



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

COORDINACIÓN DE DESARROLLO PROFESIONAL E INSTITUCIONAL

SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO

TESIS

**PATRONES ATMOSFÉRICOS ASOCIADOS A LA DINÁMICA DE LOS
FRENTES FRÍOS EN MÉXICO UTILIZANDO DATOS
REGIONALIZADOS POR EL RCA4**

que para obtener el grado de
Maestro

presenta
David Eduardo Díaz Gutiérrez

Tutores:
Dr. Ramón Fuentes Franco
Dr. Martín José Montero Martínez

Jiutepec, Morelos

2020

Paseo Cuaunháhuac No. 8532, Col. Progreso, CP. 62550, Jiutepec, Morelos.
Tel: (777) 329 3600 www.gob.mx/imta



2020
AÑO DE
LEONA VICARIO
BENEMÉRITA MADRE DE LA PATRIA

F.C5.02.44.1



Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada “Patrones atmosféricos asociados a la dinámica de los frentes fríos en México utilizando datos regionalizados por el RCA4”, otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

David Eduardo Díaz Gutiérrez

Jiutepec, Morelos a 29 de enero del 2020



Resumen

Los frentes fríos que se presentan en México durante el período invernal juegan un papel importante, que no se limita sólo en definir el clima del País, puesto que repercuten en este período las actividades diarias de la población; ya que su propagación frecuentemente se asocia a la pérdida de cultivos y/o bienes cuando éstos generan heladas, granizadas, nevadas, inundaciones o fuertes vientos. Por lo tanto, su estudio es de gran importancia, no solamente por el hecho de incrementar el conocimiento de la dinámica de estos eventos, sino también porque pueden ayudar a resolver problemas sobre el riesgo y la vulnerabilidad de la población ante diversos escenarios meteorológicos y/o climáticos.

En el presente trabajo se desarrolló una metodología para llevar a cabo la identificación objetiva de frentes fríos en México a través de la visualización del campo de la dirección del viento para once modelos regionalizados por el RCA4, la cual se exploró con el objetivo de generar climatologías de frentes fríos para cuatro regiones de México: Baja California, Mesa Norte, Golfo de México y Península de Yucatán.

En acorde a ello y a los análisis de anomalías térmicas y correlaciones realizadas, se encontró que la mayoría de los modelos regionalizados lograron reproducir la dinámica atmosférica de cada región, además de que halló que para éstos, la zona Ecuatorial del Océano Pacífico es, efectivamente, una región relacionada con el impulso en la frecuencia de sistemas invernales en México; en donde una temporada muy activa de sistemas frontales durante un período invernal (aquí definido de noviembre a abril) se da durante eventos térmicos anómalamente cálidos sobre la región del Niño 3, y mínimo, durante eventos térmicos con anomalías negativas.

Dedicado a

Salvador C. Liñán. Por haberme
brindado amor; obsequiado de su
tiempo; y compartido enseñanzas;
ingredientes que fueron en todo
momento valiosos para mi
aprendizaje en este ciclo de mi
vida tan importante

Juanita Castillo, por sus consejos
oportunos, siempre brindados
incondicionalmente y con mucho cariño

y a mi Papá, Miguel D. Canul, por su apoyo y
cuidados brindados durante mis periodos de
incapacidad

Agradecimientos

A los Doctores Martín Montero y Ramón Fuentes; personas de gran calidad humana que me brindaron enseñanzas y oportunidades para superarme tanto profesionalmente como personalmente

Al Dr. Antonio Salinas y la Mtra. Gabriela Colorado, profesores apasionados por la enseñanza de la dinámica atmosférica; pues su contribución jugó papel importante en mi formación en el IMTA



Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), por la beca brindada para mi estancia y desarrollo profesional en sus instalaciones. Así como a su personal de Posgrado, por las atenciones brindadas

Al Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología (SMHI), por recibirme en sus instalaciones del Rossby Centre durante mi estancia académica y laboral en Norrköping, Suecia. Así como a los Doctores Ramón Fuentes, Ralf Döscher, Torben König y Ariosto Aguilar, quienes al confiar en mí, hicieron de esto una realidad

Al comité revisor del presente trabajo, por su confianza depositada y las sugerencias realizadas

A mi amigo Miguel V. Zavaleta, por su apoyo y consejos dados durante mi paso en el IMTA



Palabras claves: *Regionalización Dinámica *Identificación Objetiva de Frentes Fríos *Frentes Fríos en México *Climatología de Frentes Fríos

ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS

∇	Gradiente
>	Mayor que
<	Menor que
abs	Valor absoluto
AMS	Sociedad Meteorológica Americana
BC	Baja California, México
CAM	América Central
Cw	Constante del viento, dada por la ecuación: $\text{abs}(1/2 (\cos(A-X))-.05)$; donde A es el ángulo de la dirección del viento dominante justo tras el paso de la línea frontal, y X el ángulo contrario A.
CORDEX	Experimento Coordinado de Reducción de Escala Regional del Clima
ECMWF	Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio
GM	Golfo de México, México
LF	Límite frontal, definida por la ecuación: $ \nabla \cdot Wws < K$, donde K es una constante positiva >0 , la cual es definida por el usuario
MCGs	Modelos Climáticos Globales
MN	Mesa del Norte o Altiplano, México
Mw	Magnitud del viento
NHC	Centro Nacional de Huracanes
PY	Península de Yucatán, México
RCA4	Rosby Centre Regional Atmospheric Model
SMHI	Instituto de Meteorología e Hidrología de Suecia
SMN	Servicio Meteorológico Nacional, México
TAS	Temperatura superficial del aire
U	Componente U de la velocidad del viento
V	Componente V de la velocidad del viento
WRCP	Programa Mundial de Investigaciones Climáticas
Wws	Velocidad del viento ponderado, dada por la ecuación: Mw^{Cw} ; donde $Mw > 12\text{m/s}$
Zg	Altura Geopotencial

CONTENIDO

1. Introducción.....	1
1.1 Importancia del estudio de frentes fríos en México.....	1
1.2 Modelos atmosféricos: una opción para abordar temas climáticos en México.....	2
2. Datos y configuraciones.....	5
3. Metodología.....	8
3.1 Identificación de sistemas frontales a través de datos en malla.....	8
3.1.1 Continuidad en la identificación objetiva de sistemas frontales.....	12
3.2 Extracción de los sistemas frontales reportados por el NHC.....	13
3.3 Áreas de estudio y la contabilidad de sistemas frontales.....	15
4. Resultados y discusiones.....	18
4.1 Ocurrencia de eventos frontales a lo largo del año y otras estadísticas.....	18
4.2 Correlación entre la actividad de sistemas frontales y la TAS.....	24
4.3 Anomalía de la TAS.....	28
4.3.1 Anomalía de la TAS para los tres años con eventos frontales más activos.....	28
4.3.2 Anomalía de la TAS para los tres años con eventos frontales menos activos.....	33
4.4 Resumen del análisis cualitativo de correlaciones y anomalías para la TAS.....	35
4.5 Análisis cuantitativos de correlaciones y anomalías.....	37
5. Conclusiones.....	45
ANEXO A.....	48
ANEXO B.....	50
ANEXO C.....	51
ANEXO D.....	53
Fuentes bibliográficas.....	55

1. Introducción

1.1. Importancia del estudio de frentes fríos en México

Los sistemas frontales se definen como la región de interacción entre masas de aire con diferentes características termodinámicas (e.g., temperatura, densidad, presión); en la que dependiendo del desplazamiento de la masa dominante, se generan cambios significativos en las condiciones meteorológicas que se ven reflejados en el desarrollo de precipitaciones, cambios bruscos en la temperatura e incremento turbulento en la intensidad y dirección del viento en superficie (Berry et al., 2011; Hawcroft et al., 2012; Catto y Pfahl, 2013). Por esta razón, a largo plazo, juegan un papel importante en la variabilidad del clima en las latitudes medias y tropicales (e.g., Catto et al., 2014).

De manera general, y debido a la ubicación geográfica en la que se encuentra, México está principalmente bajo la influencia de masas de aire tropical durante los meses del verano boreal, que es cuando el dominio sur de la Alta de los Azores es fuerte y produce la advección de aire cálido y húmedo a través del flujo de los vientos Alisios. Sin embargo, durante los meses del invierno boreal, el centro semipermanente de alta presión se desplaza hacia el este (con respecto a la posición del verano), lo que provoca un menor dominio del flujo de vientos Alisios y que la interacción entre las masas de aire tropical y las de latitudes medias sea más frecuente en la región, produciendo así eventos frontales (Boyd et al., 1990; O'Hara y Metcalfe, 1995; ver clasificación de sistemas frontales en ANEXO A). Por lo tanto, México se encuentra expuesto a dos importantes períodos de eventos meteorológicos; el primero asociado a los sistemas derivados de la influencia de masas tropicales en verano (e.g. ondas atmosféricas, ciclones tropicales); y el segundo, a la incursión de las masas de aire frío-continental que descienden desde Estados Unidos hacia México en los meses de invierno (e.g. frentes fríos).

Los efectos del desplazamiento de las masas de aire frío a través de México son diversos, ya que dependen del evento asociado que se analice e incluso del área geográfica al que se enfoquen, por ejemplo: se ha reportado que el paso de los frentes fríos a lo largo del litoral del Golfo de México pueden generar intensas precipitaciones puntualizadas (e.g., las inundaciones producidas por el frente frío No. 5 en Chiapas y Tabasco durante noviembre del 2007); tras su paso, el establecimiento de fuertes vientos de 20 hasta 30 m/s dan origen al llamado evento de

norte (Schultz et al., 1998), nombrado así por la dirección del viento dominante; que además, al interactuar con la Sierra Madre, genera el efecto Venturi sobre el paso de Chivela, en donde los vientos pueden incrementar hasta los 50 m/s hacia el Golfo de Tehuantepec (Stumpf, 1975). Otro de los efectos asociados a la incursión de la masa de aire fría-continental, es la disminución de la temperatura superficial del aire, la cual alcanza valores entre 3°C y 15°C en 24 horas sobre las regiones afectadas (Schultz et al., 1998). Bajo estas condiciones se pueden desarrollar problemas relacionados con la salud, infraestructura y bienes de la población, que en ocasiones se traducen en pérdidas de vidas humanas (Jiménez et al., 2012).

Por lo expuesto anteriormente, se observa que el análisis y el entendimiento de la dinámica de los sistemas frontales es un tema de gran importancia, que además permite plantear estudios relacionados con la vulnerabilidad de la población ante estos eventos meteorológicos.

