Nubes embudo	%
Niña	5	71,4
Niño	2	28,6
Neutro	0	0,0
Total	7	100,0

Fuente: Propia.

Además, se observó una marcada influencia de la oscilación Madden-Julian (MJO) en la ocurrencia de los tornados (ver Figura 8). En las fases 1, 2 y 8 ocurrió más de un 75 % de los eventos registrados en el país, estos en su mayoría en la vertiente del Pacífico, con excepción de 4 eventos de tornados.

Por otro lado, las trombas marinas se presentaron en su mayoría (60%) en fases 3 y 4 de la MJO. De todas las trombas marinas registradas, 12 ocurrieron en el Pacífico y 2 en la vertiente del Caribe (una de ellas en el Lago Arenal). La fase de la MJO con menor ocurrencia de fenómenos fue la fase convergente 6.

Se evidenció que las fases divergentes de la MJO (fases 1 y 2) fueron las que favorecieron mayor cantidad de tornados y las fases convergentes estuvieron presentes en la mayoría de la ocurrencia de trombas marinas (siendo independiente de



Figura 7. Trombas marinas ocurridas en Osa, 21 de mayo 2023.

Fuente: Propia (Extraído y modificado de un video anónimo).

la formación en el océano Pacífico o en el mar Caribe).

La razón principal de que la mayoría de los tornados ocurran durante los meses de junio y agosto-septiembre, así como la disminución o mínimo de eventos presentados en Julio, se debe posiblemente a la inestabilidad atmosférica en niveles bajos y medios de la atmósfera presente durante esos meses. Esto se observa en la figura 9, donde podemos ver altos valores de temperatura

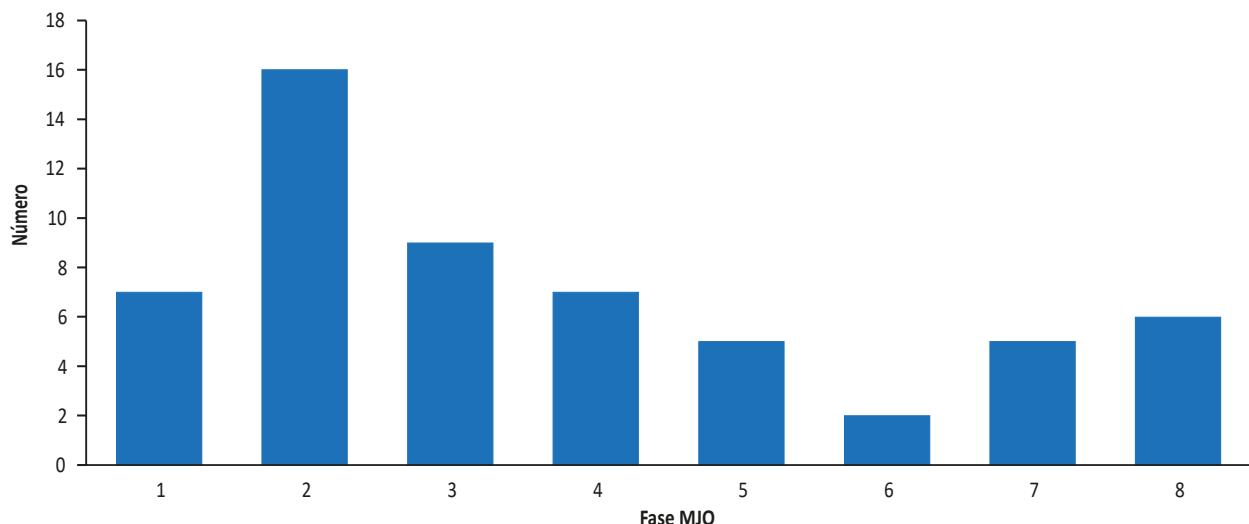


Figura 8. Distribución de los tornados no mesociclónicos ocurridos en cada fase de la MJO en Costa Rica entre el período 2010-2023. Fuente: Propia.

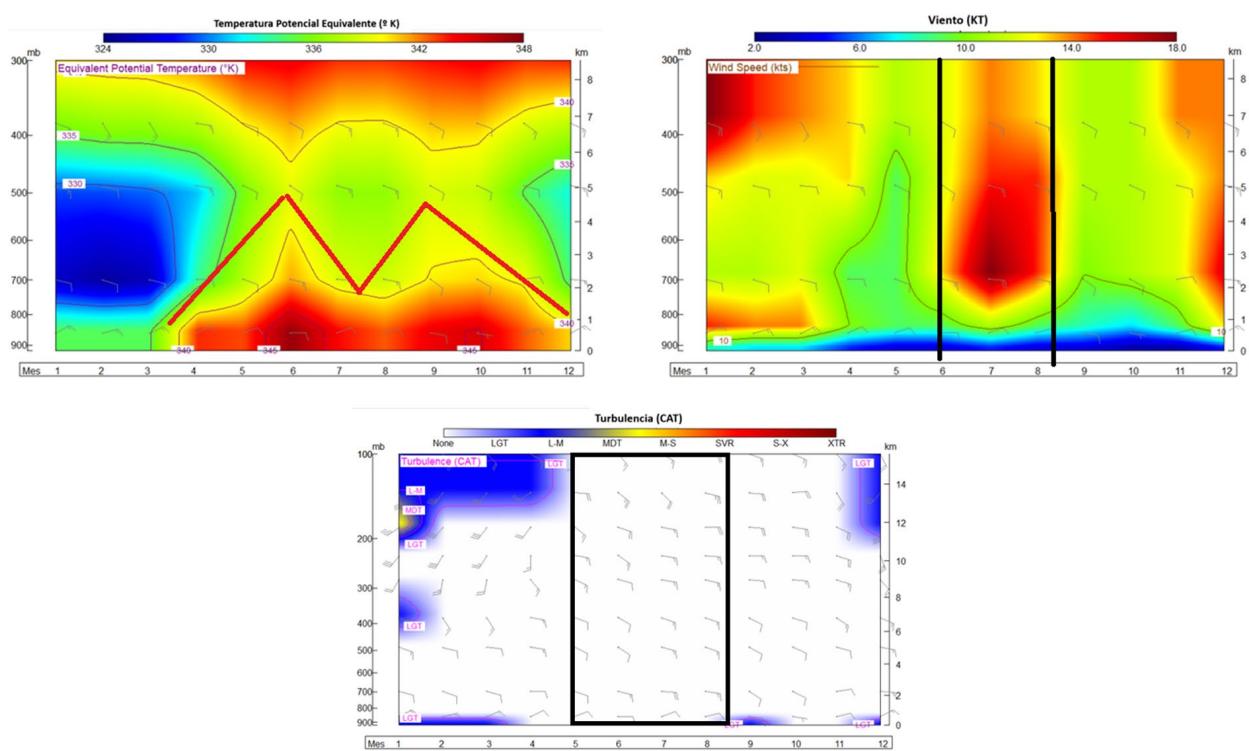


Figura 9. Serie de tiempo anual de la Temperatura Potencial Equivalente (TTHE), Viento total y Turbulencia de aire Claro (CAT). Período 2013-2017. Tomado de Valverde (2019).

potencial equivalente durante dichos meses, la cual es mayor que en el resto del año.

Por otro lado, se observó que, con una mayor inestabilidad convectiva, la presencia de una

mayor temperatura potencial equivalente en esos meses de junio, agosto y septiembre generó una mayor inestabilidad atmosférica a la hora de generar estos fenómenos en el Valle Central, así como una mayor profundidad en los

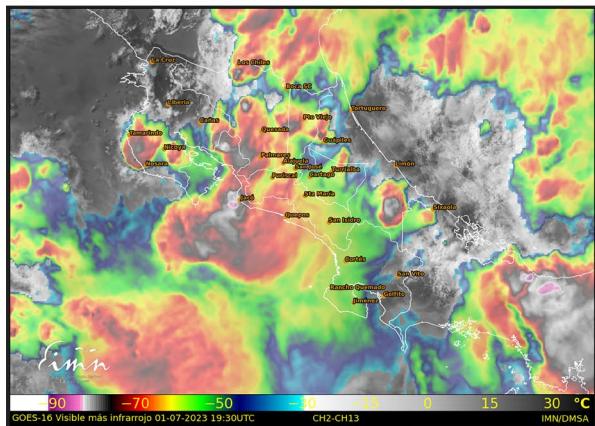
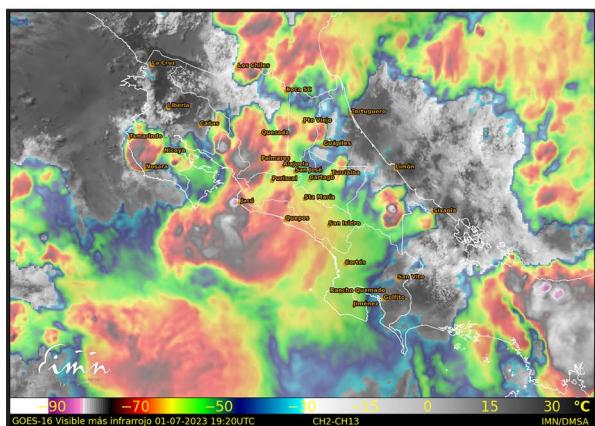
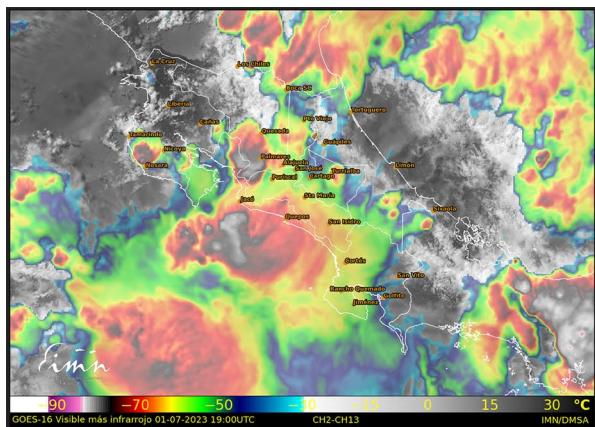


Figura 10. Ejemplo de la disminución de la temperatura en los topes nubosos durante uno de los casos de tromba marina el 1 de julio 2023. Tromba de Herradura. Fuente: Canal 13, GOES 16.

cumulonimbus, cuyas temperaturas alcanzaron valores menores a los -75°C y para trombas marinas temperaturas menores a los -90°C para todos los eventos identificados (ver Figura 10).

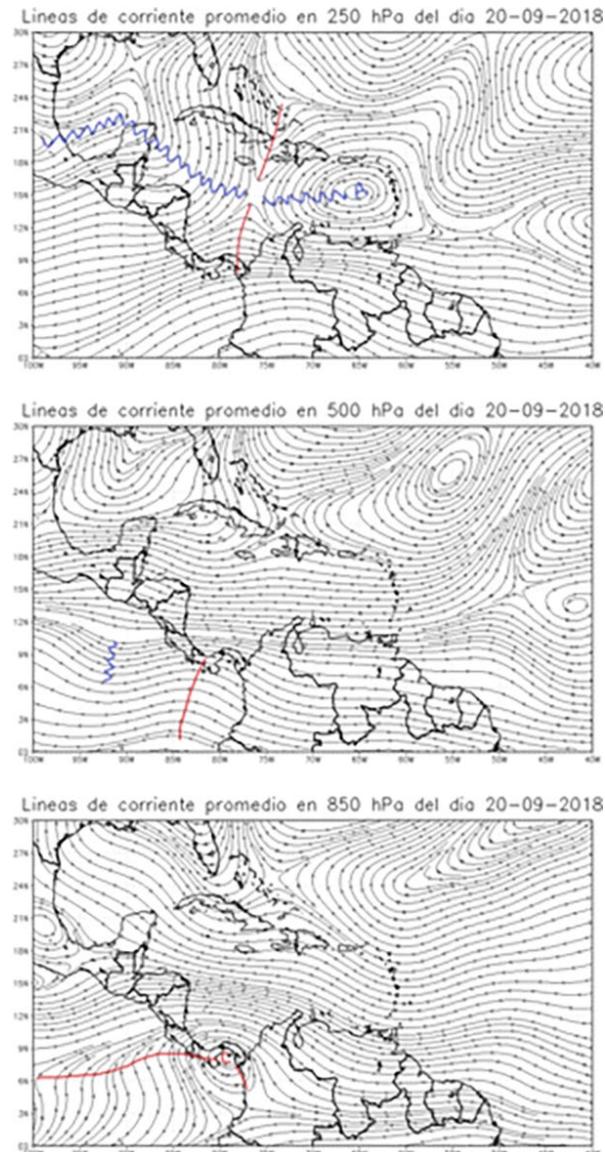


Figura 11. Líneas de corriente del evento ocurrido el 20 de septiembre de 2018 en (hPa). La imagen superior muestra los valores promedio al nivel de 250 hPa, la imagen del centro muestra los valores promedio al nivel de 500 hPa y la imagen inferior muestra los valores promedio al nivel de 850 hPa.

Fuente: Generado con Grads elaboración propia, datos de Reanálisis NCEP/NCAR/NOAA.

En la figura 10 podemos observar los núcleos convectivos rosados (temperaturas -95°C) en la costa frente a Jacó indicada en el mapa, que fue donde se desarrolló la tromba marina que se observó el 1 de julio de 2023. Este tope nuboso

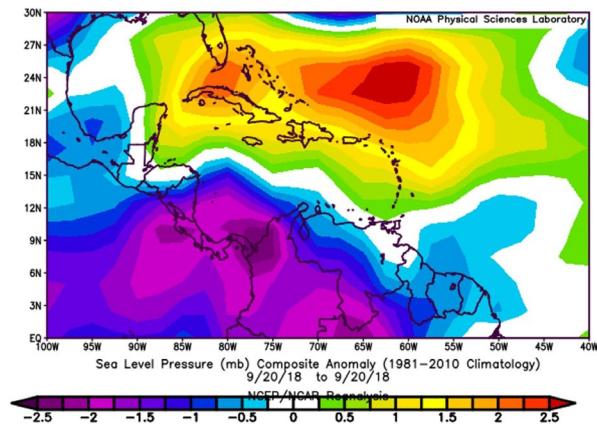
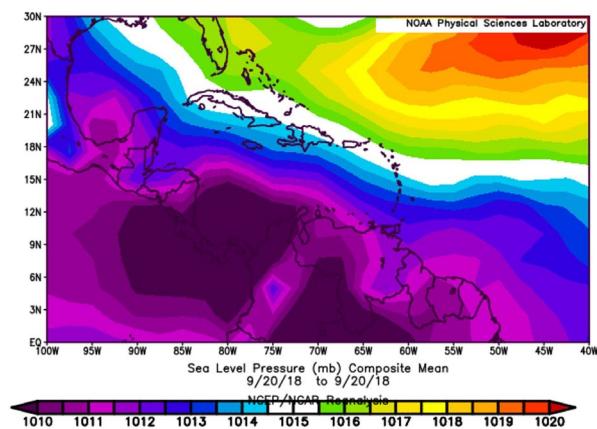


Figura 12. Presión atmosférica al nivel del mar (SLP) y su anomalía ocurrida el 20 de septiembre de 2018. La imagen superior representa los valores de SLP promedio. La imagen inferior re- presenta las anomalías de dicha variable.

Fuente: Elaboración propia, datos de Reanálisis NCEP/NCAR/NOAA.

muy frío, aunque pequeño (20 km de diámetro aproximadamente) fue suficiente para generar las ráfagas verticales e inducir el desarrollo de la tromba, por otro lado, el océano Pacífico se encontraba cálido, inmerso dentro de un episodio de El Niño Oscilación del Sur.

En las figuras de la 11 a la 14, presentamos el análisis sinóptico de uno de los casos analizados. Este mismo análisis se elaboró para cada uno de los eventos registrados en el país en el período de estudio de este trabajo donde se observó un comportamiento similar en la mayoría de los casos. Valores de omegas negativos que son resultado de

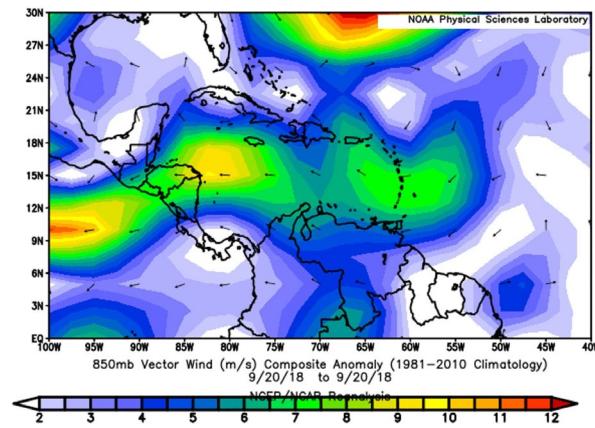
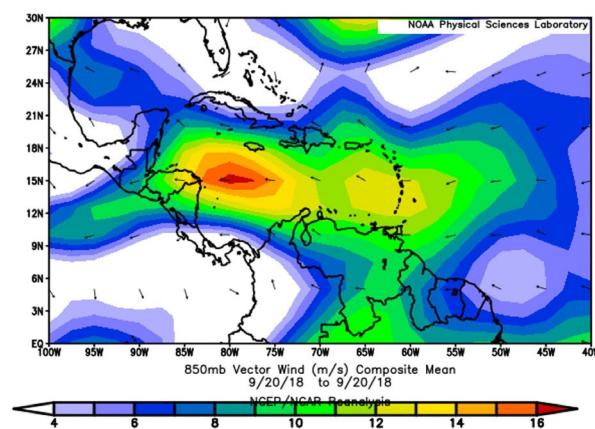


Figura 13. Gráficos del vector de viento (m/s) del día 20/09/2018. La imagen superior muestra los valores promedios del vector de viento. La imagen inferior presenta las anomalías de dicha variable.

Fuente: elaboración propia, datos de Reanálisis NCEP/NCAR/NOAA.

los ascensos favorables de las parcelas de aire. La ubicación de la ZCIT sobre Costa Rica en 850 hPa se muestra marcada en la línea roja de la figura 11. La ubicación de la ZCIT en particular con el desarrollo de la baja de Panamá, como parte de la vaguada monzónica, fue una de las características sinópticas preponderantes.