1.2. Modelos atmosféricos: una opción para abordar temas climáticos en México

Los esfuerzos por determinar la dinámica de una región se han basado principalmente en el análisis de datos obtenidos de las redes de observaciones climatológicas; que a su vez han sido de gran importancia para establecer la vulnerabilidad que se desarrolla en diversas zonas. Sin embargo los datos disponibles no siempre están espacialmente distribuidos de forma uniforme, y además, pueden contener datos incompletos o inconsistentes (posiblemente derivados de errores en las mediciones o cambios en el entorno; Andrews, 2010). Es aquí en donde la brecha de la búsqueda de técnicas para estudiar la dinámica atmosférica se amplía dependiendo de los propósitos que se necesiten.

A partir de la década de 1990, la aplicación de los Modelos Climáticos Globales (MCGs) adquirieron una amplia aceptación en el campo de los estudios climáticos (Wilby y Wigley, 1997); y es que estos modelos, basados en ecuaciones matemáticas y físicas, surgían para llevar a cabo simulaciones climáticas complejas, aunque sus resultados tenían una baja resolución espacial debido a los recursos computacionales que demandaban su ejecución (Wigley et al., 1990; Carter et al., 1994; Cracknell, 2001; Andrews, 2010). Ahora bien, en la actualidad su uso en México forma parte de una área poco explorada; sin embargo, su empleo de forma directa o indirecta en la región, a través de diversos estudios (ya sea o no regionalizados), han comenzado

a ganar importancia ante la necesidad de buscar otras formas confiables de entender la dinámica atmosférica y sus efectos en la población. Por ejemplo:

- i. La investigación sobre los factores involucrados en el desarrollo de las precipitaciones que se dan de sobre el noroeste de México debido al Monzón de Norteamérica (e.g., Mo et al., 2005; Chan y Mishra, 2011; Cavazos y Arriaga-Ramirez, 2012; Turrent y Cavazos, 2012; Torres-Alavez et al., 2014; Mascaro et al., 2014; Fuentes et al., 2014; Bukovsky et al., 2015; Bohn y Vivoni, 2016; Dominguez et al., 2016), puesto que su estacionalidad y variabilidad son de gran impacto para el sector primario.
- ii. Para estudiar los mecanismos que influyen en el comportamiento de la Sequía Intraestival, y la consecuente bimodalidad en la distribución de las precipitaciones a lo largo del año sobre el noreste, centro y sureste de México (e.g., Small et al., 2007; Fuentes et al., 2014; Maloney et al., 2014), ya que los efectos de ésta no solamente se limitan para el sector primario, donde la agricultura figura como una parte importante de la economía regional, sino también porque favorece ambientes propicios para la generación de complicaciones en la salud debido a la alza de temperaturas.
- iii. Incluso, para hacer estudios históricos de ondas y huracanes tropicales (e.g., Fuentes et al., 2014), porque proveen mejoras y herramientas para hacer su seguimiento.

No obstante, a pesar de que actualmente los productos de MCGs son incapaces de captar y producir información detallada sobre el clima a escalas que son cruciales para la población, éstos son referidos como la principal fuente de información para realizar estudios climáticos históricos e incluso para proyecciones a futuro.

Ahora bien, para tratar los detalles de resolución espacial, los productos de los MCGs se someten a técnicas de reducción de escala, que se basan en procedimientos matemáticos y/o físicos, para llevar la información de gran escala a una de mayor resolución espacial. Estas técnicas se clasifican, según sea el caso, en: las dinámicas, que se obtiene a través del uso de modelos climáticos regionales (al considerar el uso de la dinámica atmosférica); y las estadísticas, que se basan en la regresión lineal, correlación canónica, entre otras.

En base a lo descrito previamente, se tiene que el análisis de los sistemas frontales es de gran importancia, no solamente por el hecho de incrementar el conocimiento de la dinámica de estos eventos, sino también porque pueden plantear estudios sobre el riesgo de la población

ante diversos escenarios meteorológicos y/o climáticos. Hacer este análisis mediante el uso de modelos climáticos regionales, forzados por MCGs, representa un apoyo en el proceso de determinar y establecer la dinámica atmosférica que se desarrolla en una región. Este proceso incluye también la evaluación del desempeño de los modelos, con el objetivo de identificar sus deficiencias y hacer las correcciones pertinentes en el futuro. De esta manera, incrementalmente, brindar herramientas de mayor confianza para que los diversos usuarios puedan implementarlo objetivamente en sus estudios climáticos.

De tal forma que los resultados que se obtengan, cada vez puedan brindar herramientas de mayor confianza para que los diversos usuarios puedan implementarlo objetivamente en sus estudios climáticos.

En la presente investigación se explora la dinámica de los frentes fríos en México a través de evaluación de las simulaciones llevadas a cabo por el modelo atmosférico del Rossby Centre (RCA4) forzado por once modelos globales. Lo anterior, con el objetivo de describir la habilidad de éstos en reproducir dichos sistemas invernales y documentar las zonas que influyen en el desarrollo de éstos en México. Los análisis se hicieron espacialmente y temporalmente sobre la distribución de sistemas frontales, apoyados con climatologías y mapas de correlación.

El trabajo presenta la siguiente estructura: la sección dos explica brevemente la fuente y características de los datos globales con las que el RCA4 fue forzado; la sección tres describe la metodología empleada para desarrollar el algoritmo de identificación objetiva de sistemas frontales, la cual fue parte fundamental de la investigación para realizar su seguimiento automatizado tanto espacial como temporalmente; posteriormente, se presenta la cuarta sección que muestra los resultados obtenidos, así como las discusiones, para finalmente acotar y resumir los resultados en la sección cinco de conclusiones.

2. Datos y configuraciones

En la sección anterior se planteó indirectamente que, una de las principales limitantes de implementar un modelo de regionalización dinámica radica en el uso de las avanzadas herramientas de cómputo que demanda cada una de sus integraciones para resolver y obtener un producto de mayor resolución espacial; además, su aplicación se vuelve más compleja, si se desea realizar dicho proceso de reducción de escala a un dominio de estudio de tamaño considerable.

Justamente el proyecto Experimento Coordinado de Reducción de Escala Regional del Clima (CORDEX, por sus siglas en inglés), auspiciado por el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WRCP), ha sido un plan dedicado a reunir esfuerzos de diversos científicos e instituciones relacionados con el estudio del clima, para cumplir con una de las primeras fases de la regionalización, a saber: proveer productos de MCGs, regionalizados dinámicamente o estadísticamente para diferentes áreas específicas (ver dominios en ANEXO B). Con respecto ésto, el departamento de investigación del Instituto de Meteorología e Hidrología de Suecia (SMHI; Rossby Centre), por medio de la implementación del RCA4, y acorde a los estatutos publicados en el CORDEX, ha puesto al público un conjunto de modelos regionalizados dinámicamente para su análisis y evaluación, que bien pueden ser confinados para generar conocimiento a modo de retroalimentación.

En el presente estudio se consideró trabajar con las simulaciones obtenidas dinámicamente del RCA4, cuyos datos generales se presentan en la tabla 1, disponibles en la página <https://climate4impact.eu/impactportal/data> para el área definida del CAM (América Central), dado que cuenta con una buena cobertura del territorio Mexicano. Teniendo como principales variables a analizar, la velocidad del viento a 850 mb (i.e., componentes U,V) y la temperatura superficial del aire; obtenidas en una resolución espacial de $0.44^{\circ} \times 0.44^{\circ}$, para el período largo de 1980 a 2005, salvo RCA4-ERA, que dispuso información de 1980 al 2010. Por lo tanto, aunque aquí no se implementó (desempaquetó, instaló y configuró) el modelo RCA4 para nuestra región de interés, es conveniente dar a conocer algunas de las especificaciones del modelo para brindar un poco más de detalles acerca del configurado de sus principales parametrizaciones (ver tabla 2). Además, también se tomaron en cuenta los datos de reanálisis de

Era Interim, que dispone el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF) en la página <https://www.ecmwf.int/en/forecasts>. En este caso en particular, se descargaron las variables análogas a las del RCA4, a una resolución espacial de 0.75°X0.75°, y temporal de cada 6 horas, para el período de 1980 al 2010 y recortado para el dominio del CAM.

Tabla 1. Modelos globales que forzaron al RCA4, usados para su análisis en el presente trabajo.

Nombre (origen)	Abreviación	Resolución espacial y temporal	Variables de interés (abreviación)	período de análisis	
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canadá)	RCA4-CCCMA	0.44°X0.44° cada 6 horas	Temperatura Superficial del Aire (TAS).	1980-2005	
Centre National de Recherches Meteorologiques (Francia)	RCA4-CNRM			1980-2005	
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Australia)	RCA4-CSIRO			1980-2005	
ECMWF Interim Re-analysis (Europeo)	RCA4-ERA			1980-2010	
Earth-system model (Europa)	RCA4-ICHEC			1980-2005	
Institut Pierre Simon Laplace Model (Francia)	RCA4-IPSL		Velocidad del viento en U a 850 mb (ua850).	1980-2005	
Model for Interdisciplinary Research on Climate (Japón)	RCA4-MIROC			1980-2005	
Earth System Model-Met Office Hadley Centre (Reino Unido)	RCA4-MOHC			Velocidad del viento en V a 850 mb (va850).	1980-2005
Max-Planck-Institute Earth System Mode (Alemania)	RCA4-MPI				1980-2005
Norwegian Climate Center's Earth System Model (Noruega)	RCA4-NCC				1980-2005
Earth System Models-Modular Ocean Model (Estados Unidos)	RCA4-GFDL				1980-2005

Tabla 2. Configuraciones utilizadas para el RCA4

Dimensiones de la rejilla (x,y,z)	210X113X40 (confinado para el CAM; ver ANEXO B)
Zona de relajación	10 puntos de malla
Tiempo de vuelco	1 año
Configuraciones físicas	
Radiación	Savijärvi (1990), Sass et al. (1994)
Convección (océano/continente)	Kain and Fritsch (1990, 1993), Kain (2004), Jones y Sanchez (2002)
Esquema de flujo de humedad	Rasch and Kristjánsson (1998)
Procesos de la superficie terrestre	Samuelsson et al., (2006; 2011), Masson et al. (2003)

Finalmente, para corroborar la información regionalizada; en la parte de datos observados se usaron las cartas sinópticas que provee el Centro Nacional de Huracanes (NHC, por sus siglas en inglés) en la página ftp://ftp.nhc.noaa.gov/pub/tafb_misc_maps/. Esta información, que consta solamente de análisis en superficie para el período comprendido de 1999 a 2010, se obtuvo en formato PDF a una resolución temporal de cada 6 horas.

3. Metodología

3.1 Identificación de sistemas frontales a través de datos en malla

El estudio de la identificación objetiva de frentes fríos en México es un tema que aún no ha sido abordado, pese a la gran importancia que representa para el País el paso de estos sistemas. Por su parte, los diversos análisis que se han generado en otras regiones del hemisferio norte y que se han centrado principalmente en cálculos y análisis de gradientes de alguna variable termodinámica, como la temperatura potencial (e.g., Renard y Clarke, 1965; Kirk, 1965), la equivalente (e.g, Steinacker, 1992; Jenker et al., 2010) o de bulbo húmedo (e.g, Hewson, 1998), han mostrado ser buenos trazadores para realizar una identificación fluida y objetiva de estos sistemas en las latitudes medias y altas. Sin embargo, se encontró que en zonas intertropicales no siempre se cumple y su determinación puede interrumpirse en terrenos complejos como lo es México. Por lo tanto, motivados por encontrar una alternativa más intuitiva, factible de programar y de automatizar, pero tomando en cuenta los resultados obtenidos por Simmonds et al. (2012) y Huang et al. (2017) en sus estudios de sistemas frontales asociados a la dirección del viento; se desarrolló un algoritmo que solamente tomara en cuenta el viento, puesto que esta variable es una de las más estables y directas de obtener en los resultados de un modelo, sin generar cálculos extras, que además puedan diferir en métodos para su obtención.

Por su parte el Glosario de Meteorología, de la Sociedad Meteorológica Americana (AMS, por sus siglas en inglés), describe que una zona frontal se distingue también por presentar un importante cambio en la dirección del viento, como resultado del proceso en que una masa de aire frío desplaza a una masa de aire cálido (fig. 1a). Por lo tanto, el análisis del gradiente espacial de la dirección del viento supondría encontrar la solución del límite frontal, dado que justamente en estas regiones es donde la dirección cambia bruscamente con respecto a sus alrededores.

El estudio de gradientes es más complejo de realizar si tomamos en cuenta que la variable de la dirección del viento está distribuida de 0° a 360° en sentido horario (fig. 1c), ya que el gradiente espacial más importante se obtendría justamente de estos dos valores mencionados, cuando en realidad refieren a la misma dirección del viento (componentes del norte; ver figura 1c). Por lo tanto, para poder solucionar este detalle se desarrolló una ecuación que cumpliera

con el objetivo de contrastar correctamente las direcciones opuestas presentes espacialmente durante estos eventos, en este caso para México, aplicado para separar los vientos de componentes del norte contra los del sur (fig. 1b). Dicha ecuación, aquí obtenida experimentalmente a través de la aplicación de la función coseno y nombrada como C_w , se basó en el análisis del campo de la dirección del viento, que asignara un valor de peso ponderado, acorde a un ángulo dado (dirección del viento en grados), teniendo por máximo (valor de 1) la componente del norte y por mínimo (de 0) la del sur (ver figura 2).

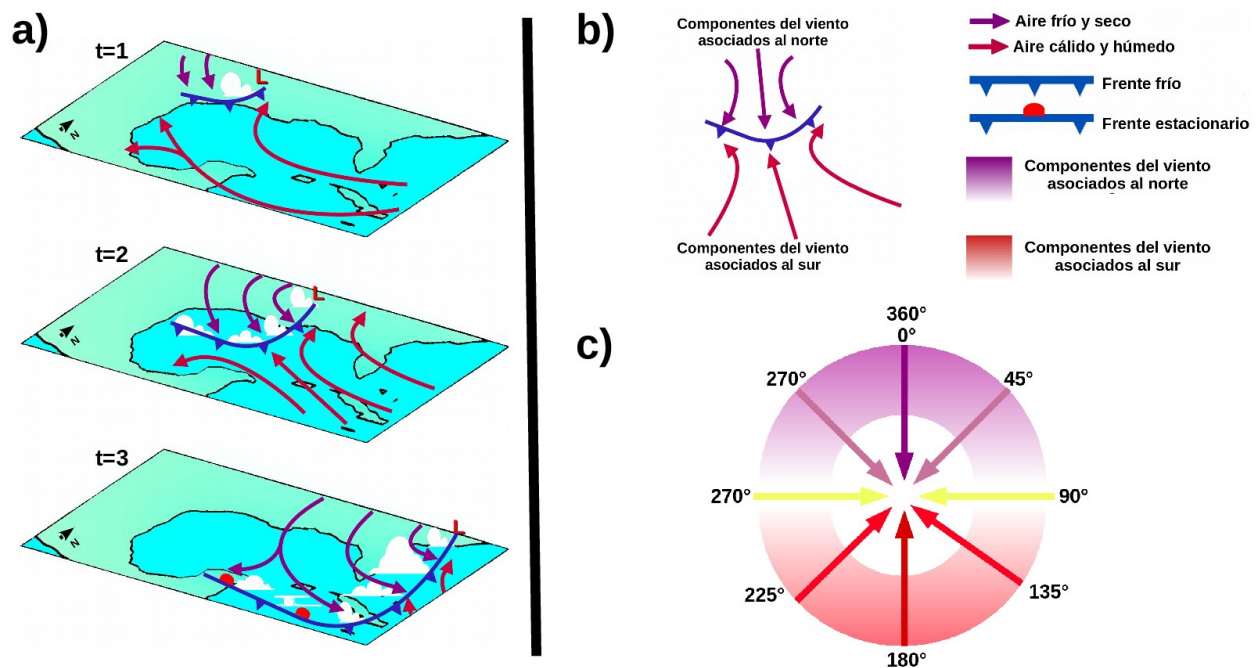
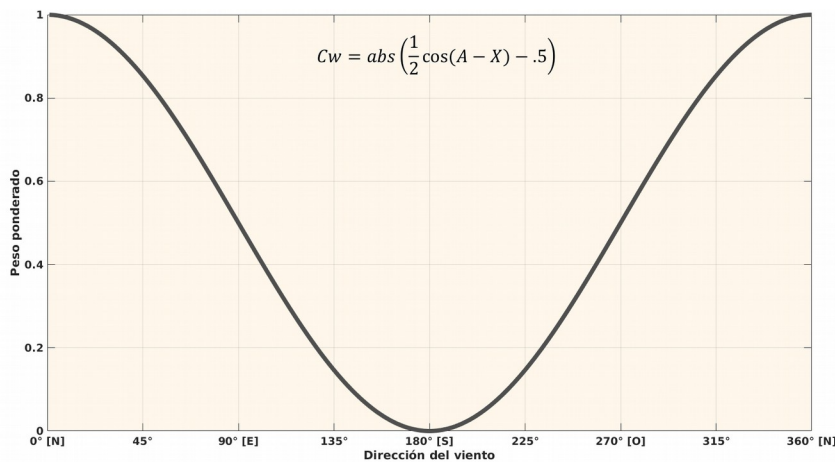


Figura 1. a) Esquema ilustrativo de la secuencia de un sistema frontal típico de los meses de invierno, que muestra su propagación sobre el Golfo de México y alrededores; en ella se destaca el flujo de masa de aire cálido y húmedo característico de la región, que es desplazada paulatinamente por otra de propiedades fría y seca proveniente de Estados Unidos, donde además, la zona frontal activa (pintada con banderas azules) se distingue por ser la región de interfaz en donde tormentas y cambios bruscos en la dirección e intensidad del viento se desarrollan conforme el frente se desplaza hacia regiones aledañas del Golfo y Caribe. Este esquema secuencial se resume en la figura superior derecha (b), con el objetivo de resaltar el contraste espacial en la dirección del viento presente en los límites frontales de estos sistemas, que finalmente es direccionado en la rosa de vientos en la figura inferior derecha (c).

En consecuencia, el paso de un límite frontal no se limita sólo al cambio de la dirección del viento, sino también en su intensidad, y su análisis puede servir de complemento para focalizar frentes fríos. Por consiguiente, una vez contrastados los vientos del norte contra los del sur (C_w), su magnitud a cierta intensidad ($M_w > 12$ m/s) puede brindar un apoyo extra para filtrar zonas de interés, en este caso donde los vientos son importantes. Entonces, aunque C_w y M_w

tienen la capacidad de aislar direcciones y magnitudes del viento, si son aplicados individualmente, es poco probable que en los resultados se pueda discernir algún evento.



Donde:

A = ángulo de la dirección del viento dominante justo tras el paso de la línea frontal.

X = ángulo contrario A ; asociado a los vientos observados antes de la entrada de un sistema frontal.

Figura 2. Distribución de peso ponderado dada la dirección del viento. Los valores son obtenidos de acuerdo a la ecuación C_w .

Sin embargo, en conjunto pueden ser de gran utilidad para identificar sistemas. Entonces definimos la Velocidad de Viento Ponderado (Wws) como una nueva ecuación de filtro, que estará en función tanto de C_w , como de M_w :

$$Wws = M_w^{C_w}; \text{ donde } M_w > 12 \text{ m/s}$$

En este punto, para nuestro estudio, es comprensible que los valores que se obtengan de Wws sean menores que la magnitud del viento observada y, por lo tanto, sean los vientos de mayor intensidad, filtrados para las componentes del norte, los que generen un contraste importante contra los de menor intensidad y de dirección asociado al sur. De esta forma, Wws tiene la capacidad de aislar sistemas que describen patrones tanto en dirección como en intensidad del viento.

En la figura 3, se esquematiza el proceso de identificación objetiva de frentes fríos aplicado a los datos en malla de Era Interim, para el día 22 de febrero de 1999 a las 18z. En ella se observa que para los cálculos de C_w y M_g , el viento a 850mb muestra el desarrollo de dos sistemas ciclónicos de importante escala; uno ubicado al norte del Océano Atlántico, y el otro, sobre continente, en la región sur-centro de Estados Unidos (fig. 3 a-b). Sin embargo, a pesar de que estos importantes sistemas pueden observarse, aquí su captura objetiva se logra al aplicar la ecuación Wws (fig. 3c), que al hacer uso de C_w y $M_w > 12 \text{ m/s}$, se observa que gran parte de los

sistemas locales, o de menor escala, son filtrados, para finalmente conservar aquellos que sí son más uniformes o definidos. Finalmente, el proceso culmina con un análisis de gradientes en Wws , para delimitar las zonas de importantes cambios del viento (tanto en dirección como en magnitud; fig. 3d); por lo tanto se define al Límite Frontal (LF) como $|\nabla \cdot Wws| < K$, donde K queda a consideración del usuario para delimitar la extensión de sistemas frontales.