La SLP sobre el Pacífico se encontraba con anomalías negativas, representando condiciones favorables de vientos débiles para este fenómeno de tromba marina que se presentó el 20 de septiembre de 2018. Este comportamiento se pudo observar en todos los eventos de tornados y trombas marinas. Nunca se presentaron

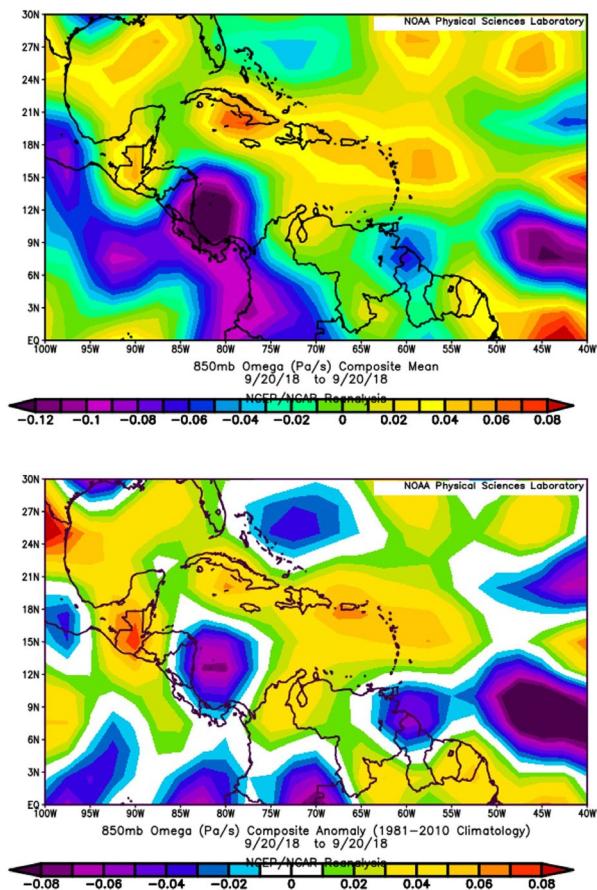


Figura 14. Omega (Pa/s) del día 20/09/2018. La imagen superior muestra los valores pro- medio de la variable Omega. La imagen inferior muestra las anomalías de dicha variable.

Fuente: elaboración propia, datos de Reanálisis NCEP/NCAR/NOAA.

anomalías positivas de SLP durante alguno de los eventos registrados.

La Figura 13 mostró alisios normales para la época, lo que significó en septiembre vientos del oeste menos intensos que el resto del año.

Finalmente se pudo observar en la figura 14 condiciones de omegas negativos superiores a -0.06 Pa/s , favoreciendo ascensos en una gran área sobre Costa Rica y el Caribe circundante, esto favoreció la ventilación de los sistemas sinópticos como la ZCIT así como la salida en la capa alta de la troposfera (250 hPa) para la formación de la tromba marina en el Pacífico Norte del país.

4. CONCLUSIONES

Luego de analizar los 61 días con eventos recolectados de torbellinos principales en el país en el período 2010 al 2023 se concluyó que se presentaron en el período de estudio 43 eventos con tornados (trombas terrestres) y 14 eventos con trombas marinas, siendo todos los eventos tornados no mesociclónicos, debido a que en ninguno de los casos se visualizó un mesociclón en las nubes cumulonimbos que los generaron, como sí sucede en las superceldas que se desarrollan en latitudes medias, por lo que se puede decir que fueron cumulonimbos, nubes de alto crecimiento vertical en rotación las que produjeron los torbellinos.

La región climática del país donde más se desarrollaron este tipo de fenómenos fue en el Valle Central y los meses con más casos registrados fueron junio y septiembre, coincidiendo con los meses de mayor actividad de ondas tropicales, además de la presencia de una mayor inestabilidad atmosférica profundizada hasta 600 hPa (figura 9).

Las condiciones sinópticas preponderantes durante los eventos fueron anomalías de presión negativas en la mayor parte de la costa del Pacífico, además se tuvieron vientos alisios débiles (menores a 4 m/s) incluso en niveles de 850 hPa, la ubicación de la ZCIT sobre el Pacífico de Costa Rica como vaguada monzónica en 850 hPa, vorticidades relativas altas cercanas o sobre Costa Rica (positivas sobre los $40 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, cortante del viento muy baja favoreciendo al crecimiento de los cumulonimbos y calentamiento superior a los 28°C en el sector de ocurrencia de los fenómenos.

Se evidenció una gran correlación en las temperaturas alcanzadas en los topes de las nubes y la ocurrencia tanto de los tornados (trombas terrestres) como de las trombas marinas. La revisión de los análisis sinópticos y las imágenes de satélite mostraron que la formación de trombas marinas se asoció con sistemas con

temperaturas mucho más bajas en los topes (-85°C a -90°C) mientras que para los tornados son suficiente sistemas cercanos por debajo de -75°C, sin embargo, siempre se presentó convergencia de alisios del noreste con vientos suroestes húmedos.

La MJO en sus fases divergentes (1 y 2) favorecieron la ocurrencia de una mayor cantidad de tornados. Por otro lado, las fases convergentes estuvieron presentes en la mayoría de la ocurrencia de trombas marinas (siendo independiente de la formación en el océano Pacífico o en el mar Caribe).

Se identificó que los meses de diciembre a febrero, los cuales corresponden al período de la estación seca en el Valle Central y la vertiente del Pacífico en Costa Rica, fueron cuando menos tornados y trombas marinas se presentaron, eso responde a una dinámica más asociada a la ausencia de la ZCIT ubicada más al sur en este período, condiciones más estables en la atmósfera media y alta, la presencia de una mayor cortante de viento, condiciones más secas en la atmósfera así como una mayor presión a nivel del mar.

El fenómeno de La Niña estuvo presente en el 70 % de los tornados (trombas terrestres), mientras que El Niño y la fase neutral del ENOS estuvieron presentes en el 92 % de las trombas marinas. La principal razón de este comportamiento que se presentó durante La Niña es consecuencia de un mayor contenido de humedad en las regiones propensas a generarse tornados (Pacífico), vientos alisios, cortantes más débiles, así como la presencia de mayor cantidad de núcleos convectivos continentales.

Es posible que durante El Niño se presentaran mayor cantidad de trombas marinas consecuencia de un mayor calentamiento de las aguas del Pacífico, favoreciendo con ello núcleos convectivos con topes de nubes más altos, logrando alcanzar los -85°C a -90°C que se necesitaron en todos los casos para generar trombas marinas. El

caso de la tromba detectada en el lago arenal fue la excepción, debido a que no se tiene una explicación certera de la razón dinámica de su ocurrencia y los datos y análisis sinópticos no fueron concluyentes.

Es importante mencionar que en todos los análisis que se realizaron y videos analizados, los principales daños causados por los tornados y trombas marinas en el país fueron el desprendimiento de latas, daños en tendido eléctrico e infraestructura de las viviendas; tampoco hubo fallecidos asociados a los tornados y trombas en este período.

5. AGRADECIMIENTOS

A José Navarro, por su colaboración en la elaboración de figuras del mapa de Costa Rica.

6. REFERENCIAS

Agencia Brasil. (2015, 22 de abril). City in southern Brazil devastated by tornado. Empresa Brasil de Comunicação. Extraído de: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/en/geral/noticia/2015-04/city-southern-brazil-devastated-tornado>

Aguilar G.; M. Carnesoltas; C. Fernández y L. Naranjo (2005): «Climatología de las tormentas locales severas en Cuba en el período 1987-2002. Resultados de la modelación de un caso de estudio». Revista Cubana de Meteorología, 12(1): 3-10

Alfonso, A. P., 1994: Climatología de las tormentas locales severas de Cuba. Cronología. Editorial Academia, 168 págs. [Disponible a través de Editorial Academia, Industria no. 452, esquina a San José, La Habana 10 200, Cuba]

Barnes, Gary, 2001: Severe Local Storms in the Tropics. *Meteorological Monographs*, **28**, 359-432.

- Carroll-Smith, D., Green, B. W., Edwards, R., Bai, L., Litta, A. J., Huang, X., ... & McCaul Jr, E. W. (2023). Forecasting tropical cyclone tornadoes and impacts: Report from IWTC-X. *Tropical Cyclone Research and Review*, 12(2), 123-135.
- Edwards, R. (2012). Tropical cyclone tornadoes: A review of knowledge in research and prediction. *E-Journal of Severe Storms Meteorology*, 7(6), 1-61.
- Fujita, T. (1971). Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity (No. NASA-CR-125545).
- Golden, J. H. (1974). The life cycle of Florida Keys' waterspouts. I. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 13(6), 676-692.
- Hagemeyer, B. C., 1997: Peninsular Florida Tornado Outbreaks. *Wea. Forecasting*, 12, 399–427.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Clima de Costa Rica y Variabilidad Climática. (2021). Extraído de: <https://www.imn.ac.cr/52> (15 de octubre de 2021).
- Laing, Introducción a la meteorología tropical, 2a edición (The COMET program, 2016).
- La Nación, 2021: Tornado de santa Bárbara. Extraído de: <https://www.nacion.com/sucesos/desastres/tornado-destechara-viviendas-bota-arboles-y-afecta/FLC4XNOH25HTDDYDLGA3QWYW74/story/> (15 de agosto 2022)
- León-Cruz, J. F. (2025). Tornadic environments in Mexico. *Atmospheric Research*, 315, 107916.
- Lopes, M. M., & de Lima Nascimento, E. (2025). Climatology of tornado occurrences in southern Brazil. *Ciência e Natura*, 47(esp. 3), e84051-e84051.
- Macías Medrano and A. Avendaño García, Investigaciones geográficas pp. 74-87 (2014).
- MetEd Education and Training, Tormentas locales severas tropicales (MetEd, 2020).
- National Weather Service. (s. f.). Tropical tornadoes in the CAE warning area. Extraído de: https://www.weather.gov/cae/tropicaltornadoes.html?itid=lk_inline_enhanced-template (21 de septiembre de 2024).
- NOAA, 2024: Enhanced Fujita Scale (EF Scale). Extraído de: <http://www.spc.noaa.gov/efscale/> (21 de septiembre de 2024)
- NOAA Office of Oceanic and Atmospheric Research, Atlantic Oceanic and Meteorological Laboratory. (s. f.). ¿Por qué los ciclones tropicales generan tornados y con qué frecuencia ocurren? En Preguntas frecuentes sobre huracanes. Extraído de: <https://www.aoml.noaa.gov/es/hrd-faq/#tc-formation> (21 de septiembre de 2024).
- Organización Mundial Meteorológica (OMM). Extraído de : <https://clouddatlas.wmo.int/es/tornado-intensity.html> (12 de junio de 2024).
- Page, O., 2005: Tornado affects the Mack Pond Area. Available from the Antigua and Barbuda Meteorological Services, http://www.antiguamet.com/Antigua_Met_files/tornado.htm (Comprobado el 13 de diciembre de 2012).
- Piñeres Espitia, G. D. (2010). Acercamiento tecnológico a la aparición de tornados en Barranquilla.
- Poleo, D., Solano, E., & Stoltz, W. (2014-a). La Oscilación atmosférica Madden-Julian (MJO) y las lluvias en Costa Rica. *Meteorol Oceanogr*, 58.
- Poleo, D., Solano, E., & Stoltz, W. (2014-b). La oscilación Madden-Julian y las precipitaciones extremas en Costa Rica. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos, 13(2), 5-18.

- Servicio Meteorológico Nacional. (s. f.). Servicio Meteorológico Nacional, tiempo y clima. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales / Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). México: Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional.
- Silva Dias, M., 2011: An Increase in the Number of Tornado Reports in Brazil, *Wea. Climate Soc.*, **3**, 209–217.
- Simpson, J., Morton, M. C. McCumber, R. S. Penc, 1986: Observations and Mechanisms of GATE Waterspouts. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 753–783.
- Szilagyi, W., 1994: 1994 Waterspout Report. Internal report. Meteorological Service of Canada, Toronto.
- Szilagyi, W., 2004: The great waterspout outbreak of 2003. *Marine Weather Log* 48 (3).
- Szilagyi, W., 2005: Waterspout nomogram instructions. Internal manuscript. Meteorological Service of Canada, Toronto.
- The Tornado and Storm Research Organization (TORRO), 2021. Extraído de: <https://www.torro.org.uk/research/tornadoes/background> (14 de octubre de 2021).
- Valverde Mora, P. (2019). Aplicación en pronósticos de corto plazo de aspectos de variabilidad de la tropósfera baja costarricense basada en datos de radio-sondeos meteorológicos [trabajo final de maestría, Universidad de Costa Rica]. Sistema de Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera.
- Wheeler, M. & Hendon, H. (2004). An all season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Monthly Weather Review*, 132, 1917–22 1932.

Generación de pronósticos retrospectivos de caudal para cuencas hidrográficas en Costa Rica por medio de la técnica de análisis de correlación canónica

CARLOS M. MADRIGAL^{1,2}, ERIC J. ALFARO^{1,3,4}, HUGO G. HIDALGO^{1,3,5}, BERNY G. FALLAS LÓPEZ²

Resumen

Los pronósticos estacionales de caudales son un componente clave de la gestión integrada del recurso hídrico, ya que apoyan la toma de decisiones en generación hidroeléctrica, abastecimiento de agua y planificación productiva. En este estudio se aplicó el Análisis de Correlación Canónica (ACC) mediante la herramienta Climate Predictability Tool (CPT) para generar y evaluar pronósticos retrospectivos de caudal medio mensual en nueve cuencas de Costa Rica durante el período 1991–2019. Como predictores se utilizaron pronósticos retrospectivos de temperatura superficial del mar (TSM) del NMME y como predicantes las simulaciones retrospectivas de caudal del modelo HYPE CR 1.0. La habilidad predictiva se evaluó mediante validación cruzada, considerando distintas condiciones iniciales. Los resultados muestran una fuerte relación entre la variabilidad de la TSM, asociada al ENOS y otros modos oceánicos de gran escala, y el comportamiento estacional de los caudales. Se obtuvo habilidad predictiva estadísticamente significativa para pronósticos mensuales con hasta tres meses de anticipación, en los períodos MJJ, ASO y DJFM, siendo ASO el de mejor desempeño. Asimismo, se identificó que los pronósticos categóricos ofrecen mayor utilidad para los usuarios finales que los pronósticos determinísticos.

PALABRAS CLAVE: PRONÓSTICO ESTACIONAL, TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR, VALIDACIÓN DE PRONÓSTICOS, ANÁLISIS DE CORRELACIÓN CANÓNICA (ACC), AMÉRICA CENTRAL

Abstract

Seasonal streamflow forecasts are a key component of integrated water resources management, as they support decision-making in hydropower generation, water supply, and productive planning. In this study, Canonical Correlation Analysis (CCA) was applied using the Climate Predictability Tool (CPT) to generate and evaluate retrospective monthly mean streamflow forecasts for nine river basins in Costa Rica during the 1991–2019 period. Sea surface temperature (SST) hindcasts from the NMME were used as predictors, while predictands consisted of hindcast streamflow simulations from the HYPE CR 1.0 model. Predictive skill was evaluated using cross-validation, considering different initial conditions. The results show a strong relationship between SST variability, associated with ENSO and other large-scale oceanic modes and the seasonal behavior of streamflow. Statistically significant predictive skill was achieved for monthly forecasts with lead times of up to three months during the MJJ, ASO, and DJFM periods, with ASO exhibiting the highest skill. In addition, categorical forecasts were found to be more useful for end users than deterministic forecasts.

KEYWORDS: SEASONAL FORECAST, SEA SURFACE TEMPERATURE, FORECAST VALIDATION, CANONICAL CORRELATION ANALYSIS (CCA), CENTRAL AMERICA

1. Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
2. Departamento de Hidroclimatología, Instituto Costarricense de Electricidad. San José, Costa Rica.
3. Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
4. Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
5. Centro de Investigación en Matemática Pura y Aplicada (CIMPA), Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

1. INTRODUCCIÓN

Los pronósticos de caudales, en Costa Rica, son dirigidos principalmente al uso del recurso hídrico para la generación eléctrica; sin embargo, la planeación de esta generación conlleva el requerimiento de pronósticos de caudal con varios meses de anticipación, como se hacen en el Foro del Clima de América Central (García-Solera y Ramírez 2012), esto se explicará más adelante.

Los pronósticos estacionales generados con uno y hasta tres meses de anticipación son fundamentales para la planeación de la gestión del recurso hídrico. Estos pronósticos, en gran medida, son posibles debido a la relación que existe entre los distintos patrones climáticos y las temperaturas superficiales del mar (TSM), donde las lentas variaciones de la TSM pueden influenciar en las condiciones atmosféricas a mediano o largo plazo. Según Durán-Quesada et al. (2020), Costa Rica se ve influenciada por variaciones de la TSM desde dos principales escalas temporales, como lo son: i) los modos de variabilidad interanual, por ejemplo, El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus siglas en inglés) y la Oscilación Antártica (AAO, por sus siglas en inglés; Castillo 2021); y ii) los modos de variabilidad decadal o multidecal como Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés; Mantua y Hare 2002) y la Oscilación Multidecal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés; Enfield et al. 2001).

Dado que la correlación entre las condiciones atmosféricas y la TSM se observa principalmente en las tendencias de las variables meteorológicas a largo plazo, es común presentar los pronósticos estacionales de dos formas: como estimaciones de las condiciones promedio de la variable durante períodos de tres meses o en términos de probabilidades, tal y como se hace en el Foro del Clima de América Central.

El pronóstico confiable y realista de caudales desempeña un papel crucial en la hidrología

y la ingeniería de recursos hídricos, ya que puede afectar directamente la operación y el rendimiento de las represas, la gestión de cuencas hidrográficas, suministro de agua potable, manejo efectivo de los sistemas de alerta temprana, entre otros (Cassagnole et al., 2021). Sin embargo, lograr pronósticos precisos de caudales constituye un desafío considerable, dada la alta incertidumbre inherente a las condiciones climáticas y la complejidad asociada con la recopilación y manejo de datos hidroclimáticos (Enfield et al. 2001). A medida que las escalas de tiempo aumentan, los patrones estadísticos comienzan a predominar en los procesos geofísicos e hidrológicos, como las descargas de caudales y la precipitación, por lo que los modelos estadísticos se vuelven lo suficientemente precisos para poder realizar estos pronósticos (Tyralis et al., 2021).

En la región centroamericana se llevan a cabo los Foros del Clima de América Central (FCAC), los cuales son un espacio donde los climatólogos de los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos (SMHN) de la región definen las predicciones climáticas de precipitación generadas por los países participantes (García-Solera y Ramírez 2012; Alfaro et al. 2016a; Maldonado et al. 2013; 2018). Como parte de los productos del FCAC, se realizan pronósticos de precipitación utilizando la CPT (Climate Predictability Tool, por sus siglas en inglés; software disponible en: <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/tools/cpt/>), de manera que este pronóstico sirve como insumo para la elaboración del pronóstico de caudal en cuencas regionales generado por el Foro Hidrológico de América Central o FHAC, (ver por ejemplo CRRH 2022). Estos pronósticos tienen como objetivo generar las Perspectivas Hidrológicas para América Central disponible en: <https://recursoshidricos.org/perspectiva-hidrológica-1>. Estas perspectivas son válidas para los períodos de mayo-junio-julio (MJJ), agosto-setiembre-octubre (ASO) y diciembre-enero-febrero-marzo (DEFM) y para los cuales se

realizan pronósticos mensuales de caudal para las cuencas de interés de cada país participante en el Foro, por medio del modelado de lluvia-escorrentía y utilizando el modelo hidrológico HBV-light (Bergström 1992; 1995). Para el caso de Costa Rica, las cuencas de interés son: Arenal, Cachí, Pirrís, Toro y Ventanas. Los resultados obtenidos se basan en el punto de control de la cuenca y son verificados en la sesión del Foro posterior al periodo pronosticado, y se realiza por medio del análisis de porcentaje de error entre los pronósticos y las observaciones de caudal en cada una de las cuencas de interés para el FHAC.