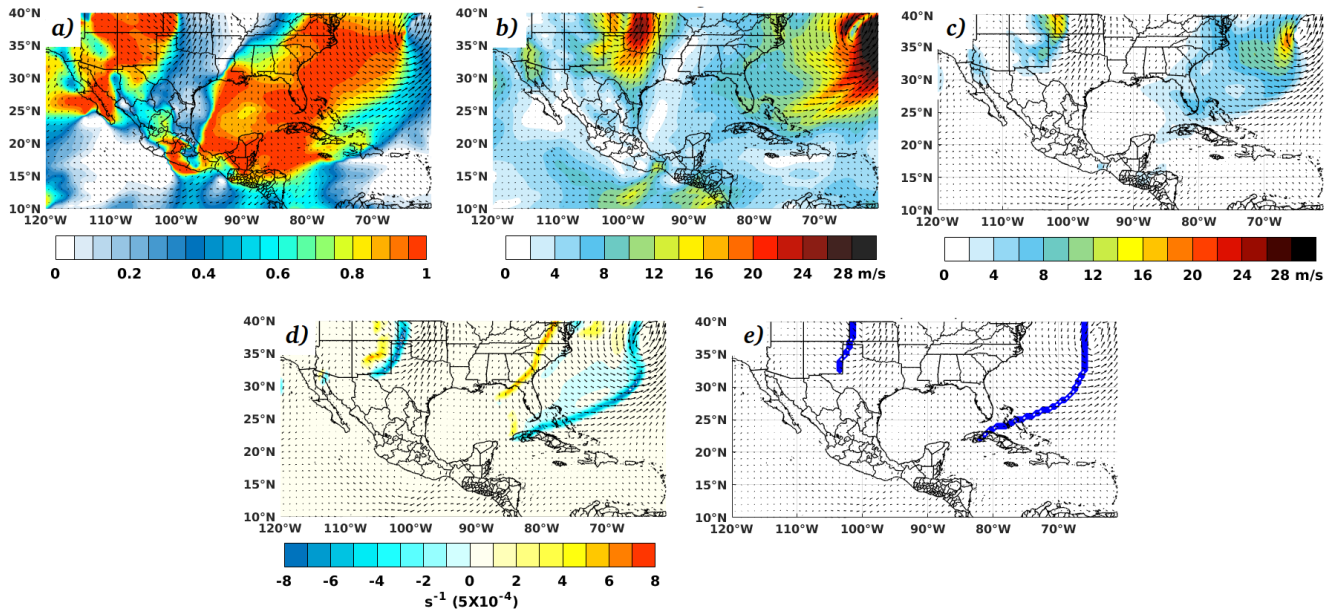


Figura 3. Aplicación de la metodología para la identificación de sistemas frontales, usando datos del viento a 850mb de Era-Interim, correspondiente al 22/02/1999-18z. La metodología se desarrolla en torno a: a) distribución de peso ponderado (Cw) obtenida en función de la dirección del viento, b) magnitud del viento (Mw), c) obtención de Wws , d) el gradiente de éste y f) finalmente la delimitación frontal.

Aunque parte de la delimitación de sistemas frontales culmina con un análisis de gradientes para la Wws ; actualmente reconocer y trazar un frente sinóptico lleva tiempo de estudio, y crear una climatología usando una técnica de identificación automatizada es, por consiguiente, una tarea de gran importancia (Hope et al., 2014). Por lo tanto, partiendo del análisis de LF , mediante diversas técnicas de filtrado y suavizado (aquí implementados por medio de paquetes y programas definidos en Matlab), se generó una base de datos, en donde la información espacial obtenida de $|\nabla \cdot Wws| < K$, quedó expresada en términos binarios; en este caso, 0 en donde no existen valores del cálculo de LF , y de 1, en donde sí existe información, y por lo tanto, se extiende un frente frío (fig. 3e), de esta forma se abrió la pauta para generar la automatización en la identificación objetiva de sistemas frontales, que más adelante se detalla.

3.1.1. Continuidad en la identificación objetiva de sistemas frontales

Como una breve muestra y parte de la evaluación de aplicar la metodología de identificación de frentes fríos, en la figura 4 se presenta el seguimiento de un frente obtenido de los datos de Era Interim y su producto regionalizado por el modelo sueco del Rossby Centre (RCA4-ERA), los cuales fueron puestos a prueba contra lo reportado en las cartas sinópticas del NHC. El análisis corresponde del 4 de enero a las 00z al 5 de enero a las 00z del año 2000,

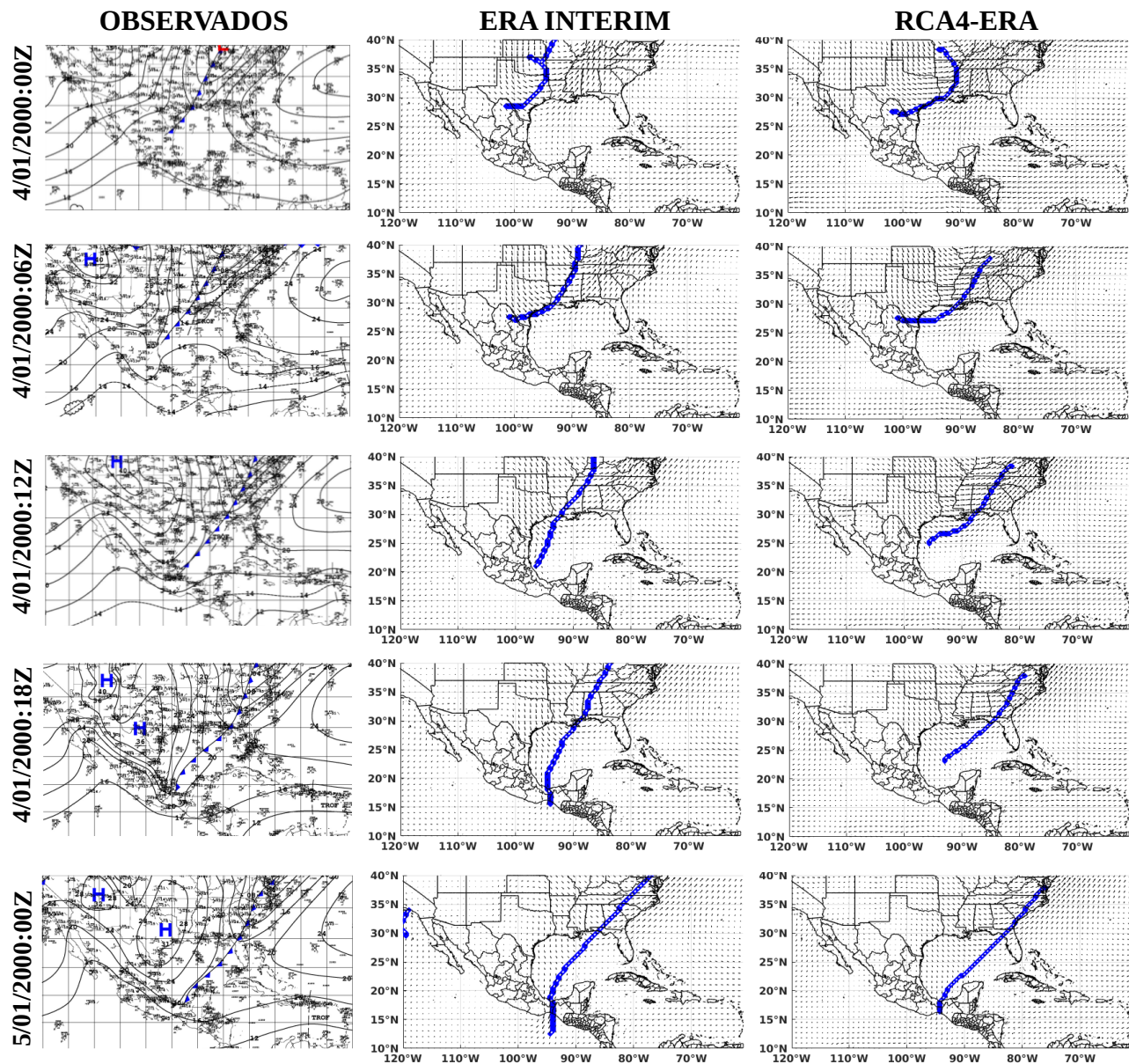


Figura 4. Análisis de carta sinóptica (columna OBSERVADOS), contra lo observado en lo simulado por los datos de reanálisis Era Interim (columna ERA INTERIM) y su regionalizado (columna RCA4-ERA). Fuente de las cartas sinópticas: ftp://ftp.nhc.noaa.gov/pub/tafb_misc_maps/surface/pdf/.

período que, acorde a lo observado por las cartas sinópticas del NHC, un sistema frontal se propagó principalmente sobre el noreste y sureste del País (fig. 4, columna de OBSERVADOS). De manera general, los datos de reanálisis Era Interim (fig. 4, columna de ERA INTERIM) muestran que el sistema frontal reportado en las cartas sinópticas es captado en buena forma y en todo momento durante su desplazamiento, con ligeras discrepancias en el trazo de la posición del frente frío, principalmente cuando éste se marca sobre la Bahía de Campeche el 5 de enero a las 00Z; ya que ERA lo delimita un poco atrás de lo reportado por las cartas sinópticas, por aproximadamente 1° de distancia.

Por su parte el RCA4-ERA (fig. 4, columna RCA4-ERA) también representa adecuadamente la forma espacial del sistema frontal, igual con pequeñas diferencias con respecto a lo observado, que se hacen evidentes entre las 12z y 18z del 4 de enero, al mostrar ligeramente desplazado el sistema frontal fuera de la costa del Litoral del Golfo de México; sin embargo, más tarde éste es correctamente delimitado, con respecto a las cartas sinópticas, el día 5 de enero a las 00z.