Es por lo anterior, que este trabajo consiste en la generación de pronósticos retrospectivos de caudal para nueve cuencas hidrográficas de Costa Rica. El estudio propone realizar simulaciones retrospectivas de caudal por medio de la técnica de ACC, utilizando la TSM como predictor y datos de caudal simulados como predictante. De esta manera se busca validar el modelo de ACC a través de la técnica estadística de validación cruzada para posteriormente verificar y analizar los resultados obtenidos, esto con la finalidad de proponer una metodología operativa para la elaboración de pronósticos de caudal mensual a escala estacional (con una anticipación de tres meses) en Costa Rica.

Como se mencionó anteriormente, uno de los insumos utilizados por el FCAC, son los pronósticos de precipitación usando la CPT, con la técnica estadística de Análisis de Correlación Canónica (ACC), la cual es una técnica de análisis multivariado que permite relacionar dos campos, en este caso, de variables climáticas para así generar pronósticos (Wilks, 2019). En la región centroamericana se han realizado múltiples estudios de predicción del campo de precipitación por medio de su relación con la Temperatura Superficial del Mar o TSM (Alfaro 2007a; Maldonado y Alfaro 2010; 2011; Fallas López y Alfaro 2012; Maldonado et al. 2013; 2016; 2018; Alfaro et al. 2016b; 2018) logrando captar

con buena habilidad predictiva, la variabilidad de un conjunto de variables independientes o predictores con un campo de una variable dependiente o predicante. El ACC también fue usado para la predicción de la temperatura superficial del aire, máxima, mínima y media en la región (Alfaro 2007b; Fallas López y Alfaro 2014). A pesar de los antecedentes antes mencionados, hasta la fecha no se ha llevado a cabo en la región de América Central una propuesta semejante que permita realizar de manera directa de pronósticos de caudal.

Por lo anterior, este estudio surge como una metodología para la generación y validación de los pronósticos de caudal mensuales a escala estacional enfocado en cuencas de Costa Rica, los cuales pueden ser elaborados por los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos. Esto con la finalidad de entregar al usuario final un resultado que le brinde mayor y mejor información para la toma decisiones en el marco de la gestión del recurso hídrico.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

2.1. Cuencas hidrográficas en Costa Rica

En Costa Rica el sistema hidrográfico divide al país en 34 cuencas principales que drenan en tres vertientes: el corredor biológico del río San Juan al norte de país, el mar Caribe al este y el océano Pacífico al oeste (Rojas, 2011).

Para este estudio se analizarán las cuencas de los ríos Reventazón, Grande de Tárcoles, Tempisque y Grande de Téraba y las subcuenca de los ríos Arenal, Cachí, Pirrís, Toro y Ventanas las cuales son las seleccionadas en el FHAC y de gran importancia para la generación hidroeléctrica en Costa Rica (Figura 1). Los detalles específicos de las dimensiones y características de las cuencas se pueden consultar en (Madrigal, 2023).

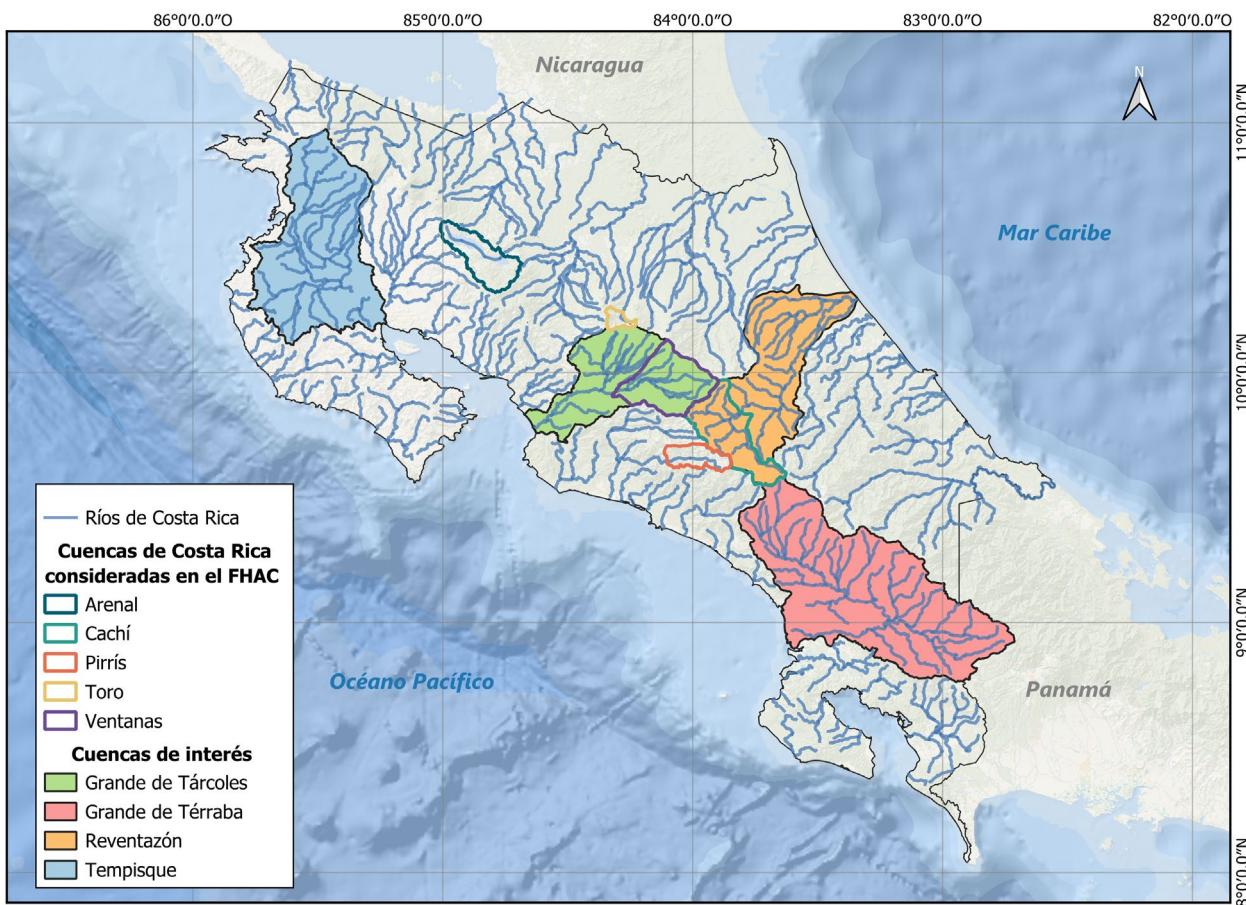


Figura 1. Cuencas hidrográficas (de norte a sur) de los ríos Tempisque Grande de Tárcoles, Reventazón, y Grande de Téraba. Las subcuencas (de norte a sur) de los ríos Arenal, Toro, Ventanas, Cachí y Pirrís utilizadas en el FHAC en contornos rojos. Contornos de los ríos y las cuencas de Costa Rica tomados de Arciniega-Esparza y Birkel (2020). Fuente: elaboración propia.

2.2. Predictor

En este estudio se utilizó el pronóstico de la TSM del Ensamble de Multi-modelos norteamericano (The North-American Multimodel Ensemble o NMME, por sus siglas en inglés) como campo predictor. Los datos se encuentran disponibles en: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/NMME/data.html>, el cual es una colaboración de varios centros de modelación climática que integra ocho distintos modelos, brindando un ensamble con mayor habilidad de pronóstico del tiempo y del clima, reduciendo así la incertidumbre de la predicción. Los modelos considerados en el NMME son: el CFSv2, dos versiones de los modelos canadienses CanCM4i (CMC1) y GEM-NEMO (CMC2), el

Geophysical Fluid Dynamic (GFDL; GFDL-FLOR) de NOAA, el NASA-GEO5v2 de National Aeronautics y Space Administration (NASA, por sus siglas en inglés), el NCAR-CCSM4 del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCAR, por sus siglas en inglés) y la media del conjunto de todos los modelos. La descripción detallada de cada uno de los modelos y sus acrónimos, se encuentra en Kirtman et al. (2014).

Para la generación de los pronósticos se utilizó el pronóstico retrospectivo (o hindcast, por su traducción al inglés) mensual del NMME para el período 1991-2020, específicamente para la región comprendida por 63°N a -10°S y 160°E a 15°W (Figura 2) similar a la de Maldonado et al.

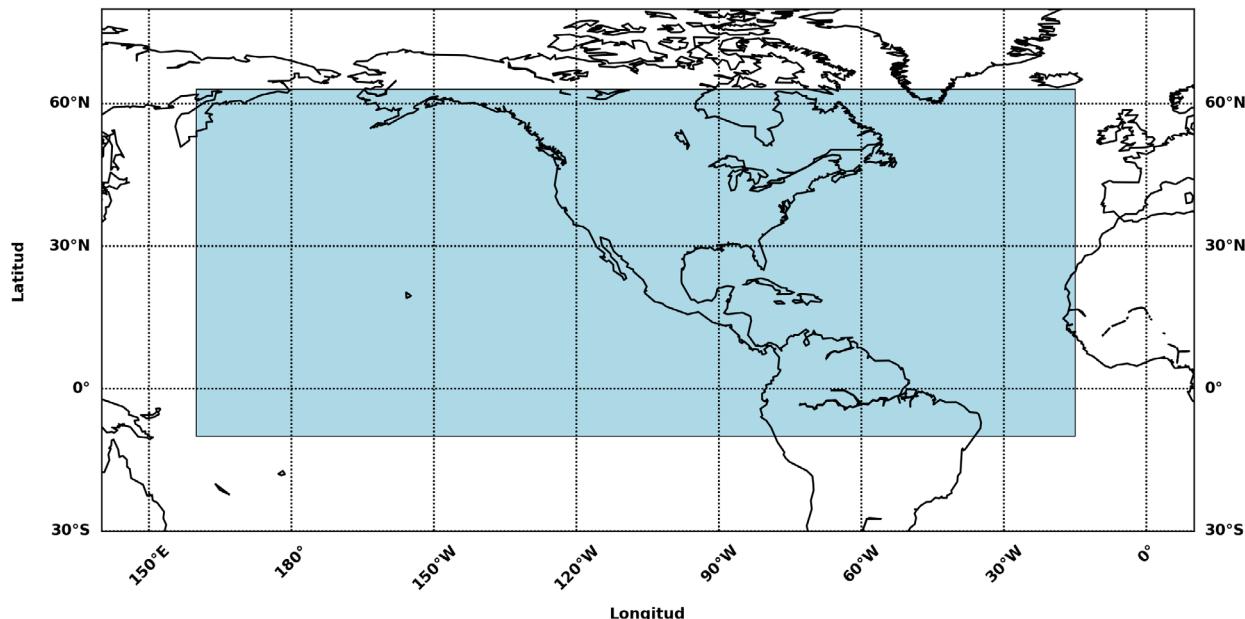


Figura 2. Región de análisis de la Temperatura Superficial del Mar, comprendida por 63°N-10°S y 160°E-15°W. Fuente: elaboración propia.

(2013), ya que esta área cubre la mayoría del Océano Pacífico Nor-Tropical Oriental, todo el Mar Caribe y parte del Océano Atlántico Nor-Tropical. Esta región se tomó en cuenta debido a que capta la señal de los modos de variabilidad oceánica como ENOS, PDO, ATN y la AMO, tal y como lo han mostrado Maldonado et al. (2013) y Fallas López y Alfaro (2012).

2.3. Predictante

Se utilizó como predictante, o variable dependiente, los datos de caudal mensual obtenidos de las simulaciones hidrológicas de Costa Rica desde 1985 hasta 2019 usando el modelo HYPE CR 1.0 de Arciniega-Esparza y Birkel (2020; disponible en <https://zenodo.org/record/4029572#.YXs79y973T9>). Este conjunto de datos cuenta con simulaciones de las 605 subcuencas hidrográficas del país, y se realizó con el fin de evaluar los recursos hídricos de Costa Rica a escala nacional, donde se utilizó topografía global, suelo, uso de tierra y productos climáticos para la calibración y evaluación del modelo

HYPE, los detalles completos del modelo están disponibles en Arciniega-Esparza y Birkel (2020). Como forzante del modelo se utilizaron datos de temperatura corregidos de NASA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y precipitación obtenida de CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data, Funk et al. 2015) y para la calibración se utilizó el caudal diario de 13 estaciones para el periodo 1990-2003 (detalladas en Arciniega-Esparza y Birkel., 2020) mientras que la evaporación potencial (PET) y la evapotranspiración real (AET) mensual se obtuvieron de MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, Mu et al., 2011) para el periodo 2000-2014.

Los resultados de Arciniega-Esparza y Birkel (2020) se encuentran disponibles en la App del Observatorio del Agua y Cambio Global (OACG, App Hidrología de Costa Rica, disponible en: <https://oacg-hydrology-costarica.herokuapp.com>) de la Escuela de Geografía en la Universidad de Costa Rica. La variable seleccionada para este estudio fue el caudal total mensual, disponible en mm. Estos caudales se convirtieron a m^3/s ,

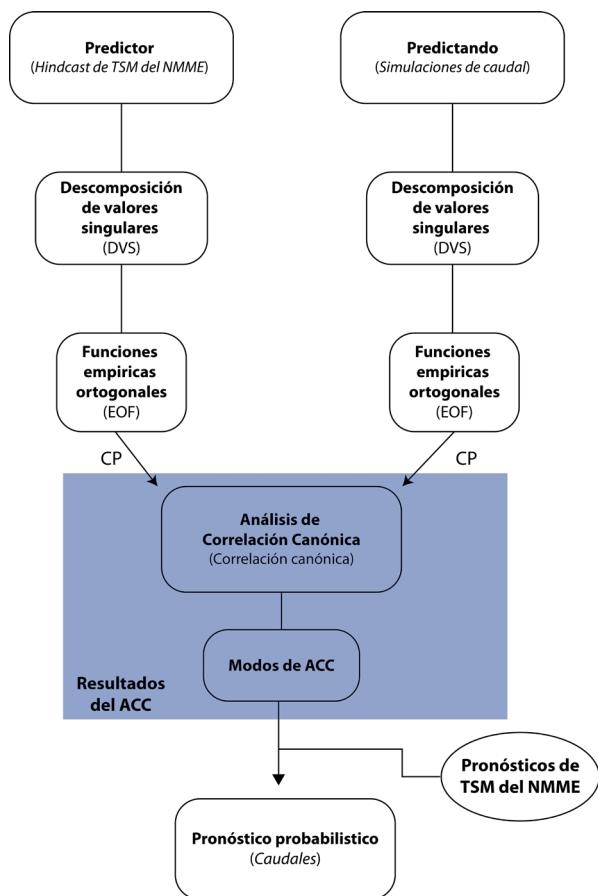


Figura 3. Diagrama de flujo de los procesos del modelo de Análisis de Correlación Canónica utilizando la TSM como predictor, los caudales simulados como predicción del modelo; y, el pronóstico de TSM como predictor para el pronóstico de los caudales una vez ajustado el modelo. Fuente: elaboración propia.

multiplicándolos por el área de cada cuenca, según el valor reportado en la App, y divididos por el tiempo (cantidad de segundos en cada mes).

2.4. Análisis de Correlación Canónica

El Análisis de Correlación Canónica (ACC) es un método estadístico de análisis multivariado (Soley y Alfaro 1999; Navarra y Simoncini 2010; Wilks 2019; DelSole y Tippett 2022) y permite identificar combinaciones lineales de variables de un campo fuertemente relacionado con combinaciones lineales de otro campo. El detalle

de la metodología que sigue el ACC puede ser consultado en Madrigal (2023) y el diagrama de flujo utilizado en este trabajo se presenta en la figura 3.

2.5. Pronósticos basados en el análisis de correlación canónica (ACC)

En este estudio, se empleó CPT para generar pronósticos retrospectivos de caudal mediante ACC. Esta técnica permitió identificar las combinaciones lineales entre la TSM (X) y los caudales simulados para el periodo 1985-2019 (Y), y así poder elaborar pronósticos retrospectivos. Esto permitió elaborar un modelo de tipo $Y_t = b^T \cdot X$, donde los elementos de b^T son los coeficientes de regresión mínimos cuadrados ordinarios calculados por medio del ACC y Y_t es el valor pronosticado de Y .

El ACC se integró en un esquema de pronósticos estadísticos tipo MOS, combinando pronósticos dinámicos con métodos estadísticos (Wilks, 2019). De esta manera se utilizará el pronóstico de TSM del NMME para un mes, tomando como condiciones iniciales los meses $t-1$, $t-2$ y $t-3$, para pronosticar el caudal en el mes t . Es decir, los pronósticos de caudal tuvieron un *lead time* o periodo de antelación para los pronósticos de TSM de 1, 2 y 3 meses para las condiciones iniciales $t-1$, $t-2$ y $t-3$, respectivamente.

Debido a que las series de TSM (desde 1991 hasta 2020) y caudales (desde 1985 hasta 2019), no abarcan los mismos años, los pronósticos retrospectivos cubren el periodo común entre las series, es decir, desde 1991 hasta 2019, tal y como se ilustra en la figura 4.

Los pronósticos retrospectivos generados son a escala mensual pero agrupados y analizados para estaciones climáticas utilizadas por el FHAC, es decir, DEF, MJ, y ASO. Estos pronósticos se generaron para las cuencas descritas en la figura 1.

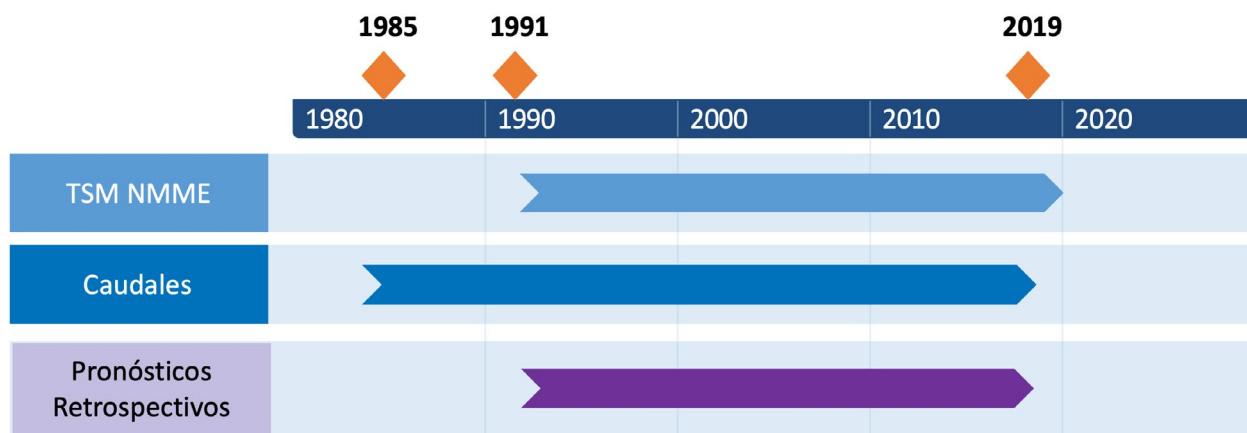


Figura 4. Periodos de disponibilidad de los datos del predictor, predictante y períodos de los caudales pronosticados.
Fuente: elaboración propia.

Para la validación de los resultados obtenidos se utilizó la técnica de validación cruzada, la cual según explica Wilks (2019) permite evaluar las ecuaciones de ACC utilizadas para los pronósticos. El procedimiento que se utilizará es la validación cruzada de *dejando-uno-fuera* (o leave-one-out, en inglés; ilustrado en el Cuadro 1).

La herramienta CPT permite elaborar los pronósticos basados en probabilidades, por lo que los resultados retrospectivos fueron: *i) pronósticos determinísticos*, es decir, el valor de la variable

pronosticada, para el caso del caudal este expresa sus valores en m^3/s , y *ii) pronósticos categóricos*, los cuales, al usar tres categorías, generan la probabilidad de ocurrencia de las categorías bajo lo normal (BN), normal (N) y arriba de lo normal (AN) y expresados en porcentaje. Por defecto, la CPT establece estas probabilidades en 33% para que los límites entre las categorías sean los terciles de la distribución climatológica, es decir, utiliza los percentiles 33 y 67 (Mason et al., 2020). Es por lo anterior que para este estudio se supone una distribución de probabilidad normal para las

Cuadro 1 Descripción del procedimiento dejando-uno-fuera usada para la generación de los pronósticos retrospectivos desde 1991 hasta 2019.

1991	Pronosticado 1991	Período de entrenamiento		
1992	Período de entrenamiento	Pronosticado 1992	Período de entrenamiento	
1993	Período de entrenamiento		Pronosticado 1993	Período de entrenamiento
1994	Período de entrenamiento		Pronosticado 1994	Período de entrenamiento
...	Período de entrenamiento			Período de verificación
2019	Período de entrenamiento			Pronosticado 2019

Fuente: Adaptado de Mason y Baddour (2008).

series de caudal. En este trabajo, se presentarán los resultados asociados con los pronósticos categóricos. Los resultados de los pronósticos determinísticos pueden ser consultados en Madrigal (2023).

Para dos casos específicos, Feb-3 y Dic-1, (de acuerdo con lo explicado anteriormente, corresponden al pronóstico de febrero con condiciones iniciales de 3 meses de anterioridad y diciembre con un mes de anterioridad, respectivamente), los pronósticos no fueron tomados en cuenta debido a que presentaron errores en los datos de entrada y estos no generaron resultados válidos. Es por esto que se trabajó con 252 pronósticos de los 270 realizados, los que se dividen en 10 meses, tres condiciones iniciales y 9 cuencas.

Para evaluar los pronósticos categóricos se usó una metodología similar a la utilizada por Alfaro et al. (2016a), donde se usaron estadísticos basados en el análisis de tablas de contingencia 3x3, para las categorías BN, N y AN, para los pronósticos y simulaciones de caudal, siguiendo la metodología de Alfaro et al. (2004).

Los gráficos ROC o características operativas relativas (Relative Operating Characteristics, por su traducción en inglés) el cual es sugerido por Mason (2013) para la validación de pronósticos y explicado por Wilks (2019) y Mason et al. (2020). Este método se basa en la relación entre los aciertos y las falsas alarmas de un pronóstico, y se estima mediante el área bajo la curva ROC. Un pronóstico sin habilidad predictiva se representa por una línea diagonal ($ROC = 0.5$), mientras que valores comprendidos entre 0.5 y 1.0 indican capacidad de discriminación, siendo mejor el desempeño cuanto más se acerque la curva a la esquina superior izquierda del diagrama. Los detalles de este estadístico, así como las razones que motivaron su selección, se describen en Madrigal (2023). La herramienta CPT cuenta con una visualización de estos resultados en formato

de gráfico de ROC, área del ROC y mapas de habilidad, donde estos ROC se calculan utilizando predicciones para todos los puntos, estaciones o series de la cuadrícula.

Basado en lo anterior se usaron dos de los estadísticos o puntajes de habilidad generados por la CPT para evaluar los pronósticos, los cuales según Mason et al. (2020) se definen como:

Área de ROC (*bajo lo normal*): el área debajo de la curva de ROC para los pronósticos de la categoría por debajo de lo normal, y da la proporción de veces que las condiciones por debajo de lo normal se pueden distinguir con éxito de las otras categorías.

Área ROC (*arriba de lo normal*): Igual que el ROC bajo lo normal, pero para los escenarios arriba de lo normal.

Los estadísticos usados para evaluar los pronósticos categóricos son mostrados por medio de un mapa de calor que permite interpretar la variación de estos para cada uno de los meses, sus tres respectivas condiciones iniciales y su variación a través de las diferentes cuencas.

Además, se muestran diagramas de cajas para cada estadístico, agrupados por cuenca, considerando únicamente sus condiciones iniciales. Las cajas capturan la mediana (Q_2), los rangos intercuantil (RIC) entre el percentil 25 (Q_1) y el 75 (Q_3). Los bigotes muestran los valores mínimos ($Q_1 - 1.5 * RIC$) y máximos ($Q_3 + 1.5 * RIC$) no atípicos, y los valores atípicos son expresados por puntos, si los hay. Estas cajas permiten ilustrar la dispersión en los resultados de estos estadísticos y su evolución según la cuenca, el mes pronosticado y la condición inicial utilizada.

Finalmente se muestran los resultados para los cuales la validación cruzada tiene una significancia estadística mayor al 95%, es decir $valores\ p \leq 0.5$. Otros estadísticos de evaluación de los pronósticos

como la *Correlación de Pearson*, *Puntuación de éxito o Hit Score* y *Puntuación de Gerrity*, pueden ser consultados en Madrigal (2023).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 5 muestra el régimen mensual de los caudales totales mensuales simulados para las cuencas de interés. Estos caudales simulados promediados mensualmente, se encuentran ordenados de manera temporal de diciembre a noviembre para una mejor comparación entre los meses de las estaciones que se estudiarán, i.e DEFM, MJJ y ASO. Se observa cómo el caudal responde con el régimen de precipitación, con un aumento en los caudales según el aumento de las lluvias a lo largo del año y con una distribución bimodal, en respuesta a la disminución de las lluvias producto del veranillo entre los meses de julio y agosto para las cuencas ubicadas en la

vertiente del Pacífico (Alfaro 2014; Maldonado et al. 2016; García-Franco et al. 2023). Las cuencas ubicadas en la vertiente del Caribe responden a un régimen típico de esta vertiente, detallados en (Alfaro Martínez et al., 2024) Esta figura permite tener una mejor comprensión de los caudales promedios para cada mes con la finalidad de conocer cuál es el comportamiento de estos y usarlo como referencia para el análisis de los resultados. En adelante se referirá a las series de tiempo de estos caudales como *series observadas*. Aunque estas series son simuladas, se utilizarán como referencia para comparar con las series generadas por los pronósticos retrospectivos. La técnica de validación cruzada genera un pronóstico para cada mes de interés y para los años considerados en el periodo de entrenamiento, desde 1991 hasta 2019.

En la figura 6 se muestra, a manera de ejemplo, la comparación de los valores de caudal *observados*

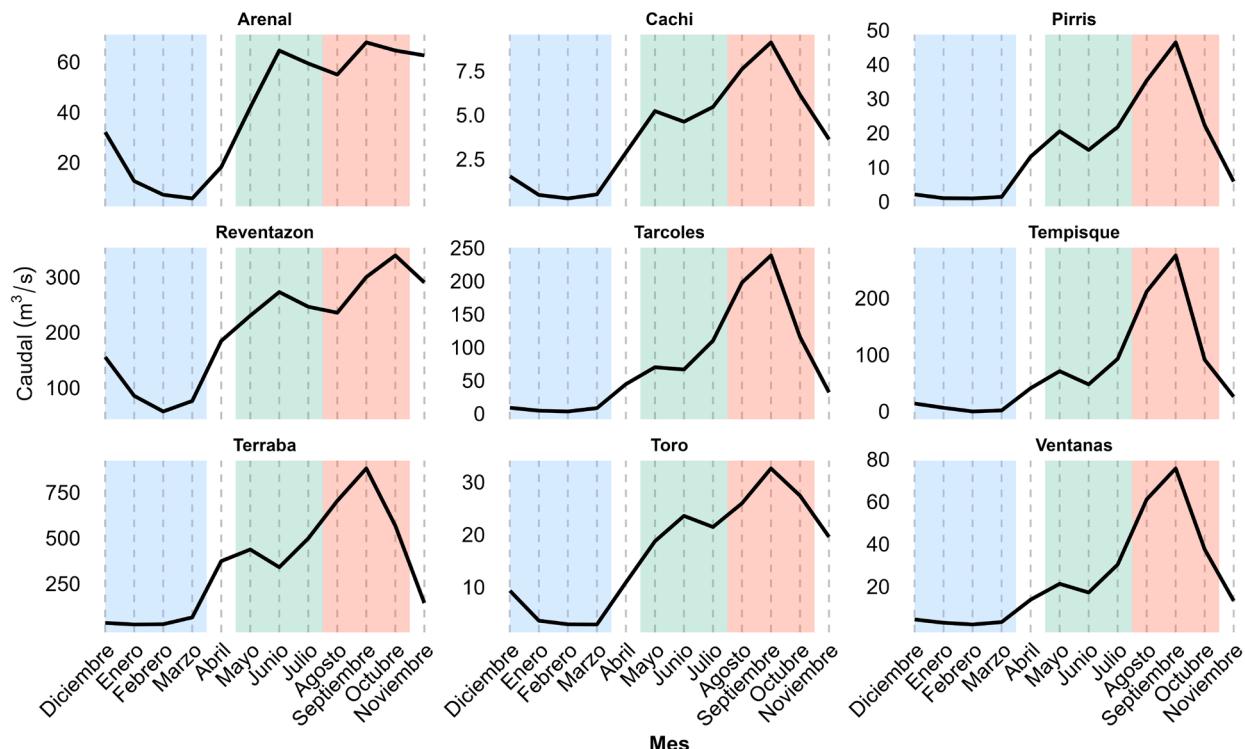


Figura 5. Régimen mensual de los caudales m^3/s para las cuencas de interés, según las simulaciones de caudal histórico para Costa Rica por Arciniega-Esparza y Birkel (2020). En azul la estación DEFM, en verde MJJ y en rojo ASO. Fuente: elaboración propia.

(rojo) respecto los valores pronosticados (verde) por medio de la herramienta CPT. Estos pronósticos son evaluados utilizando los estadísticos que comparan ambas series, tal y como se describió con anterioridad a partir de la elaboración de una tabla de contingencia, las cuales resumen los porcentajes de veces que cada una de las tres categorías verificó dada la categoría de pronóstico (Mason et al., 2020). Derivado de este cuadro de contingencias se pueden calcular diferentes estadísticos para evaluar dichos pronósticos, estos estadísticos son proporcionados por la

herramienta CPT (Cuadro 2). El cuadro 2 muestra la tabla de contingencia de Ago-1. La selección de este pronóstico se realizó sin un criterio particular, únicamente con fines ilustrativos

3.1. Evaluación pronósticos DEFM

La CPT genera las curvas ROC como las de la figura 7, para los escenarios AN y BN, así como las áreas bajo estas curvas, las cuales serán las utilizadas para evaluar los pronósticos categóricos.

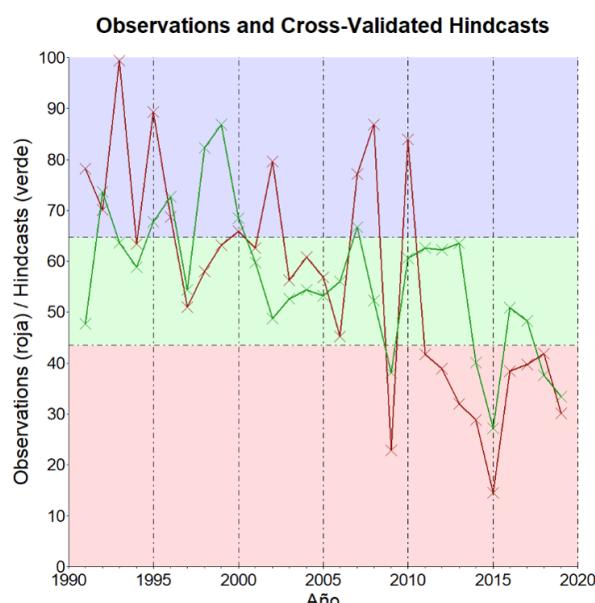


Figura 6. Comparación de los valores de caudal observados (rojos) respecto a los pronosticados (verde) para el mes de agosto en la cuenca del río Tárcoles con condiciones iniciales de la TSM para julio (Ago-1, pronóstico de agosto con condiciones iniciales de un mes antes).

Cuadro 2. Ejemplo de una tabla de contingencia de frecuencias absolutas para el pronóstico de agosto con condiciones iniciales de julio (Ago-1) para la cuenca de Tárcoles obtenidos de la CPT.

		Pronósticos			
		BN	N	AN	Total
Observaciones	AN	0 (0)	5 (36)	5 (63)	10 (34)
	N	0 (0)	6 (43)	3 (38)	9 (31)
	BN	7 (100)	3 (21)	0 (0)	10 (34)
	Total	7 (24)	14 (48)	8 (28)	29 (100)

Entre paréntesis se muestran las frecuencias relativas (%). Las categorías son bajo lo normal (BN), normal (N), arriba de lo normal (AN). Los límites entre las categorías son los percentiles 0.33 y 0.67.

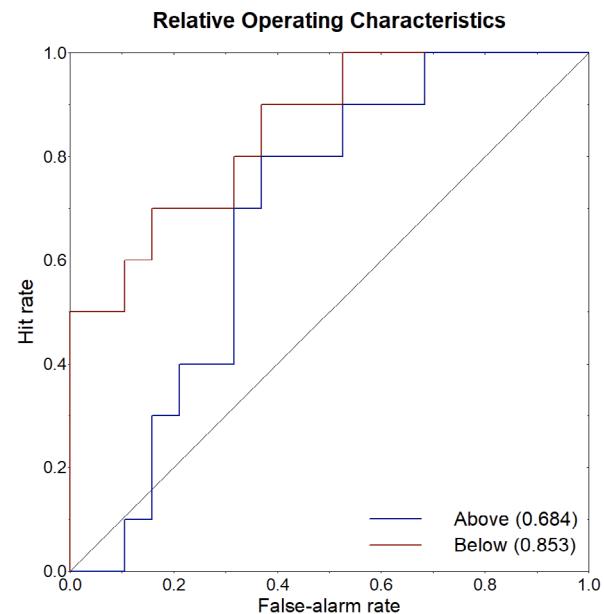


Figura 7. Ejemplo de las curvas de ROC generadas por la CPT. En rojo (azul) se muestra la curva ROC para escenarios bajo (sobre) lo normal para el pronóstico categórico de Tárcoles para el mes de agosto con condiciones iniciales de julio (Ago-1).