Por lo tanto, en este pequeño análisis observacional se concluye que, espacialmente, la metodología tiene la capacidad de hacer un seguimiento continuo de sistemas frontales; lo suficiente como para ser tomada en cuenta como una importante herramienta de identificación objetiva de frentes fríos, aplicable para datos en malla, y en este caso, encaminado para cuestiones climáticas. Entonces la presente metodología tiene el potencial de aplicarse estudios de tiempo meteorológico y pronóstico, siempre y cuando se cuente con las variables adecuadas.

3.2. Extracción de los sistemas frontales reportados por el NHC

Para verificar la información calculada en los modelos atmosféricos, aquí se tomaron los datos del NHC como la fuente observada y oficial. Cada una de las cartas sinópticas, obtenidas en formato PDF, fueron estandarizadas a una misma dimensión espacial (X,Y) en formato PNG, con la finalidad de ser leídas en serie (loop) y así generar una matriz espacio-temporal.

Lo anterior se realizó a través del software matemático Matlab, la cual una vez obtenida la información en matriz, se trabajó con ésta a través de la aplicación de una serie de definiciones y filtros para obtener solamente el trazo referente al frente frío. Aquí se enlistan los pasos más importantes que se realizaron en dicho proceso:

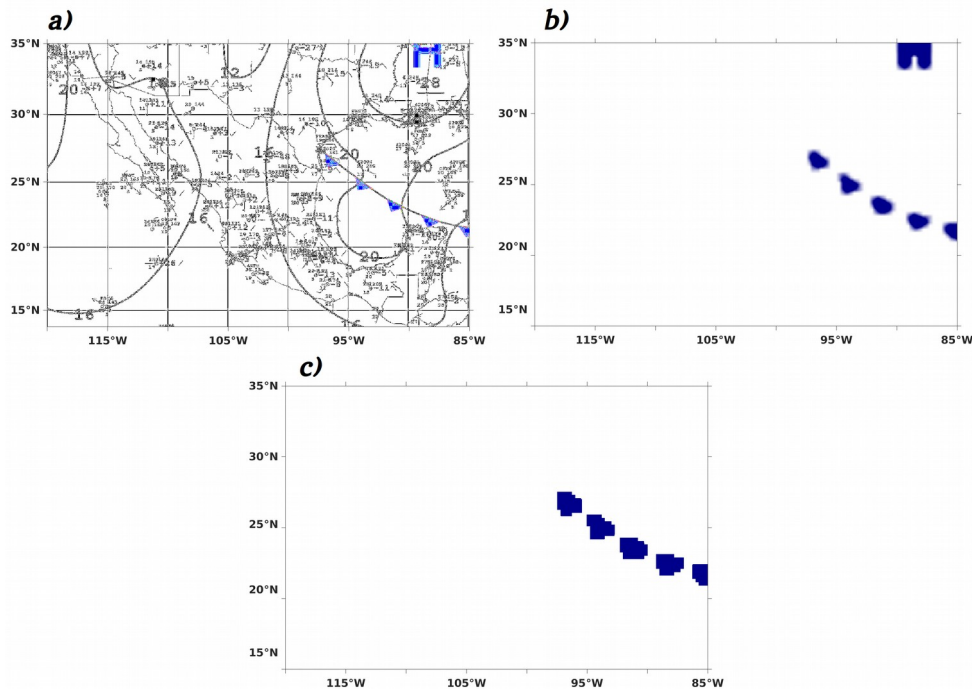


Figura 5. Proceso de a) extracción de información provenientes de las cartas sinópticas, b) de filtro y suavizado de colores azules, y c) filtrado por umbral de pixeles.

- 1) Se asoció el eje espacial que trae por default (X,Y) a una malla de coordenadas longitud y latitud. En este punto la matriz contiene todos los objetos y colores provenientes de las cartas sinópticas (fig. 5a).
- 2) Se aplicó filtro y suavizado de colores, en el que se dejaron solamente aquellos objetos de color azul; ésto, con la intención de aislar los trazos asociados a los frentes fríos. Aquí la matriz contiene solamente objetos de color azul y de fondo blanco (donde no hay información; fig. 5b).
- 3) Dado que no sólo los frentes fríos son remarcados de color azul en las cartas sinópticas (e.g. números y/o símbolos, como las de altas presiones “H”); con una contabilidad y umbral de pixeles, éstos objetos fueron removidos espacialmente. De tal forma que en este punto, la matriz sólo contiene los trazos de los frentes fríos (fig. 5c).
- 4) Finalmente, al igual como se hizo para los datos en malla, la información espacial de la matriz se convirtió a valores binarios; asignando 0 en donde no existiera información, y de 1, en donde existiera límites frontales (i.e., objetos de color azul; fig. 5c).

Es importante entender que los procesos desarrollados, y aquí descritos de forma general, no son exclusivos de un software en específico; y que en la actualidad, existen diversas

herramientas que nos pueden ayudar en la extracción de información meteorológica provenientes de diversas fuentes, e incluso formatos. Por lo tanto, es posible que el lector pueda desarrollar y mejorar las técnica de filtrado y extracción enlistadas anteriormente, y canalizarlo hacia su tema de estudio.

3.3. Áreas de estudio y la contabilidad de sistemas frontales

Debido que la mitad sur de México se caracteriza por ser una región intertropical, y que la región norte ha sido considerada como una zona de transición hacia las latitudes medias de aspecto seco y desértico (e.g., Peel et al., 2007); es de esperarse que la dinámica, y por ende la climatología, durante de los meses del invierno boreal varíe dependiendo de la región tal como se planteó inicialmente. Entonces en consideración a lo anterior, en el presente trabajo se acotaron cuatro zonas de estudio para llevar acabo el seguimiento y contabilidad de frentes fríos, los cuales son definidos y remarcados al pie de la figura 6.

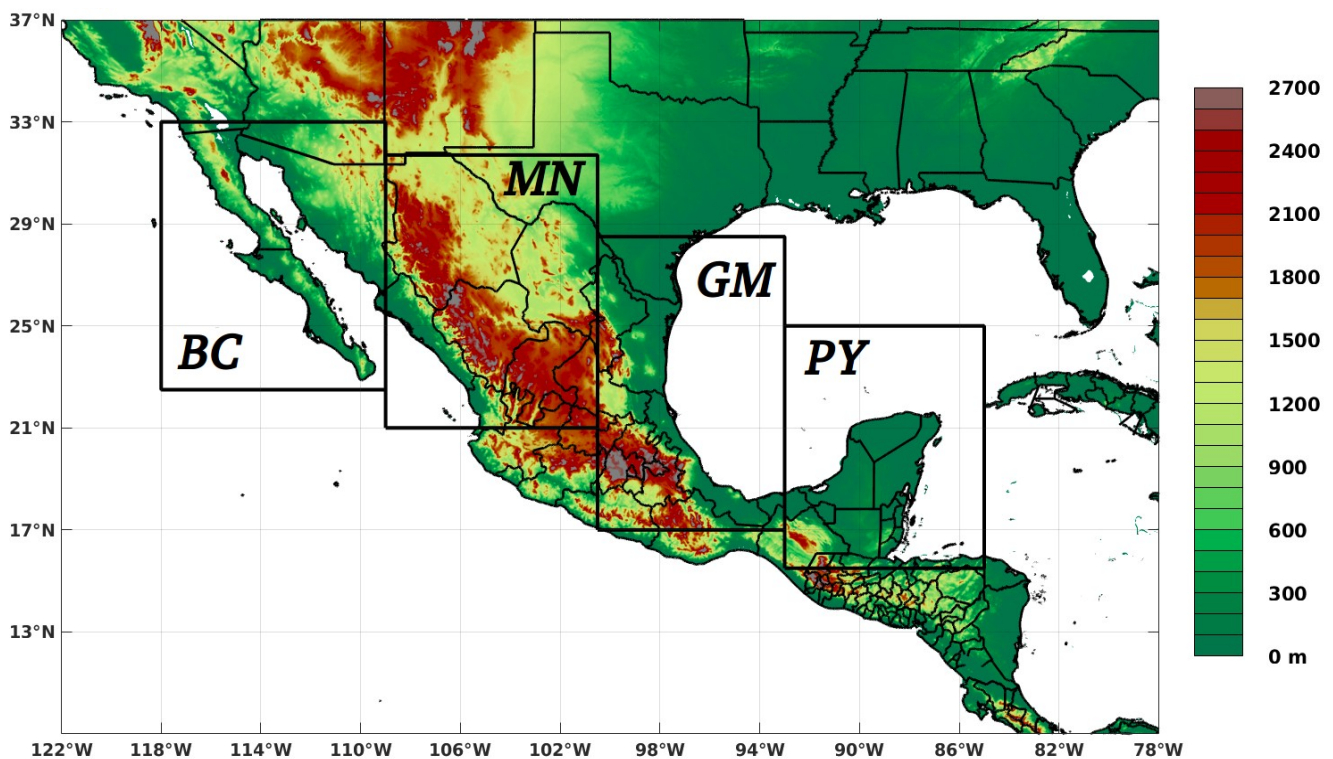
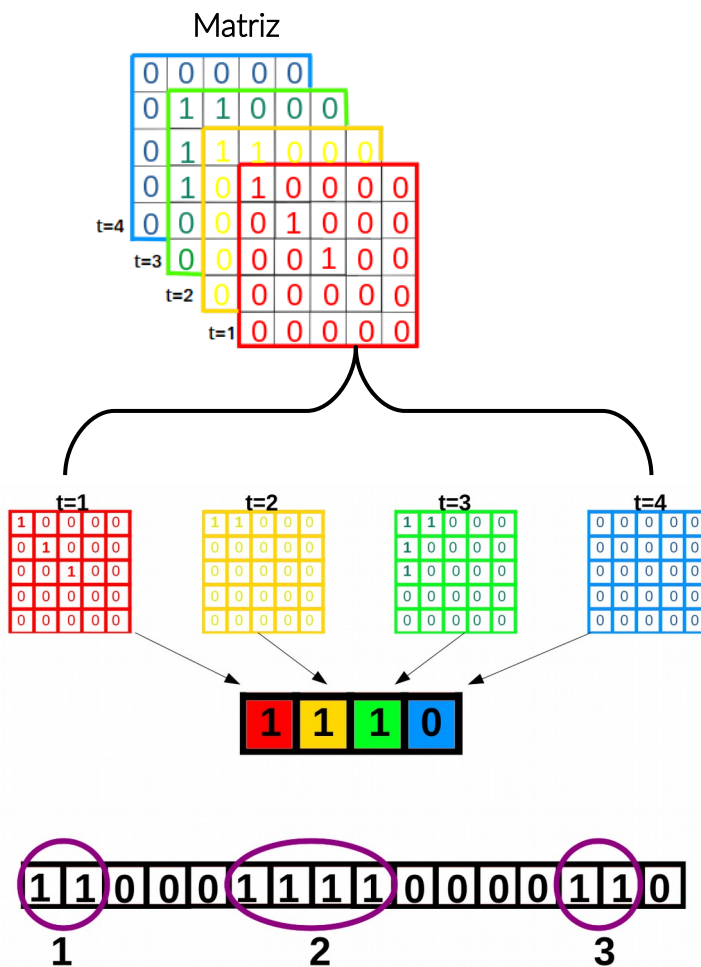


Figura 6. Delimitación de áreas de estudios de acuerdo a las diferentes regiones de México: BC) para la Península de Baja California, MN) para la Mesa del Norte o Altiplano, GM) para el Noreste y Litoral del Golfo de México y PY) sonda de Campeche, Península de Yucatán y extremo occidente del Caribe.