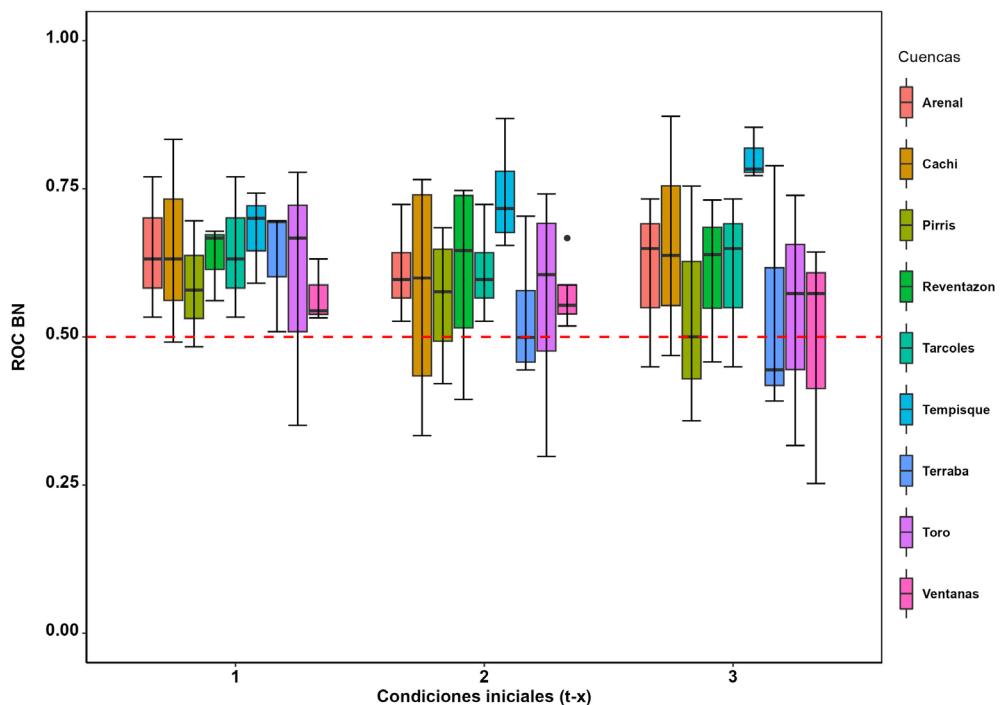
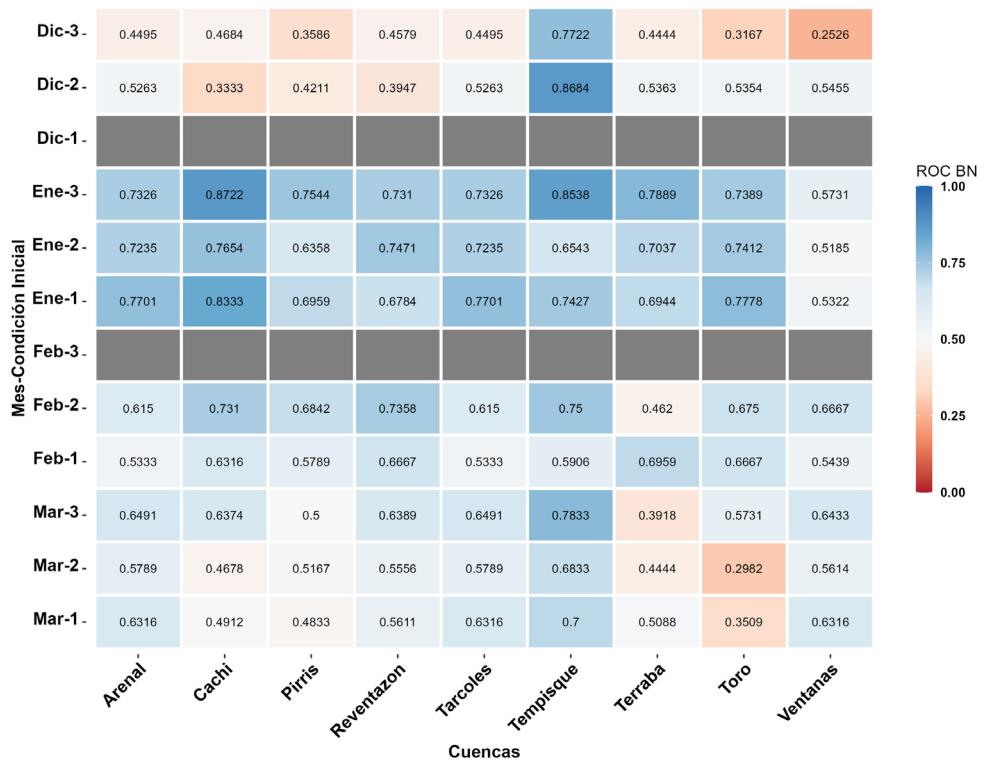


Figura 8. (a) Área bajo la curva ROC de escenarios bajo lo normal (ROC BN) entre las series observadas y pronosticadas para la estación DEFM, de cada una de las cuencas y para las tres condiciones iniciales de cada mes pronosticado. En negrita se muestran los resultados con valores > 0.5 . En gris se muestran los pronósticos descartados. (b) Diagrama de cajas para el área bajo la curva ROC de escenarios bajo lo normal (ROC BN) entre las series observadas y las pronosticadas con condiciones iniciales $t-1$, $t-2$, $t-3$. Para cada condición inicial, se ha agrupado todos los pronósticos para cada una de las cuencas. La línea punteada roja indica el valor de $ROC = 0.5$.

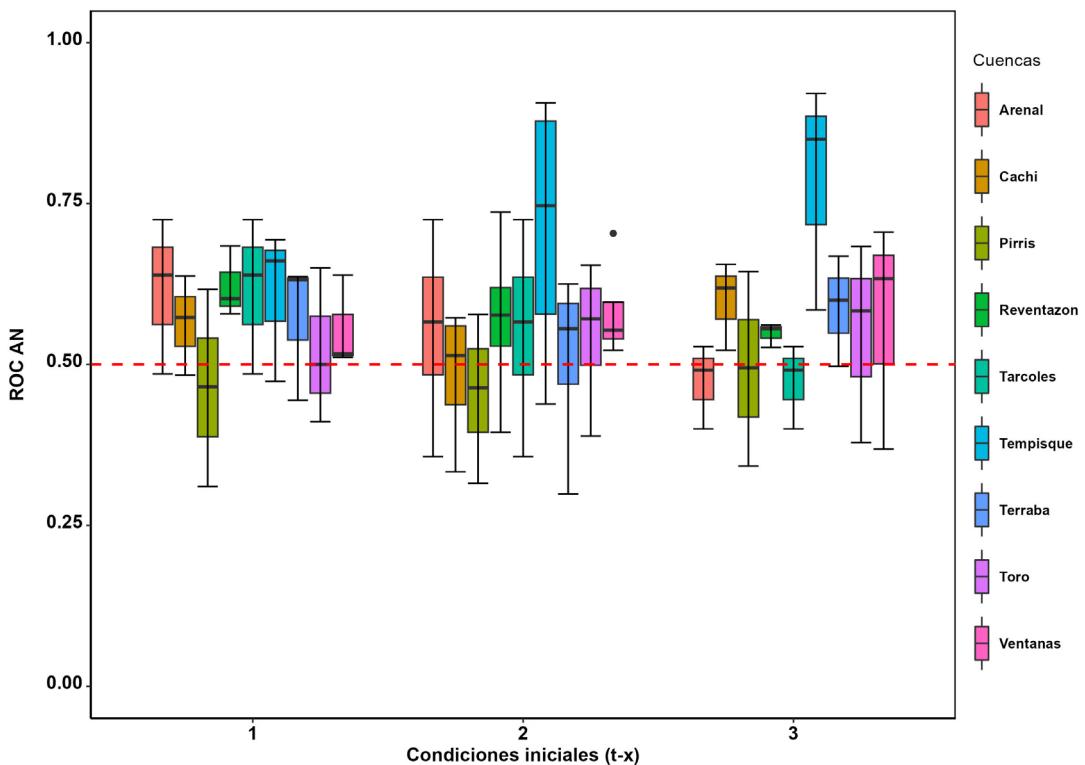
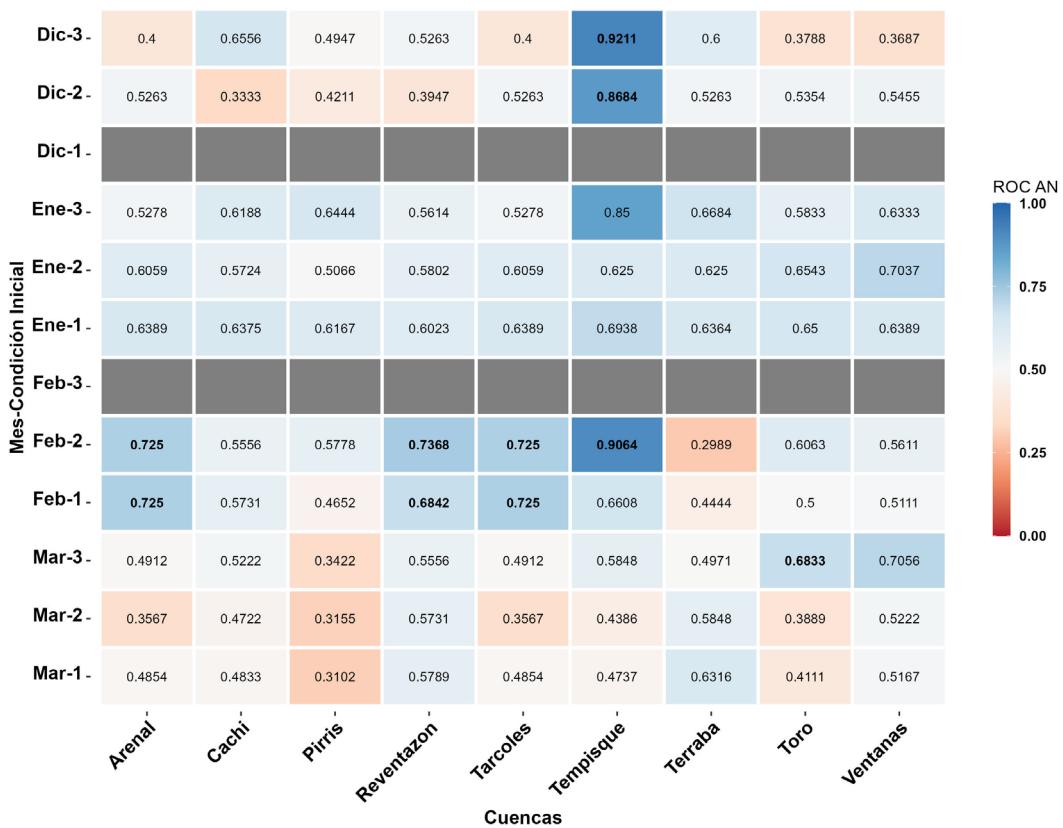


Figura 9. Lo mismo que la Figura 8, pero el área bajo la curva ROC de escenarios arriba de lo normal (ROC AN) para el pronóstico probabilístico de caudal para la estación DEFM. La línea punteada roja indica el valor de ROC = 0.5.

Para la estación DEF M (ver figura 8) hay una marcada habilidad para los pronósticos de enero, donde todos son positivos y mayores a 0.5 de área bajo la curva. Para DEF M, 72 de los 90 pronósticos, es decir el 80%, tuvieron valores de área ROC mayores a 0.5. Al analizar la evolución del ROC BN en función de las condiciones iniciales, no se muestran tendencias que indiquen una mejora en la habilidad de los pronósticos categóricos, por el contrario, en el caso de Térraba, se observa una disminución en las áreas de ROC BN.

La habilidad de pronosticar la categoría AN es menor en términos generales, que para los escenarios BN, para las distintas cuencas. Para la categoría AN, el 68.8% de los pronósticos tuvieron valores mayores a 0.5 de ROC AN. Lo anterior se observa en figura 9. En el caso del ROC AN, destacan valores cercanos a 1 para la cuenca de Tempisque, es decir, una habilidad casi perfecta para pronosticar la categoría AN. Estos valores se obtuvieron para los pronósticos Dic-3 (ROC AN = 0.9211) y Feb-2 (ROC AN = 0.9064). Esta cuenca destaca como la que tiene valores de ROC BN y AN más altos para la estación DEF M, las demás cuencas tienen variaciones que dependen del mes pronosticado y la condición inicial (más detalles en Madrigal (2023)).

3.2. Evaluación pronósticos de MJJ

El ROC BN (Figura 10), fue mayormente significativo para los pronósticos de junio y julio, donde el valor del estadístico ROC BN obtuvo valores un valor máximo de 0.8316, recordando que ROC BN igual a 1 implicaría un pronóstico perfecto. Sin embargo, como lo muestra la figura 10, la cuenca de Reventazón tuvo una habilidad igual o menor a la de pronosticar con la climatología ($ROC BN \leq 0.5$), para todos sus pronósticos. En total, el 77% de los pronósticos tuvieron valores de ROC BN mayores a 0.5, indicando una habilidad predictiva importante para MJJ. En este caso, todos los pronósticos

para Cachí, Pirrís, Tempisque y Ventanas tuvieron valores mayores a 0.5 de este estadístico. Para Toro, sólo un pronóstico de MJJ no fue mayor a este umbral que determina habilidad predictiva mayor que pronosticar al azar.

La habilidad de los pronósticos para la categoría AN, mostrados en la figura 11, fue menor que para el escenario BN, el 72.8% de los pronósticos tuvieron valores iguales o menores a 0.5 de ROC AN. Para MJJ, junio fue el mes con más cantidad de pronósticos significativos, seguido por mayo y luego julio. En este caso fueron las cuencas de Pirrís, Toro y Ventanas, para las cuales todos los pronósticos superaron el valor de 0.5 del área bajo la curva. Observando la figura 10, no hay señales de aumento del valor del estadístico en función de la condición inicial utilizada.

3.3. Evaluación pronósticos de ASO

Para los pronósticos mensuales de la estación ASO se obtuvo una alta habilidad predictiva el ROC BN (ver Figura 12), donde sólo el pronóstico de Ago-2 para Térraba tiene un valor menor al 0.5. Incluso se obtuvieron valores de ROC BN mayores a 0.80, indicando una buena habilidad para pronosticar los escenarios BN. Sin embargo, no se muestran diferencias significativas para los valores del estadístico en función de las condiciones iniciales utilizadas para pronosticar, tal y como se muestra en la 11b.

La habilidad para pronosticar los escenarios AN por medio del ROC AN (ver Figura 13), tuvo una significancia tan alta como la de ROC BN, incluso no se encontró ningún valor menor a 0.5. A pesar de lo anterior, los pronósticos no coincidieron en valores altos de ROC para AN y BN, lo que indica que un pronóstico no necesariamente tuvo la misma habilidad para ambos escenarios. En términos generales ASO obtuvo valores de ROC BN y AN mayores que los obtenidos mensualmente para las estaciones de MJJ y DEF M.

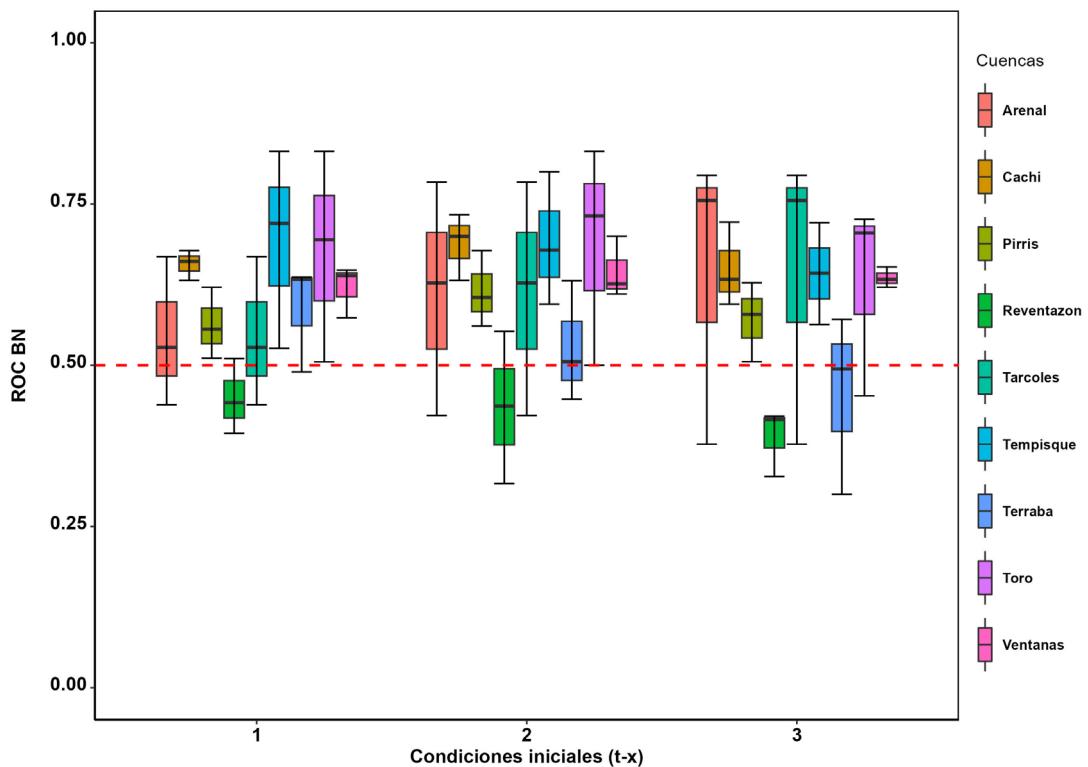
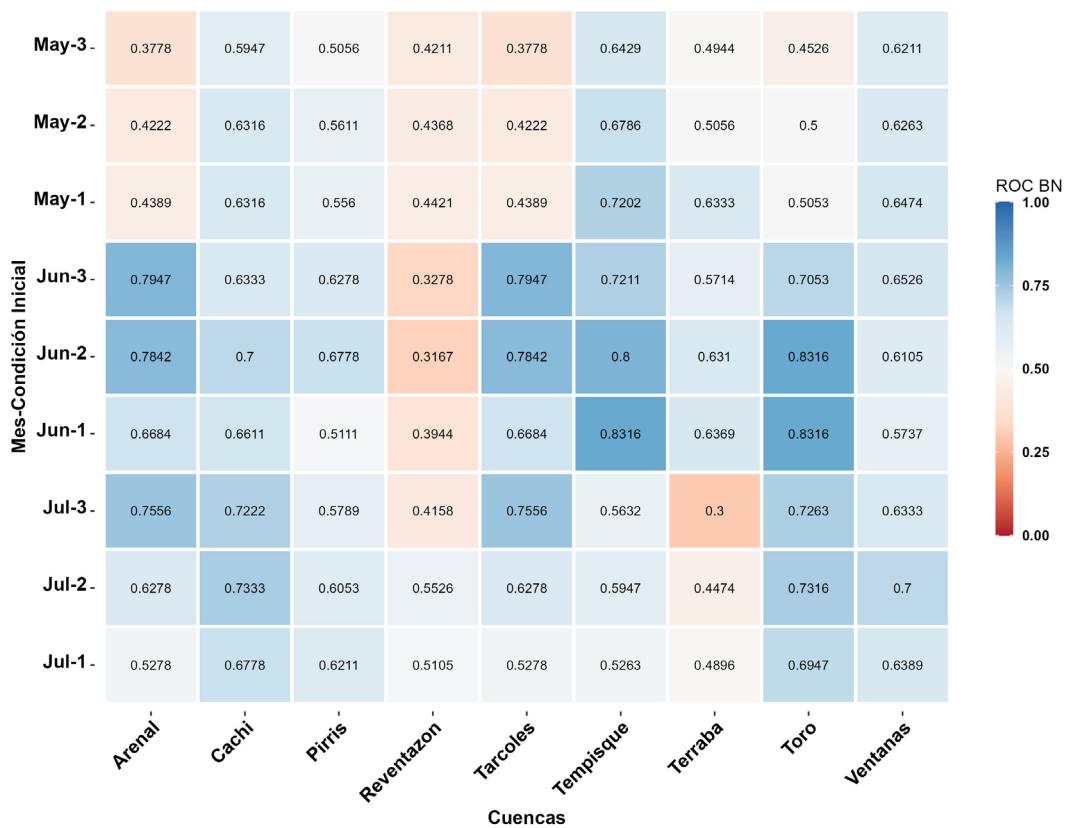


Figura 10. Lo mismo que la Figura 8, pero el área bajo la curva ROC de escenarios bajo lo normal (ROC BN) para el pronóstico probabilístico de caudal para la estación MJJ. La línea punteada roja indica el valor de ROC = 0.5.

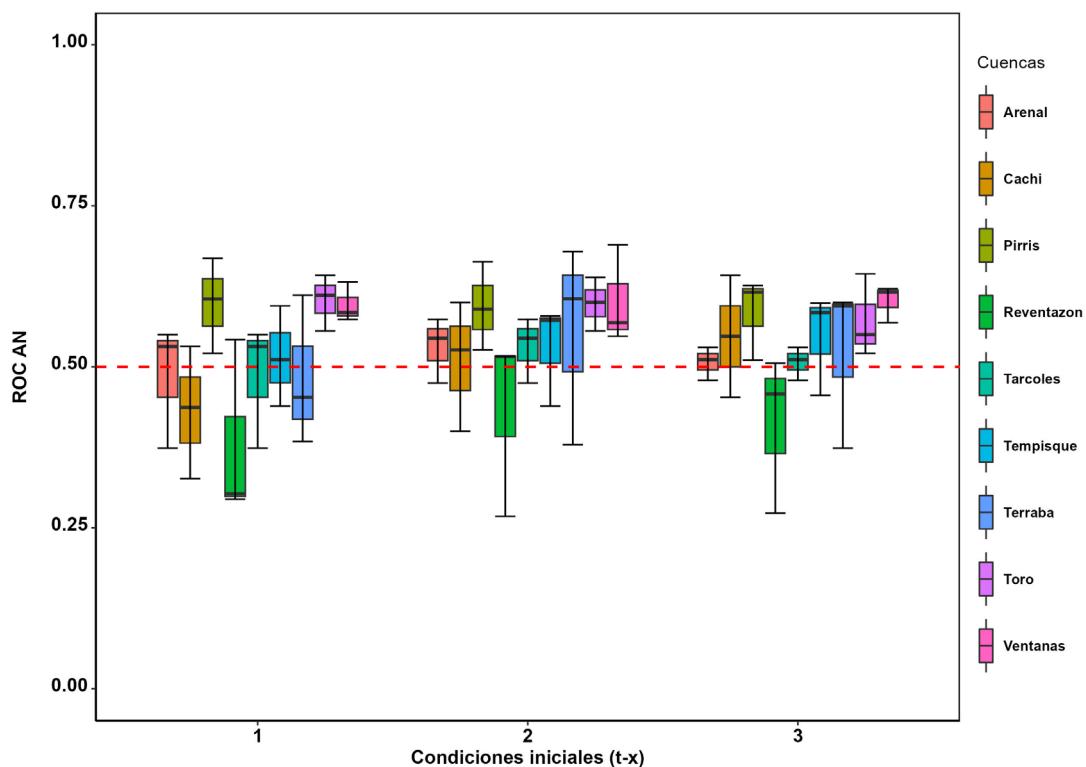
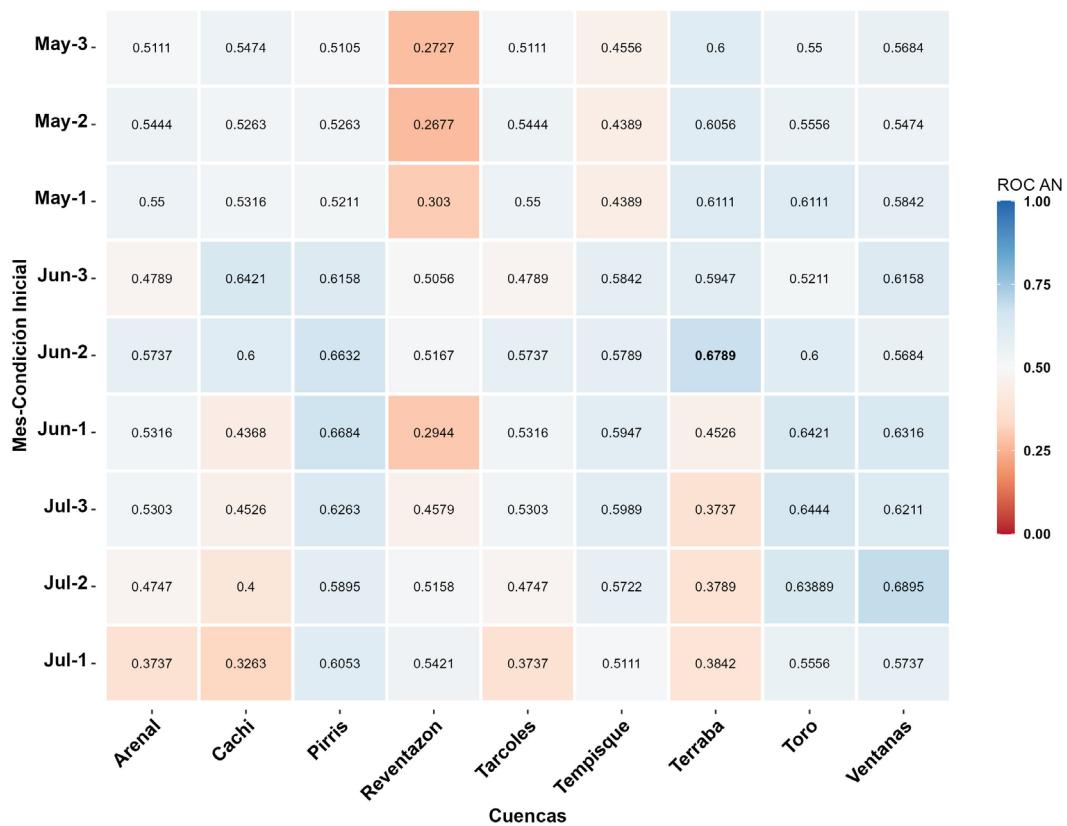


Figura 11. Lo mismo que la Figura 8, pero el área bajo la curva ROC de escenarios arriba de lo normal (ROC AN) para el pronóstico probabilístico de caudal para la estación MJJ. La línea punteada roja indica el valor de ROC = 0.5.

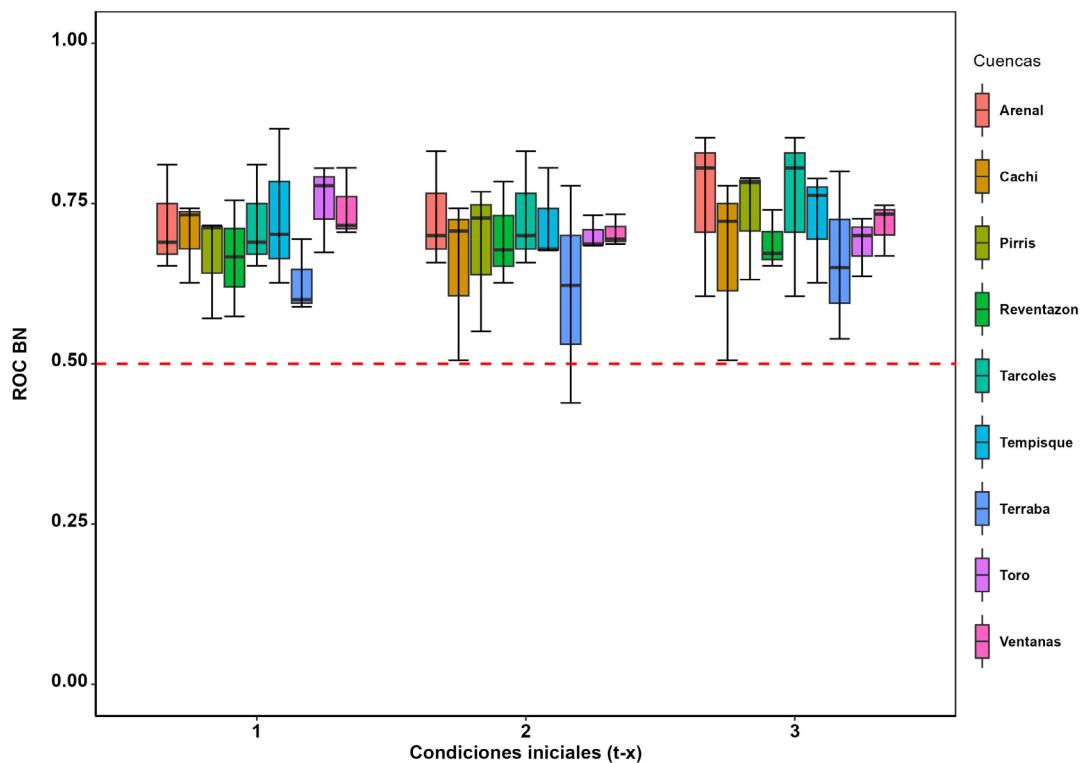
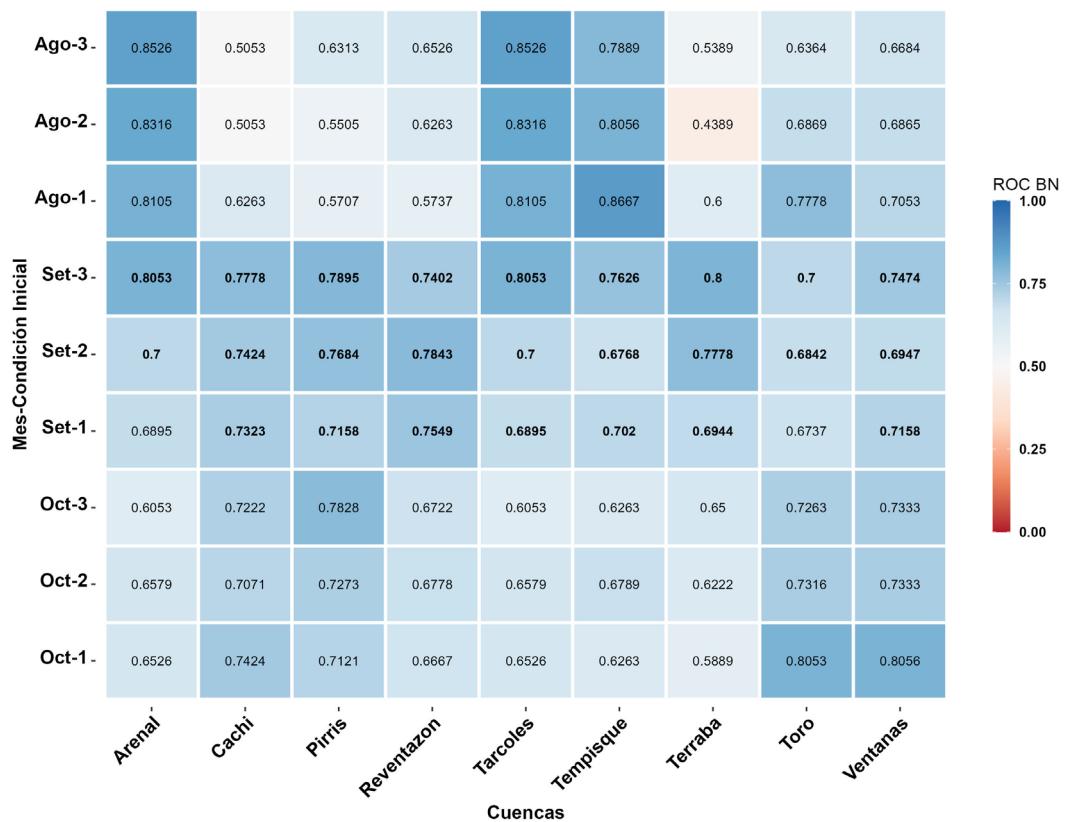


Figura 12. Lo mismo que la Figura 8, pero el área bajo la curva ROC de escenarios arriba de lo normal (ROC BN) para el pronóstico probabilístico de caudal para la estación ASO. La línea punteada roja indica el valor de ROC = 0.5.

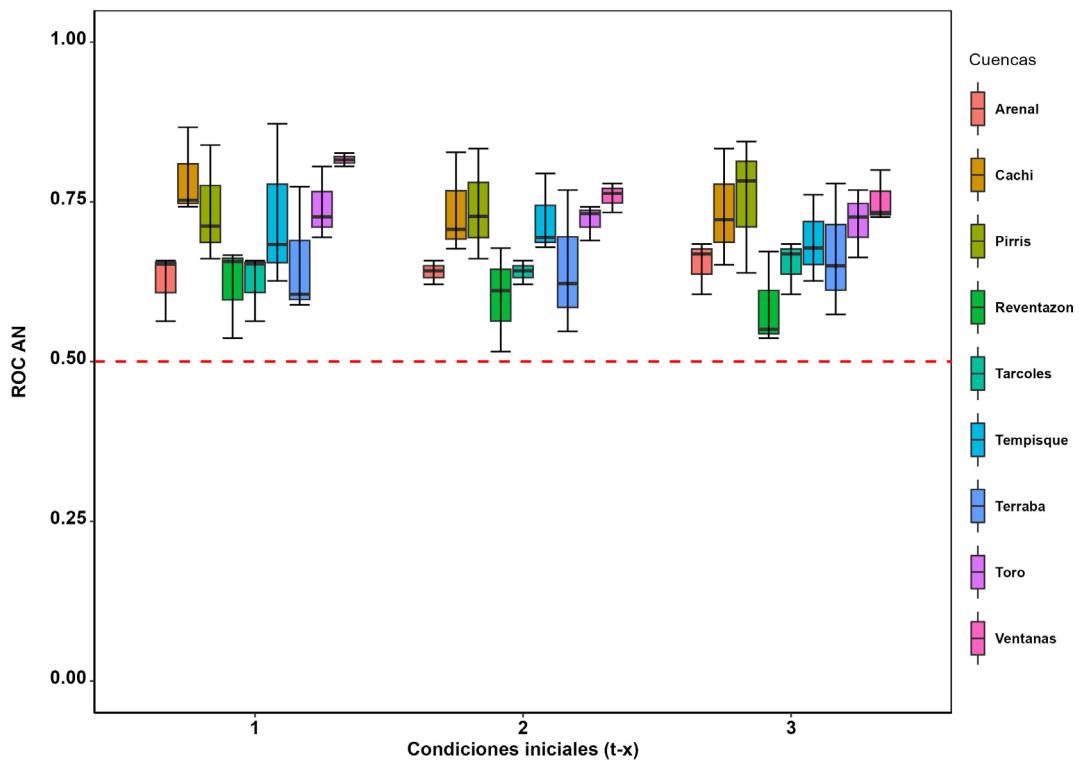
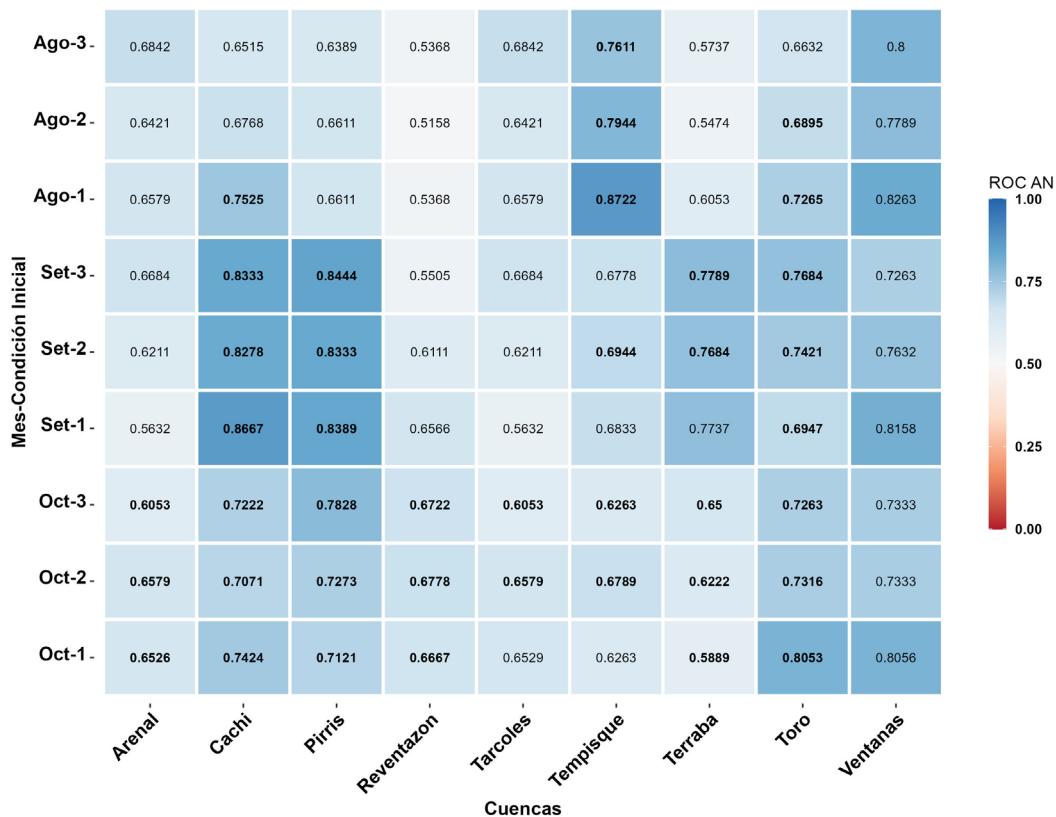


Figura 13. Lo mismo que la Figura 8, pero el área bajo la curva ROC de escenarios arriba de lo normal (ROC AN) para el pronóstico probabilístico de caudal para la estación ASO. La línea punteada roja indica el valor de ROC = 0.5.

3.4. Discusión

Cuando se compararon las tres estaciones, ASO (MJJ) se distinguió por tener valores más (menos) significativos en los estadísticos que evalúan los pronósticos mensuales. DEF M no tuvo una tendencia tan marcada como ASO o MJJ, ya que para algunos meses y cuencas se tuvieron habilidades predictivas altas y para otros estas habilidades son bajas sin una relación clara, es decir estas habilidades no dependen de las cuencas, de los meses pronosticados ni de las condiciones iniciales utilizadas. Esta evolución se muestra, a manera de ejemplo en la figura 14 de donde se observaron los valores de correlación de Pearson más altos durante el trimestre ASO, y en contraparte los menores valores de correlación estuvieron en los meses de MJJ.

La estación ASO, es la que tuvo una mejor habilidad predictiva y es la estación en la que los caudales

fueron menos sobreestimados (Madrigal, 2023). Lo anterior muestra que la mayoría de los pronósticos tuvieron habilidades predictivas significativas, incluso cuando hay casos donde todos los pronósticos son significativos, como es el caso de ROC BN para los pronósticos mensuales de este trimestre.

El cuadro 3 también muestra el porcentaje de pronósticos cuyos estadísticos de evaluación fueron > 0.5 , valor que determina una habilidad predictiva mejor que pronosticar con la climatología. Estos resultados no parecen tener una tendencia específica, ya que este nivel de significancia se encuentra distribuido de manera casi aleatoria, es decir, no hay una relación entre pronósticos y las condiciones iniciales o las cuencas.

La figura 15 presenta los pronósticos que evidencian habilidad predictiva a partir de



Figura 14. Correlación de Pearson entre el pronóstico de caudal medio mensual con tres distintas condiciones iniciales (t-1, t-2 y t-3) y el observado para las cuencas de interés. Se omiten los meses fuera de las estaciones de interés y los pronósticos descartados.

Cuadro 3. Resumen del porcentaje (%) de pronósticos probabilísticos cuyas evaluaciones son mayores al umbral que indica habilidad predictiva para cada estadístico, es decir ROC AN y ROC BN > 0.5.