Por otra parte, retomando las matrices obtenidas en los datos en malla y del NHC, se había resuelto que éstos contenían información espacial en formato binario, en donde 1 o 0 indicaban la presencia o ausencia de un frente frío, respectivamente. Ahora bien, dado que es de interés encontrar una forma de contabilizar un frente frío sí éste cruzaba una zona de estudio, independientemente de la longitud del trazo y el ángulo en que éste lo hiciera, se prosiguió a reducir la información espacial, la cual se resume de la siguiente forma: si espacialmente se encontraba el valor de 1 (o varios 1s) para un tiempo dado, éste se reducía a un solo valor 1, en representación a sí existía un frente frío en el dominio; de lo contrario, se asignaba 0. De esta forma se generó un vector de información (también binaria) tras realizar este proceso para todos los tiempos disponibles; finalizando con la contabilidad de frentes fríos al sumar las agrupaciones de 1s obtenidas en el vector.



a. Matriz con información binaria, acotada espacialmente para una determinada área de estudio.

b. Reducción de información espacial: en este proceso, la información espacial para cada tiempo es resumido en un vector; en el cual, basado también en el formato binario, se asignó para cada tiempo el valor de 1, si en el dominio existía información de sistemas frontales, de lo contrario se asignaba 0.

c. Contabilidad de frentes fríos en acorde a la agrupación de 1s hallados en el vector resultante.

Figura 7. Esquema ilustrativo del proceso desarrollado para obtener la contabilidad de frentes fríos por dominio.

En la figura 7 se muestra un esquema que ilustra el proceso descrito en el párrafo anterior:

- a) El análisis comienza con una matriz que contiene información binaria en su dimensión espacial (x,y) para cuatro tiempos consecutivos (i.e., de $t=1$ a $t=4$; fig. 7a).
- b) El ejemplo continúa con la reducción de información espacial, que consta de encontrar 1s en el dominio para cada uno de sus tiempos; en este punto se observa que, al desplegar nuestra matriz temporal para ver su contenido de manera detallada, los primeros tres tiempos cuentan con información acerca de la posición de sistemas frontales, puesto hay diferentes 1s distribuidos espacialmente por el dominio; mientras que para $t=4$, se observan solamente 0s. Por lo tanto, dicha información es condensada secuencialmente en un vector; asignando 1 para los primeros tres tiempos dada la existencia de un frente frío en el dominio, y 0 en el cuarto tiempo, en donde por completo no se halló sistema frontal alguno, o sea 1s (fig. 7b). De manera que finalmente se obtiene un vector de información binaria.
- c) El esquema ilustrativo de la figura 7 finaliza con la contabilidad de los sistemas frontales que pasaron sobre el dominio de interés, el cuál se realizó sumando el número de grupos de 1s hallados en el vector resultante, obtenido de la reducción de la información espacial para todos sus tiempos (fig. 7c).

Finalmente se cierra este capítulo de metodologías, enfatizando la importancia de sus desarrollos y aplicaciones como herramientas de apoyo en la detección de frentes fríos a través de los datos de malla; los cuales al implementarlos, fueron una pieza clave para iniciar el estudio de la dinámica atmosférica, que se detalla en la siguiente sección.

4. Resultados y discusiones

4.1. Ocurrencia de eventos frontales a lo largo del año y otras estadísticas

El análisis comienza con la evaluación de ciclos anuales, i.e., con el promedio de número de frentes fríos contabilizados mensualmente para el período 2001-2010 (fig. 8); en él se nota que, para la mayoría de los dominios acotados, el máximo de estos eventos se da principalmente en los meses del invierno, variando ligeramente la información observada OBS-NHC acorde a la región de enfoque. Por ejemplo, para la BC éste se presenta durante los meses de enero, en tanto que para GM y PY en diciembre.

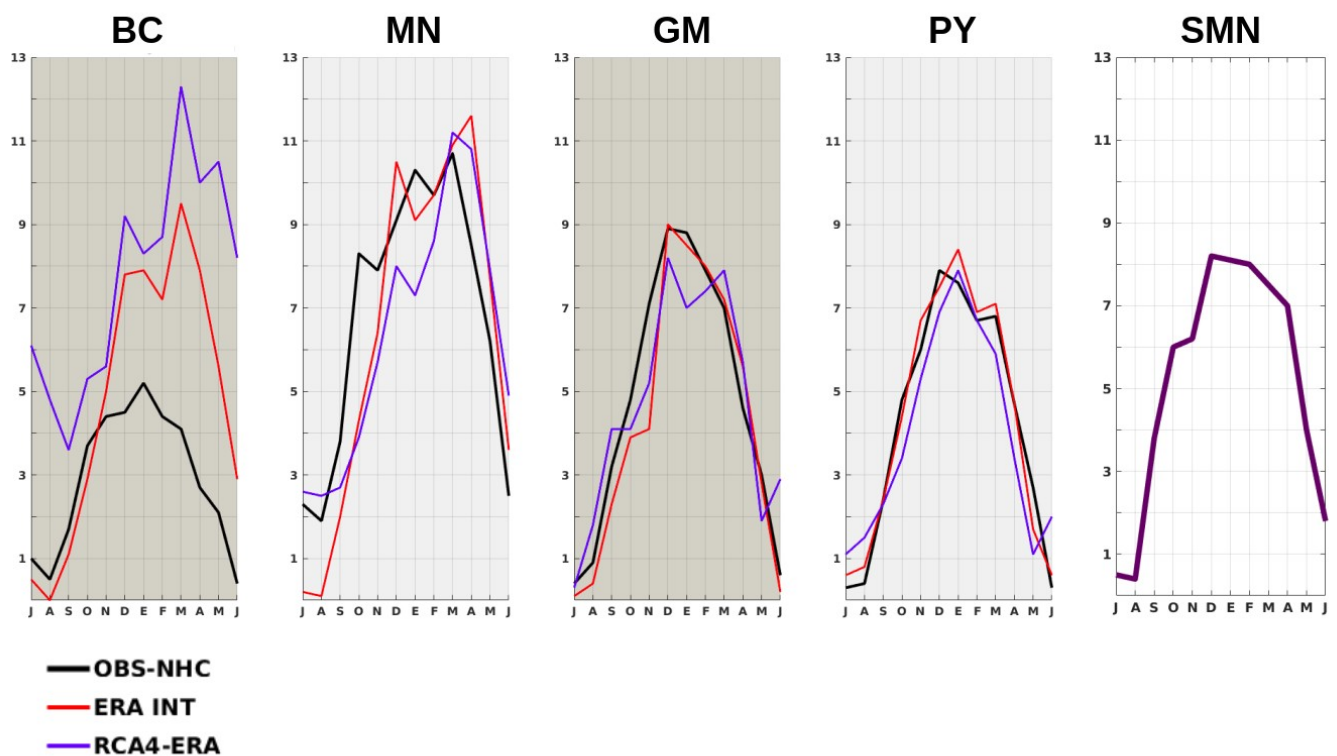


Figura 8. Ciclos anuales de frentes fríos obtenido del período 2001-2010 para las regiones de BC, MN, GM y PY; mientras que para la media nacional (SMN), de 1991-2014.

Por su parte, la información obtenida del producto regionalizado RCA4-ERA y del reanálisis de ERA-INT muestran el comportamiento descrito por la OBS-NHC: destacando las regiones del GM y PY por presentar cualitativamente los menores sesgos (del orden de 1.5 a .5 frentes fríos por mes), seguido por la MN en donde éste comienza a ser importante (de hasta 3 frentes fríos por mes, como se observa para los meses del otoño) y finalizando con la región de BC, por ser más pronunciados; en donde además se observa que en esta última región hay un

desfase en el máximo de frentes fríos, el cual para los dos modelos éste ocurre en los meses de la primavera, en tanto que para lo observado se da en los meses del invierno.

Dichas características generalizadas también se pueden observar comparativamente en el gráfico que provee el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el período 1991-2014; que a pesar del desfase de fechas y su cobertura nacional, la información se puede utilizar para sustentar algunas características del perfil del número de frentes fríos que se puede presentar en México mensualmente durante el transcurso del año. En este sentido, se observa que el máximo reportado por el SMN se da en los meses del invierno, específicamente en diciembre, mientras que el menor número de sistemas se presenta durante los meses del verano (junio, julio y agosto). Esta información es consistente con respecto a la parte observada del OBS-NHC, que con un enfoque también cualitativo, provee un buen panorama en la aplicación de la metodología para la extracción de sistemas frontales por región y su contabilidad (ver sección 3.2); destacando en este punto las regiones GM y PY del OBS-NHC por mostrar una gran similitud a la gráfica del SMN.

Algunos estudios, indirectamente relacionados con la contabilidad y/o estadística de sistemas frontales que afectan a México, han señalado que justamente los meses del invierno se caracterizan por presentar una alta frecuencia en la incursión de masas de aire frío proveniente de Estados Unidos (e.g., DiMego et al., 1976; Henry, 1979; Reding, 1992). En dicha caracterización, destacan los estudios de DiMego et al. (1976), que describen justamente los inviernos como los meses de mayor frecuencia en número de eventos frontales y los veranos como los de menor actividad; además, puntualizan las regiones del norte del Golfo de México y noreste (incluida buena parte de la MN) del País como las zonas de mayor presencia de estos sistemas, comparado con las regiones de la Península de Yucatán y zonas del Caribe. Dichos perfiles, aportan sustento en los resultados aquí obtenidos; sin embargo, para la región de BC no queda explícito un punto de comparación, ya que el perfil del ciclo anual de frentes fríos para esta zona no ha sido abordado ni directamente, ni indirectamente; y con respecto al SMN, su contabilidad viene generalizada para todo México, y no por dominio.

Si bien el análisis comparativo de las regiones MN, GM y PY muestran importantes similitudes entre los datos observados y modelados; lo cierto es que en para la BC no es así, ya

que la información OBS-NHC es completamente diferente al resto de lo visto en los dominios, incluso como para ser comparado, ya sea con la parte simulada o la reportada por el SMN.

Ahora bien, para comprender la diferencia mencionada es importante analizar la topografía de la región. En este caso, la zona seleccionada para la BC está centrada en su mayoría sobre los estados de Baja California, así como gran parte de Sonora; mismos que se encuentran separados del Altiplano Mexicano por una gran cadena montañosa que se extiende hasta la región suroccidental de Estados Unidos (ver figura 6). Esta cadena, nombrada Sierra Madre Occidental, es la causante de evitar el paso de la mayoría de sistemas frontales que se desarrollan al norte del País (Schroeder y Buck, 1970); puesto que en efecto, por su altura generalizada (de más de 2300 metros sobre el nivel medio del mar), funge como una gran barrera natural que limita el paso de las masas de aire frío continental que se dan desde los Estados Unidos y Canadá con desplazamiento hacia el occidente de México. Además, es de esperarse que, debido a la ubicación de la región acotada para BC, sean las masas de aire frío marítimo del Pacífico norte las que también influyan en la región. Por lo tanto, el resultado se ve reflejado en un mayor número de sistemas frontales que ingresan sobre las regiones del Altiplano y Golfo de México, y en menor cantidad, sobre la BC (fig 8; línea OBS-NHC).

Entonces, la información que se ha obtenido de la OBS-NHC ha mostrado ser correcta, y de apoyo, para evaluar el desempeño de los modelos RCA4-ERA y ERA-INT, cuyos resultados, son además lo suficientemente buenos como para ser usados de referencia y así analizar las habilidades de los demás modelos regionalizados por el RCA4. En refuerzo a ello, en la figura 9 se provee la contabilidad del número de frentes fríos que se dieron para el período noviembre-abril de 2001 al 2010, en donde se nota que la diferencia entre la parte observada y lo simulada es pequeña en las regiones de PY y GM, ya que son bastante similares entre ellas mismas. Por su parte, para la región MN se observa que ERA-INT es la curva que más se aproxima a la parte reportada por la OBS-NHC, pues presenta importantes sesgos con tendencia a sobrestimar, principalmente en los años 2001 y 2007; en tanto que para la descrita por RCA4-ERA, su tendencia es más la de subestimar. Por último se tiene la gráfica para la región de BC, que en términos generales muestra que el número de frentes fríos reportado por temporada por la OBS-NHC ronda entre los 20 y 25; valores notablemente inferiores a lo simulado por ambos

modelos, los cuales se encuentran de manera generalizada entre los 45 frentes fríos por temporada.

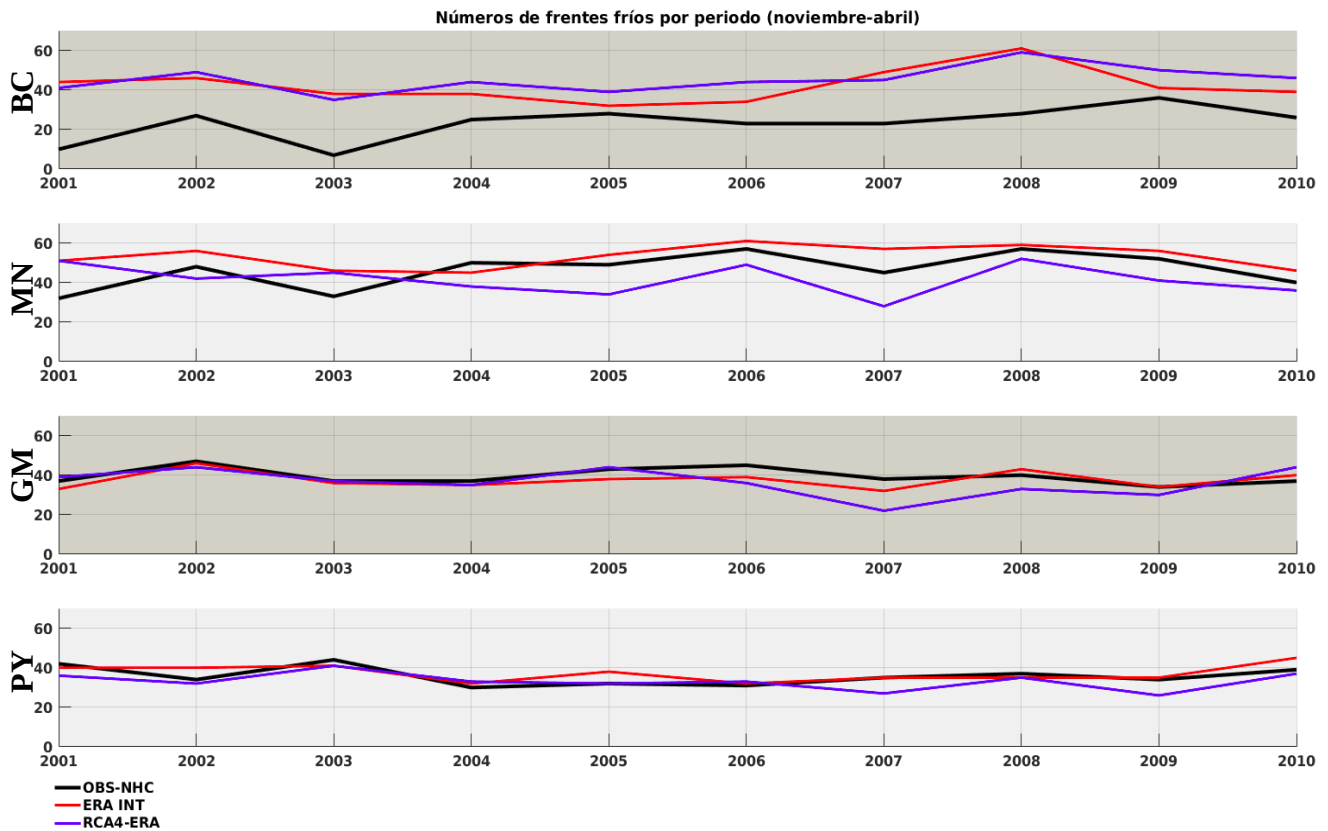


Figura 9. Número de frentes fríos contabilizados por periodo (noviembre-abril), de 2001 al 2010 para cada una de las regiones acotadas.

Ahora, para la parte OBS-NHC en la figura 9, se nota que el número de sistemas frontales para la región de la BC es inferior al ser comparada con la zona adyacente de la MN; ya que de manera generalizada, en esta primera los sistemas contabilizados se ubican entre los 20 y 25, en tanto que para la segunda, ronda los 45 sistemas por temporada. Estos resultados, meramente descriptivos, muestran los primeros indicios acerca de la dinámica que se desarrolla en México; en este caso, basados en la OBS-NHC, que nos apunta que la región BC se caracteriza por contar con una menor presencia de sistemas frontales durante el invierno, en comparación a las demás regiones.

Con respecto a la parte simulada, ERA-INT ha tendido a sobrestimar ligeramente las regiones PY, GM y MN, manteniendo el menor sesgo en referencia a la OBS-NHC (fig. 9), lo que se puede ver reflejado en la figura 10a, al presentar una importante correlación en dichas

regiones, del orden de 0.6 a 0.8; en tanto que al comparar el RCA4-ERA contra OBS-NHC, se observa que el modelo regionalizado se caracteriza por subestimar (fig. 9), también presentando importantes correlaciones, del orden de 0.6 a 0.8, en las regiones de PY y BC, y de 0.4 a 0.6 en el GM (fig. 10a). Sin embargo, ambas partes simuladas, en general mantienen un perfil bastante consistente al comportamiento descrito por la OBS-NHC. Finalmente, se concluye que para la BC, la parte simulada ha mostrado un claro perfil de sobrestimar el número de sistemas frontales; ya sea en los ciclos anuales (fig. 8) o para la parte contabilizada de frentes fríos por año (fig. 9). Sin embargo, es justamente, para éste último caso, en donde el RCA4-ERA generaliza un perfil bastante parecido a la del OBS-NHC, dado que presenta correlaciones que rondan los 0.6 (fig. 10a).

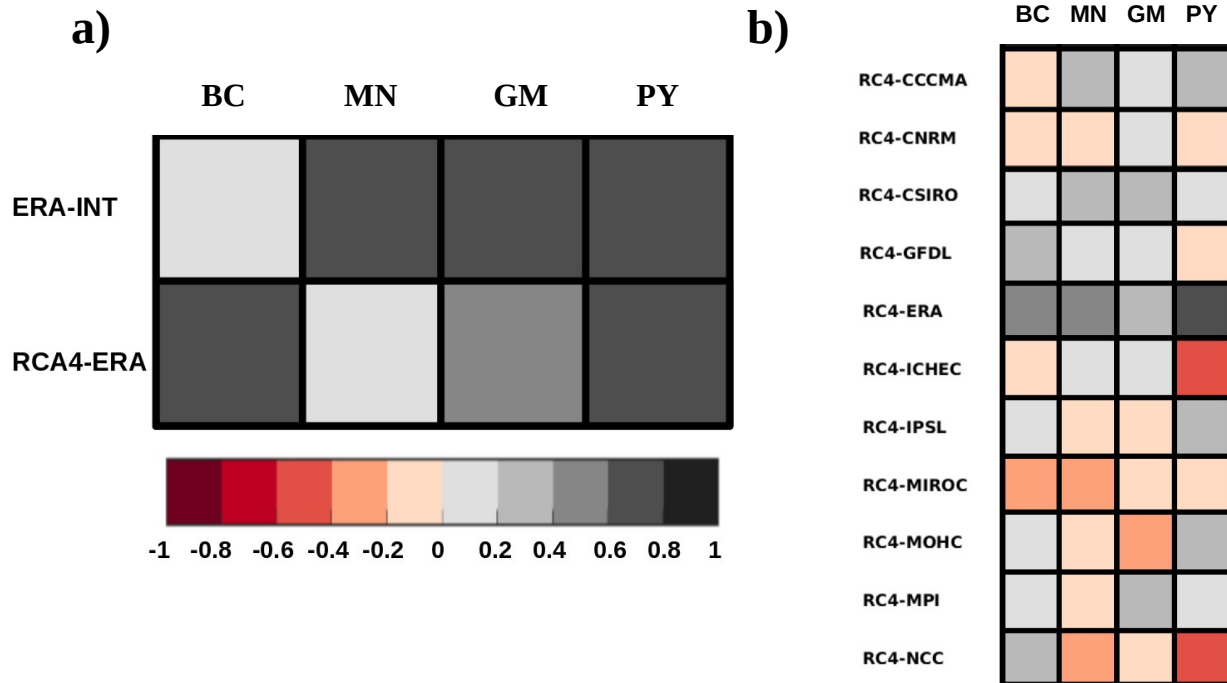


Figura 10. Correlaciones obtenidas a) del período 2001-2010 para ERA-INT y RCA4-ERA contra OBS-NHC; y b) del período 1981-2005 de todos los modelos regionalizados por el RCA4 contra ERA-INT.