	DEFM	MJJ	ASO	Total
ROC AN (> 0.5)	68.8 (10.4)	72.8 (1.3)	100 (55.5)	70.26 (17.7)
ROC BN (> 0.5)	80 (0)	77.7 (0)	98.7 (28.3)	74.5 (40.5)

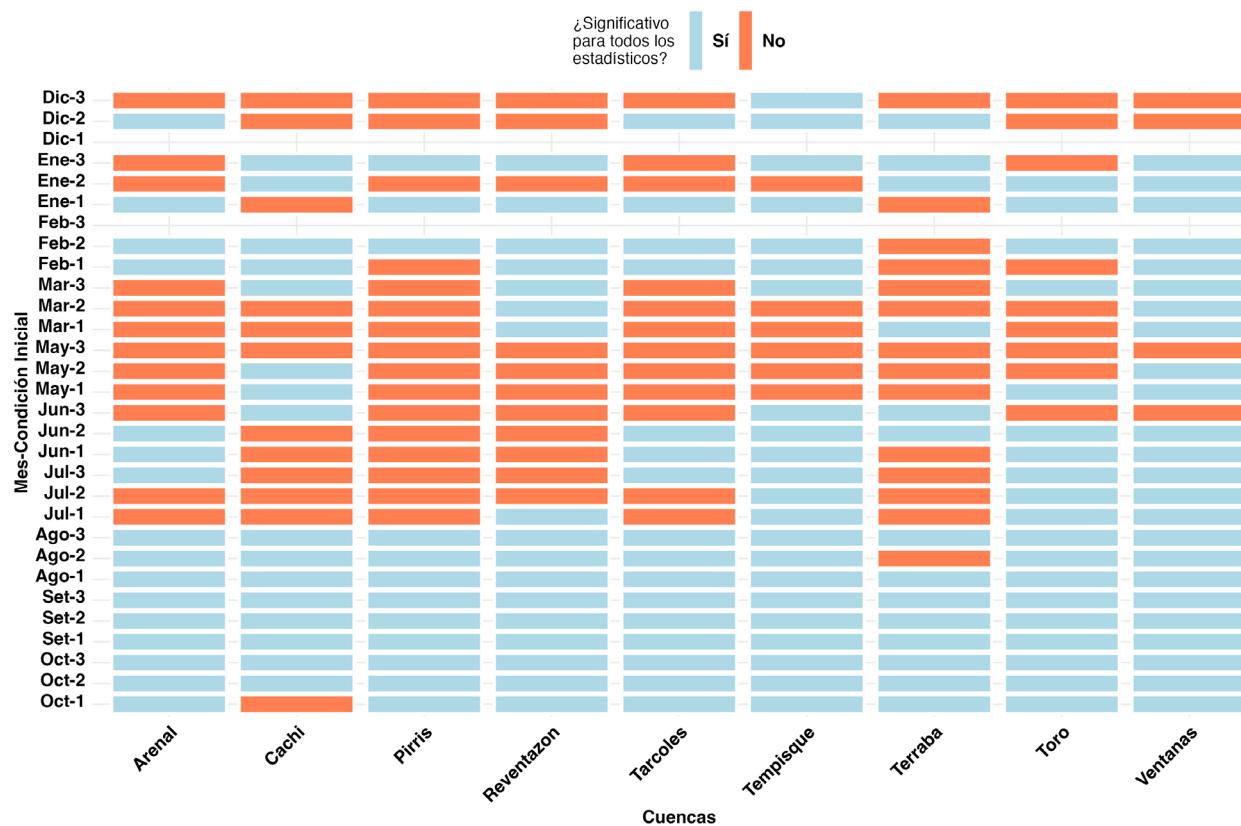


Figura 15 Mapa de calor de todos los pronósticos analizados, donde el color celeste muestra los pronósticos para los cuales los estadísticos fueron mayores al umbral que define habilidad predictiva, es decir, HS > 33.33, GS > 0, ROC AN > 0.5 y ROC BN > 0.5. En naranja los pronósticos para los cuales al menos un estadístico estuvo por debajo del valor umbral.

diferentes estadísticos, tales como HitScore, Gerrity Score, ROC AN y ROC BN. En el caso de la estación ASO, el 97,3 % de los pronósticos resultaron significativos según la evaluación simultánea de múltiples métricas, lo que refuerza la confianza en estos resultados. La cuenca de Ventanas destacó como la de mayor consistencia, con 26 de los 28 pronósticos (82 %) significativos en todos los estadísticos considerados. Además de los análisis para ROC AN y ROC BN, se realizaron

evaluaciones adicionales con correlación de Pearson, Mean Bias, HitScore y Gerrity Score, cuyos resultados completos se encuentran disponibles en Madrigal (2023).

La habilidad predictiva para las distintas estaciones no parece depender de la magnitud del caudal, es decir, se encuentran pronósticos con una habilidad predictiva significativas para meses donde la magnitud del caudal es la mayor o la menor del año,

como es el caso de ASO y DEFM, respectivamente. Tampoco se observa una relación entre la habilidad predictiva y la ubicación de la cuenca, es decir, si se ubican en la vertiente del Pacífico o del Caribe. Se encuentran pronósticos con mayores y menores habilidades predictivas en ambas vertientes a lo largo de las tres estaciones.

Las simulaciones generaron los mapas canónicos para el predictor (X), para el predictante (Y), y la relación entre estos a través del tiempo, lo que permite analizar la correlación canónica entre los campos X y Y . Estas figuras fueron generadas por la CPT para los pronósticos de todos los meses y sus respectivas condiciones iniciales; sin embargo, para este análisis se seleccionaron únicamente los resultados más significativos de cada estación, correspondientes a Ene-3 (DEFM), Jun-2 (MJ) y Set-1 (ASO).

La figura 16 muestra los resultados del ACC para el pronóstico de Ene-3, el primer modo (ver figura 16a y figura 16c) obtuvo una correlación canónica alta de 0.88 y muestra cómo este modo está relacionado con condiciones Niño (Niña) y Atlántico frío (cálido) que producen caudales más bajos (arriba) de lo normal de manera homogénea para todas las cuencas. El segundo modo representa una variación propia de la tendencia de los datos. Para el tercer modo (Figura 16g y Figura 16i), la configuración de enfriamiento (calentamiento) en el Atlántico genera una disminución (aumento) de los caudales para la mayoría de las cuencas, exceptuando a Tempisque para la cual el patrón es inverso.

Para el pronóstico de Jun-2 (junio con condiciones iniciales con 2 meses de anterioridad) en la figura 17, se obtuvieron tres modos de correlación canónica, donde el primer modo muestra que una PDO fría (cálida), condiciones tipo La Niña (El Niño) y un Atlántico cálido (frío) generan caudales arriba (abajo) de lo normal para la mayoría de las cuencas, excepto Reventazón que al tener influencia Caribe el patrón es inverso.

Para el segundo modo prevalece la relación entre las fases del ENOS y los caudales, es decir que para condiciones El Niño (La Niña) el caudal disminuye (aumenta), acompañado de un Mar Caribe cálido. Destaca que las correlaciones canónicas para este pronóstico son menores que para Ene-2 y Set-1, lo que se relaciona con la tendencia de pronósticos menos significativos para los meses de la estación MJ. El tercer modo muestra una relación entre los caudales y la Oscilación del Atlántico Norte o NAO, por sus siglas en inglés (Hurrell, 1995), más específicamente muestra que para las fases negativas (positivas) generan aumentos (disminuciones) del caudal, sin embargo, debido a su baja Correlación Canónica (0.08) este resultado es descartable.

La figura 18 muestra los mapas canónicos para los pronósticos de setiembre con condiciones iniciales de agosto (Set-1). De las figura 17a y figura 17b, se observa cómo el primer modo (con una correlación canónica de 0.8433) responde a las variaciones de la TSM en el Océano Pacífico correlacionado negativamente con los caudales, lo que indica que al aumentar (disminuir) la TSM, los caudales disminuyen (aumentan) para todas las cuencas y a su vez correlacionado negativamente con la TSM del Mar Caribe,

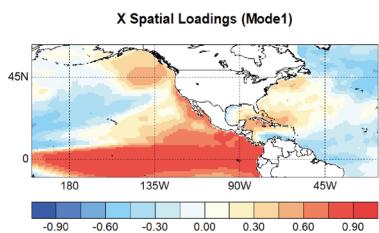
En las figura 18d y figura 18f, el segundo modo, con una correlación canónica de 0.59, se relaciona positivamente con las variaciones de la TSM del Mar Caribe y del Océano Pacífico Oriental Tropical. Este patrón refleja un dipolo entre las TSM del Pacífico y del Atlántico Tropical Norte (ATN). Sin embargo, la respuesta de los caudales no es homogénea en todas las cuencas.

Estos patrones entre la TSM y los caudales coinciden con los encontrados por Fallas y Alfaro (2012b) entre la TSM y la precipitación. Esto explicaría por qué los resultados para ASO son los más robustos desde el punto de vista de los estadísticos utilizados en la evaluación de los pronósticos. Además, la TSM podría contener la

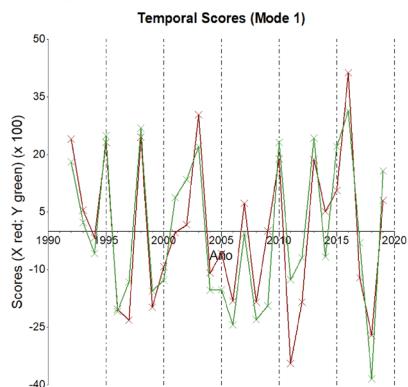
Modo 1

Correlación Canónica: 0.88

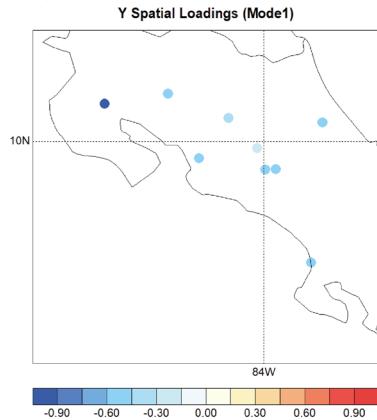
a)



b)



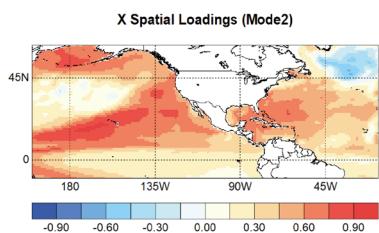
c)



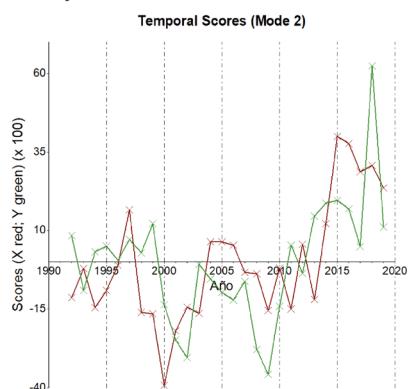
Modo 2

Correlación Canónica: 0.54

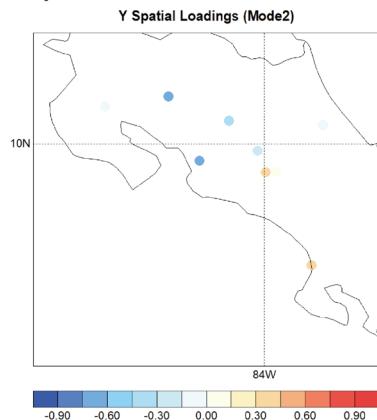
d)



e)



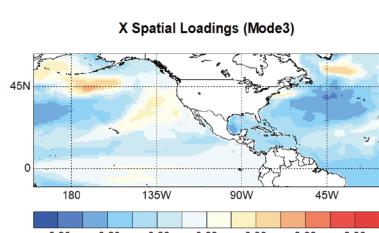
f)



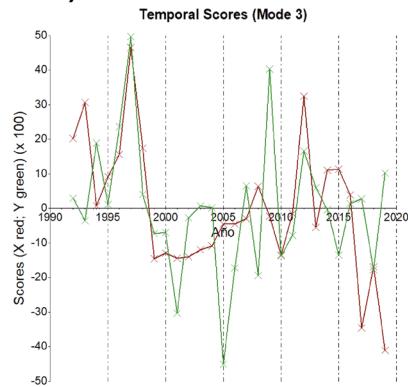
Modo 3

Correlación Canónica: 0.37

g)



h)



i)

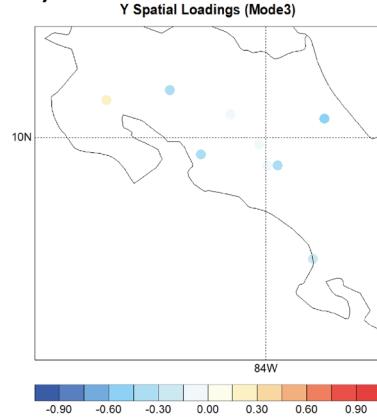
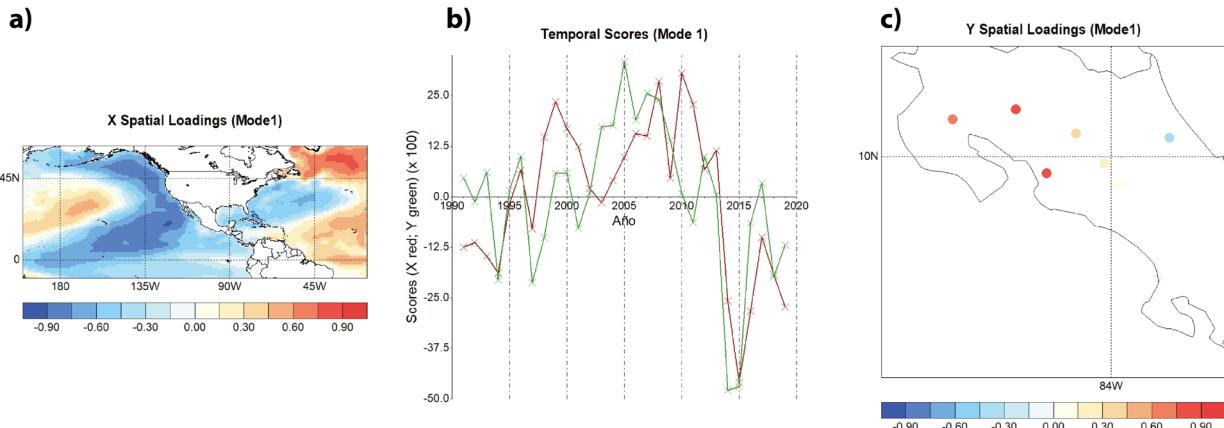
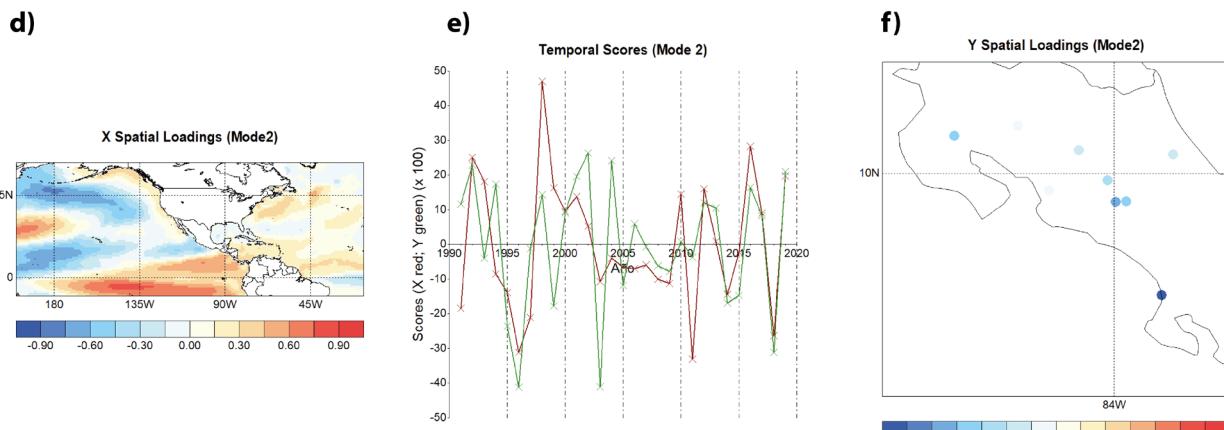


Figura 16 Correlaciones canónicas para el pronóstico de caudal de enero con condiciones iniciales de octubre (Ene-3). a), d) y g) Resultado del predictor para el modo 1, 2 y 3, respectivamente. b), e) y h) Series de tiempo del modo 1, 2 y 3 del predictor (rojo) y del predictante (verde), respectivamente. c), f) e i) Mapa del predictante para el modo 1, 2 y 3, respectivamente. La correlación canónica fue de 0.88, 0.54 y 0.37, respectivamente para los modos 1, 2 y 3.

Modo 1
Correlación Canónica: 0.64



Modo 2
Correlación Canónica: 0.55



Modo 3
Correlación Canónica: 0.08

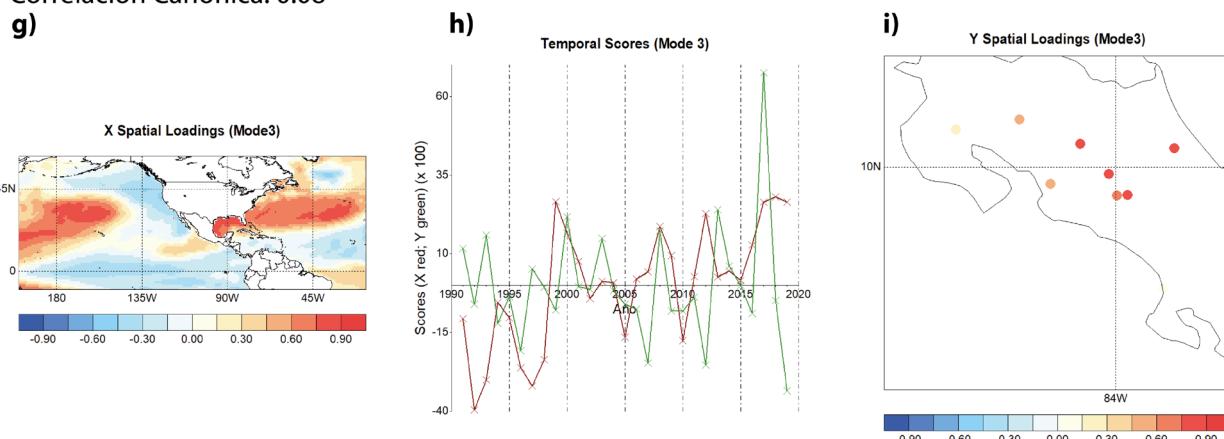
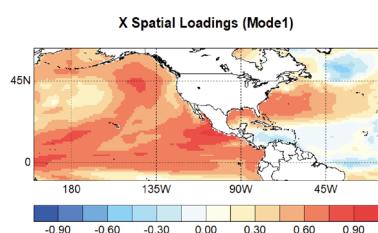
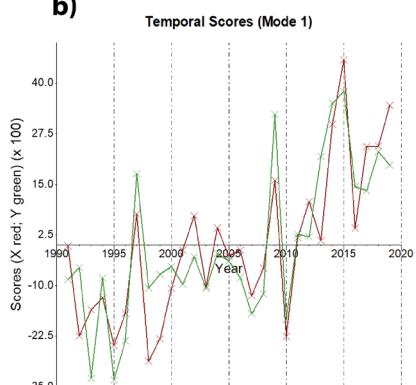
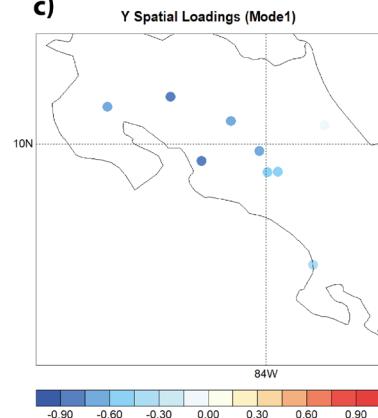


Figura 17 Mapas canónicos para el pronóstico de caudal de junio con condiciones iniciales de abril (Jun-2). a), d) y g) Mapa del predictor para el modo 1, 2 y 3, respectivamente. b), e) y h) Series de tiempo del modo 1, 2 y 3 del predictor (rojo) y del predictante (verde), respectivamente. c), f) e i) mapa del predictante para el modo 1, 2 y 3. La correlación canónica fue de 0.64, 0.55 y 0.08, respectivamente para los modos 1, 2 y 3. Fuente: elaboración propia.

Modo 1

Correlación Canónica: 0.84

a)**b)****c)**

Modo 2

Correlación Canónica: 0.59

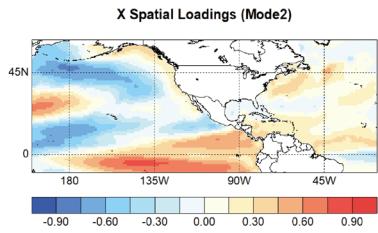
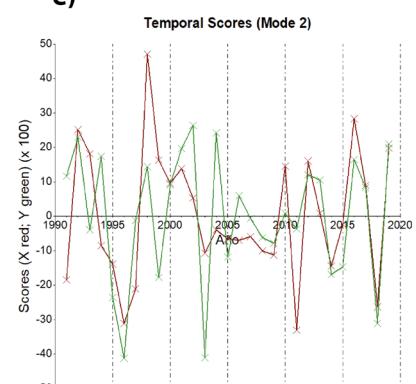
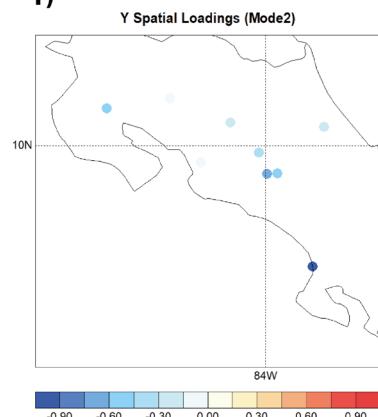
d)**e)****f)**

Figura 18 Mapas canónicos para el pronóstico de caudal de setiembre con condiciones iniciales de agosto (Set-1). a) y d) Mapa del predictor para el modo 1 y 2. b) y e) series de tiempo del modo 1 y 2 del predictor (rojo) y del predictante (verde). c) y f) mapa del predictante para el modo 1 y 2. La correlación canónica fue de 0.84 y 0.59, respectivamente para los modos 1 y 2.

memoria de otros forzantes, como la AAO para la vertiente del Pacífico de Costa Rica (Castillo 2021).

Los pronósticos pareciera que dependen, principalmente, de los predictores utilizados. Al ser estos resultados de un modelo de pronóstico como lo es el NMME, se puede inferir que los pronósticos de caudal dependen de la habilidad del NMME para pronosticar la TSM.

Los resultados muestran que ASO es el mes con mejor habilidad predictiva, esto concuerda

con los estudios de Fallas López y Alfaro (2012), Maldonado y Alfaro (2011), Maldonado et al. (2013), quienes mostraron que para la predicción del campo de precipitación, eventos extremos y días con lluvia ASO, en general, es el trimestre con mayor habilidad predictiva. Si bien estos campos no son los mismos que el pronosticado en este estudio (caudal mensual), esta habilidad predictiva para ASO parece ser una característica del sistema climático de la región, para variables relacionadas con la precipitación.

4. CONCLUSIONES

La herramienta CPT demostró ser de gran utilidad para generar pronósticos estadísticos mediante el ACC entre dos variables: un predictor y un predictante. En este estudio, el predictor correspondió a la TSM y el predictante a los caudales medios mensuales simulados, lo que permitió analizar cómo la variabilidad de un campo se relaciona con la variabilidad del otro. Los resultados mostraron que el ACC permite encontrar correlaciones canónicas entre la TSM y los caudales de las cuencas analizadas. Los modos de variabilidad oceánica del ENOS, PDO, así como las anomalías de TSM en el Mar Caribe y el Océano Atlántico, generan una respuesta en el comportamiento del caudal medio mensual. Por lo anterior, la CPT demostró ser una herramienta valiosa para la generación de pronósticos de caudal, una variable que hasta ahora no había sido abordada en la región centroamericana mediante esta técnica, donde su aplicación se ha limitado principalmente a la precipitación y la temperatura.

La evaluación de los pronósticos mostró que no hay una marcada diferencia entre los pronósticos según la ubicación geográfica de la cuenca (i.e. Vertiente del Pacífico o del Caribe), el tamaño de la cuenca o características de las cuencas como la longitud del cauce o el factor de forma. Todas las cuencas obtuvieron pronósticos con o sin habilidad predictiva, incluso hubo variaciones en la habilidad predictiva para la misma cuenca a través de los distintos meses del año y para distintos estadísticos.

Los resultados mostraron que no hay una marcada diferencia en las condiciones iniciales utilizadas para generar los pronósticos, por lo que se puede usar esta técnica para realizar pronósticos con hasta tres meses de antelación obteniendo pronósticos con una habilidad predictiva.

Los mejores resultados se obtuvieron para los pronósticos del trimestre ASO, los cuales destacan por tener los valores más altos y consistentes de

los estadísticos empleados para las evaluaciones de los pronósticos. Esto muestra que este trimestre posee la mayor habilidad predictiva durante el año para el pronóstico de caudales medios mensuales.

Los pronósticos categóricos muestran con facilidad cuando los pronósticos son significativos y útiles en comparación a los sesgos o errores que puede haber entre las series observadas y pronosticadas. Además de que se ha mostrado (Mylne, 2002; Sahu et al., 2017) que estos pronósticos tienen un valor económico mayor en el contexto de la toma de decisiones, ya que los pronósticos de probabilidad son útiles como herramientas para identificar un umbral de probabilidad que maximiza el valor del pronóstico, y que estos pueden ser elegidos para ser relevantes para una decisión específica en la gestión del agua.

La metodología empleada en este estudio tiene resultados y aplicabilidades que pueden ser útiles para la mejora de las metodologías de trabajo que realiza el Foro Hidrológico de América Central (FHAC) como herramienta de pronóstico de caudales medios mensuales utilizando la TSM como forzante climático, ya que se pueden generar pronósticos confiables incluso con tres meses de anterioridad al mes objetivo por pronosticar, tal y como lo hace dicho Foro. Además, la técnica mostró ser útil para el pronóstico operativo de caudal medio mensual, dirigido a aplicaciones como la generación eléctrica, ya que se obtuvieron resultados positivos en las cuencas analizadas en donde se localizan proyectos hidroeléctricos en Costa Rica, esto con meses de antelación suficientes para la planeación y toma de decisiones en este campo.

5. AGRADECIMIENTOS

A la Escuela de Física de la Universidad de Costa Rica debido a que esta investigación es parte del Trabajo Final de Graduación para la Licenciatura

en Meteorología de Carlos Madrigal, también por dar el tiempo de investigación a EA y HH para desarrollar este estudio. EA y HH agradecen a los proyectos B9454 (Fondo de Grupos), A4906 (PESCTMA), C4226 (EcoSalud), B0810, C2103, C5067 y C3991 (UCREA) inscritos en la Universidad de Costa Rica dentro de los cuales se enmarca este trabajo y del apoyo brindado por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC), Ottawa, Canadá y el Consejo Superior Universitario Centroamericano (CSUCA) al proyecto RC4 (C4468, CR-66, SIA 0054-23). Las opiniones aquí expresadas no representan necesariamente las del IDRC, CSUCA o las de la Junta de Gobernadores.

6. REFERENCIAS

- Alfaro, E. (2007a). Predicción de la temperatura superficial del aire en Centroamérica. *Revista Ambientico*, 165, 6-10. <https://www.ambientico.una.ac.cr/revista-ambientico/prediccion-de-la-temperatura-superficial-del-aire-en-centroamerica/>
- Alfaro, E. (2007b). Uso del análisis de correlación canónica para la predicción de la precipitación pluvial en Centroamérica. *Ingeniería y Competitividad*, 9(2), 33-48. <https://doi.org/10.25100/iyc.v9i2.2486>
- Alfaro, E. (2014). Caracterización del “veranillo” en dos cuencas de la vertiente del Pacífico de Costa Rica, América Central. *Revista de Biología Tropical*, 6(4), 1-15. <https://doi.org/10.15517/rbt.v62i4.20010>
- Alfaro, E., Chourio, X., Muñoz, Á. G., & Mason, S. (2018). Improved seasonal prediction skill of rainfall for the Primera season in Central America. *International Journal of Climatology*, 38(S1), e255-268. <https://doi.org/10.1002/joc.5366>
- Alfaro, E., Hidalgo, H., & Mora, N. (2016). Prediction of MJ rainfall season using CCA models. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 15(2), 15-19.
- Alfaro, E., Hidalgo, H., Mora, N., Pérez, P., & Fallas, B. (2016). Assessment of Central America Regional Climate Outlook Forum maps, 1998-2013. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 15(1), 37-52. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/73447>
- Alfaro, E., Soley Alfaro, F., & Enfield, D. B. (2004). Uso de una Tabla de Contingencia para Aplicaciones Climáticas (Documento Técnico). *Uso de una Tabla de Contingencia para Aplicaciones Climáticas* (pp. 51). San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 51. <https://hdl.handle.net/10669/76751>
- Alfaro Martínez, E. J., Alvarado Gamboa, L. F., Fallas López, B. G., Mora Sandí, N. P., & Hidalgo León, H. G. (2024). Caracterización climática y análisis de mecanismos moduladores del descenso de las lluvias en la vertiente Caribe de América Central durante septiembre-octubre. *Revista de Ciencias Ambientales*, 58(1), 1-24. <https://doi.org/10.15359/rca.58-1.4>
- Arciniega-Esparza, S., & Birkel, C. (2020). *Hydrological simulations for Costa Rica from 1985 to 2019 using HYPE CR 1.0 [Data set]*. Zenodo. [Dataset]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4029572>
- Barnston, A. G., Tippett, M. K., Ranganathan, M., & L'Heureux, M. L. (2019). Deterministic skill of ENSO predictions from the North American Multimodel Ensemble. *Climate Dynamics*, 53, 7215-7234.
- Becker, E., Den Dool, H. V., & Zhang, Q. (2014). Predictability and Forecast Skill in NMME. *Journal of Climate*, 27(15), 5891-5906. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00597.1>
- Bergström, S. (1992). *The HBV Model -its structure and applications* (p. 35). Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Hydrology.
- Bergström, S. (1995). The HBV model. Computer models of watershed hydrology (Chapter 13). En *Computer Models of Watershed Hydrology*, (pp. 443-476). Singh, V. P., Water Resources Publications.

- Cassagnole, M., Ramos, M.-H., Zalachori, I., Thirel, G., Garçon, R., Gailhard, J., & Ouillon, T. (2021). Impact of the quality of hydrological forecasts on the management and revenue of hydroelectric reservoirs – a conceptual approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(2), 1033-1052. <https://doi.org/10.5194/hess-25-1033-2021>
- Castillo, R. (2021). La oscilación antártica: Su influencia en la variabilidad interanual de la precipitación en Costa Rica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 45(176), 875-900. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1434>
- Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH). (2022). *XXI Perspectiva Hidrológica de América Central*. Comité Regional de Recursos Hidráulicos.
- DelSole, T., & Tippett, M. (2022). *Statistical methods for climate scientists*. Cambridge University Press.
- Durán-Quesada, A. M., Sorí, R., Ordoñez, P., & Gimeno, L. (2020). Climate Perspectives in the Intra–Americas Seas. *Atmosphere*, 11(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/atmos11090959>
- Enfield, D. B., Mestas-Nuñez, A. M., & Trimble, P. J. (2001). The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental US. *Geophysical research letters*, 28(10), 2077-2080.
- Fallas López, B., & Alfaro, E. (2012). Uso de herramientas estadísticas para la predicción estacional del campo de precipitación en América Central como apoyo a los Foros Climáticos Regionales. 2: Análisis de Correlación Canónica. *Revista de Climatología*, 12, 93-105. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/15066>
- Fallas López, B., & Alfaro, E. (2014). Predicción estacional de las temperaturas máximas y mínimas en América Central. *Trópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 13(1), 5-26. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/15128>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Garcia-Solera, I., & Ramirez, P. (2012). *Central America's Seasonal Climate Outlook Forum*. https://www.climate-services.org/wp-content/uploads/2015/09/CRRH_Case_Study.pdf
- Hurrell, J. W. (1995). Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation. *Science*, 269(5224), 676-679. <https://doi.org/10.1126/science.269.5224.676>
- Kirtman, B. P., Min, D., Infanti, J. M., Kinter, J. L., Paolino, D. A., Zhang, Q., Dool, H. van den, Saha, S., Mendez, M. P., Becker, E., Peng, P., Tripp, P., Huang, J., DeWitt, D. G., Tippett, M. K., Barnston, A. G., Li, S., Rosati, A., Schubert, S. D., ... Wood, E. F. (2014). The North American Multimodel Ensemble: Phase-1 Seasonal-to-Interannual Prediction; Phase-2 toward Developing Intraseasonal Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(4), 585-601. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00050.1>
- Madrigal, C. (2023). *Generación de pronósticos retrospectivos de caudal para cuencas hidrográficas en Costa Rica por medio de la técnica de análisis de correlación canónica*. [Tesis de Grado, Licenciatura., Universidad de Costa Rica]. <https://hdl.handle.net/10669/90890>
- Maldonado, T., & Alfaro, E. (2010). Propuesta metodológica para la predicción climática estacional de eventos extremos y días con precipitación. Estudio de caso: Sur de América Central. *InterSedes*, 11(21), 182-204. <https://doi.org/10.15517/ISUCR.V11I21.1009>

- Maldonado, T., & Alfaro, E. (2011). Predicción estacional para ASO de eventos extremos y días con precipitación sobre las vertientes Pacífico y Caribe de América Central, utilizando análisis de correlación canónica. *Intersedes*, 12(24). <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/20259>
- Maldonado, T., Alfaro, E., Fallas-López, B., & Alvarado, L. (2013). Seasonal prediction of extreme precipitation events and frequency of rainy days over Costa Rica, Central America, using Canonical Correlation Analysis. *Advances in Geosciences*, 33, 41-52. <https://doi.org/10.5194/adgeo-33-41-2013>
- Maldonado, T., Alfaro, E., & Hidalgo, H. (2018). A review of the main drivers and variability of Central America's Climate and seasonal forecast systems. *Revista de Biología Tropical*, 66(1-1), Article 1-1. <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i1.33294>
- Maldonado, T., Rutgersson, A., Alfaro, E., Amador, J., & Claremar, B. (2016). Interannual variability of the midsummer drought in Central America and the connection with sea surface temperatures. *Advances in Geosciences*, 42. <https://doi.org/10.5194/adgeo-42-35-2016>
- Mantua, N. J., & Hare, S. R. (2002). The Pacific decadal oscillation. *Journal of oceanography*, 58, 35-44.
- Mason, S. J. (2013). Guidance on verification of operational seasonal climate forecasts. *World Meteorological Organization, Commission for Climatology XIV Technical Report*.
- Mason, S. J., & Baddour, O. (2008). Statistical modelling. En *Seasonal climate: Forecasting and managing risk* (pp. 163-201). Springer.
- Mason, S. J., Tippett, M. K., Song, L., & Muñoz, Á. G. (2020). *Climate Predictability Tool version 17.2.1*. <https://doi.org/10.7916/d8-qn5k-n466>
- Mu, Q., Zhao, M., & Running, S. W. (2011). Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote sensing of environment*, 115(8), 1781-1800.
- Mylne, K. R. (2002). Decision-making from probability forecasts based on forecast value. *Meteorological Applications*, 9(3), 307-315. <https://doi.org/10.1017/S1350482702003043>
- Navarra, A., & Simoncini, V. (2010). *A guide to empirical orthogonal functions for climate data analysis*. Springer.
- Rojas, N. (2011). *Estudio de las cuencas hidrográficas de Costa Rica*. <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/estudio-de-las-cuencas-hidrograficas-de-costa-rica/>
- Sahu, N., Robertson, A. W., Boer, R., Behera, S., DeWitt, D. G., Takara, K., Kumar, M., & Singh, R. B. (2017). Probabilistic seasonal streamflow forecasts of the Citarum River, Indonesia, based on general circulation models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31(7), 1747-1758. <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1297-4>
- Sharma, P., & Machiwal, D. (2021). Streamflow forecasting. En *Advances in Streamflow Forecasting* (pp. 1-50). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820673-7.00013-5>
- Soley, F. y E. Alfaro (1999). Aplicación de análisis multivariado al campo de anomalías de precipitación en Centroamérica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos.*, 6(2), 71-93. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/76622>
- Tyralis, H., Papacharalampous, G., & Langousis, A. (2021). Streamflow forecasting at large time scales using statistical models. En *Advances in Streamflow Forecasting* (pp. 51-86). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820673-7.00004-4>
- Wilks, D. S. (2019). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (4th ed.). Elsevier Science. <https://www.elsevier.com/books/statistical-methods-in-the-atmospheric-sciences/wilks/978-0-12-815823-4>



Instituto Meteorológico Nacional

Sitio web:
www.imn.ac.cr

Teléfono: (506) 2222 5616

Apartado postal: 5583-1000
San José
Costa Rica