Lo discutido anteriormente para la región de la BC plantea nuevamente la pregunta, -sí estos problemas de sobreestimación por parte de los datos simulados son debidos a un detalle interno relacionado con la dinámica de los modelos, o si en efecto, se relacionan con la

metodología desarrollada; ya que para ambas partes simuladas (ERA-INT y RCA4-ERA), parecieran no resolver correctamente la dinámica de los sistemas frontales que se da sobre la región occidente de México-. Por lo pronto se continúa con el análisis en curso, aunque más adelante se irá abordando. Ahora bien, tomando en cuenta que ERA-INT ha resuelto con buen desempeño la representación de sistemas frontales, junto con su parte regionalizada (fig. 10a); éste primero será tomando de referencia en el estudio para evaluar el trabajo de los demás modelos regionalizados.

La figura 10b muestra la correlación de sistemas frontales contabilizados para el período 1981-2005, obtenido para todos los modelos regionalizados por el RCA4 con respecto a ERA-INT. En ella se observa que el RCA4-ERA es el que muestra el mejor índice de correlación positiva en todos sus dominios, el cual varía de 0.4 hasta 0.8, dependiendo de la región de enfoque. Por su parte, otro modelo que ha mostrado tener índices positivos para todos sus dominios, es el CSIRO, con valores ligeramente inferiores a los hallados en el RCA4-ERA, al presentar índices del orden de los 0.4; en tanto que, modelos como RCA4-CCCMA, RCA4-GFDL o RCA4-MPI, han mostrado tener buenas correlaciones, del orden de 0.4, en la mayoría de sus dominios.

Tabla 3. Desviaciones estándar de ERA-INT y todos los modelos regionalizados por el RCA4, obtenidos para el período 1981-2005.

	BC	MN	GM	PY
ERA-INT	7.5	7.02	4.69	5.89
RCA4-ERA	6.91	6.08	5.2	4.82
RCA4-CCCMA	4.94	5.83	5.74	6.31
RCA4-CNRM	5.62	5.72	4.97	4.41
RCA4-CSIRO	4.42	6	6.76	4.16
RCA4-GFDL	6.9	6.97	7.22	5.69
RCA4-ICHEC	5.81	5.07	5.26	5.05
RCA4-IPSL	7.11	5.69	5.86	7.04
RCA4-MIROC	5.73	5.49	7.92	5.83
RCA4-MOHC	5.34	6.64	5.23	4.88
RCA4-MPI	6.64	8.25	7.47	6.32
RCA4-NCC	4.61	6.46	6.22	7.17

En un análisis adentrado por región, para la BC se observa que los modelos RCA4-GFDL, RCA4-ERA, RCA4-IPSL y RCA4-MPI, además de presentar una correlación positiva (fig. 10b),

éstos también cuentan con valores cercanos de desviación estándar a la descrita por ERA-INT (tabla 3); por lo tanto, son justamente éstos modelos los que han tendido a representar el número de sistemas frontales por temporada, en el período 1981-2005, de manera, si bien no igual, con un comportamiento en serie y distribución similar a la ERA-INT. De la misma forma, para la región MN se nota que son los modelos RCA4-CCCMA, RCA4-CSIRO, RCA4-GFDL y ERCA4-ERA, los que además de presentar correlaciones positivas (fig.10b), también presentaron valores de desviación estándar cercanos a ERA-INT (tabla 3). En tanto que para la GM, dichas condiciones se cumplen para los modelos RCA4-CCCMA, RCA4-CNRM, RCA4-ERA, RCA4-ICHEC; y finalmente, para la PY los modelos RCA4-CCMA, RCA4-ERA, RCA4-MOHC y RCA4-MPI.

Si bien, un estudio detallado entre los diferentes modelos regionalizados puede ser considerado como la parte esperada dentro de esta clase de análisis, lo cierto es cada uno de ellos cuenta con una propia dinámica, que deriva de las ecuaciones, acoplamientos y parametrizaciones físicas con las que está sustentado cada uno de ellos; por lo tanto, aquí se discute como éstos productos se relacionan de manera importante con respecto a la parte observada; en este caso, al comparar ERA-INT contra la fuente observada del OBS-NHC, y posteriormente para los diferentes modelos regionalizados contra ERA-INT. Ahora bien, en un análisis adentrado a la dinámica de cada uno de ellos, y de forma individual, puede obtenerse más información relacionada con la dinámica espacial de cada uno de los modelos regionalizados; y en este caso, obtener conocimiento de las regiones que se relacionan con la actividad de sistemas frontales en México.

4.2. Correlación entre la actividad de sistemas frontales y la TAS

En la figura 11 se presenta la correlación espacial para cada uno de los modelos, obtenida entre el número de sistemas frontales contabilizados dentro de la región BC, contra el promedio de la temperatura superficial del aire (TAS) para todo dominio del CAM; ambos cálculos, definidos anualmente para el período noviembre-abril, de 1981 al 2005. En ella se observa que para ERA-INT, la actividad de sistemas frontales que se desarrolla en la BC está positivamente correlacionada (por 0.4 a 0.6), con la evolución de la TAS que se genera sobre la región centrada latitudinalmente entre los 0°-15°S y longitudinalmente de 80°W-120°W, en el Océano Pacífico;

siendo ésta, la zona que más destaca espacialmente, con respecto a todo el dominio del CAM. En tanto que, para regiones continentales, no es discernible la existencia de amplias regiones de correlaciones espaciales positivas que pudieran mostrar una relación importante entre la actividad de sistemas frontales de la BC con la TAS.

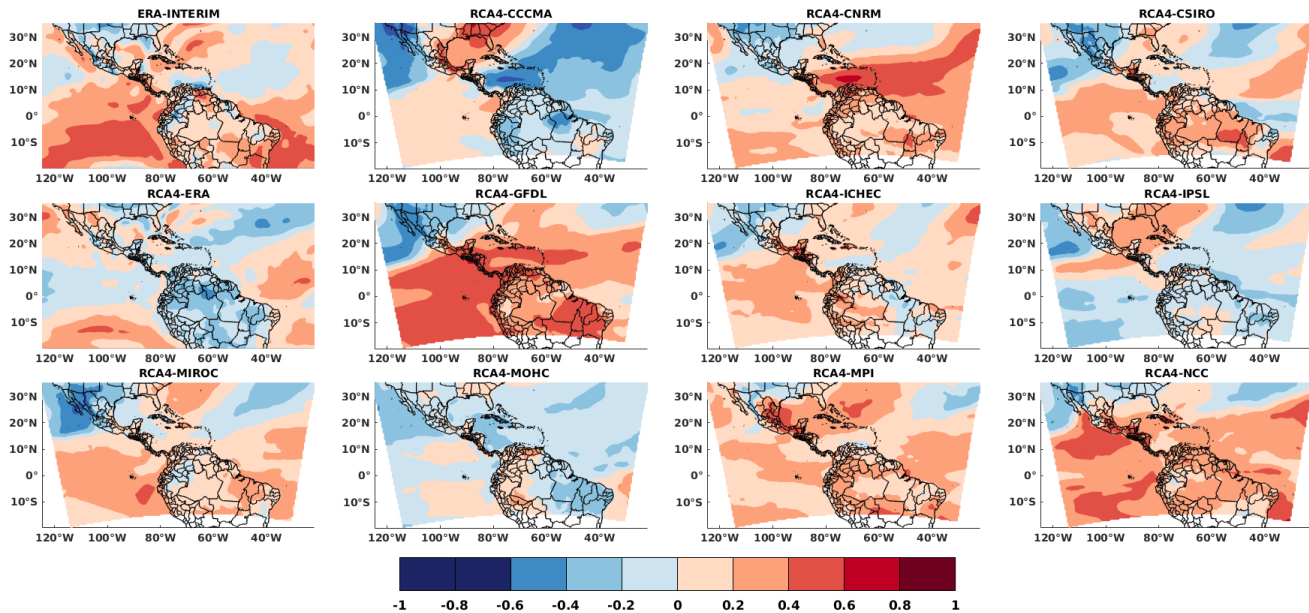


Figura 11. Correlación espacial entre el número de sistemas frontales calculados para la BC y la temperatura superficial promedio del dominio CAM; ambas obtenidas para período noviembre-abril, de 1981 al 2005.

Con respecto a la parte de los modelos regionalizados; se nota que el RCA4-ERA apunta a la región confinada entre los 10°S - 15°S y 80°W - 120°W , como la de mayor correlación positiva entre el número de sistemas frontales que se da en la BC y la TAS. Por su parte, el RCA4-GFDL, es otro de los modelos que ha presentado el perfil de mayor correlación positiva entre el número de sistemas frontales y la TAS, sobre la región del Océano Pacífico, aunque para este caso, son justamente las zonas Intertropicales y Ecuatorial las que presentan dicha correlación del orden de los 0.4-0.6. Otros modelos, como el RCA4-CSIRO, RCA4-ICHEC, RCA4-MIROC o el RCA4-NCC, han presentado un perfil bastante parecido entre si, en donde las correlaciones espaciales positivas más importantes apuntan sus desarrollos sobre la región del Pacífico, en las inmediaciones Intertropicales y Ecuatorial; aunque para estos casos, la correlación es menor que las descritas anteriormente (del orden de 0.2, hasta 0.4). Sin embargo, y como observación final, hay otros modelos que muestran una dinámica diferente a las ya mencionadas: tales como el RCA4-CCMA, RCA4-IPSL y RCA4-MPI, cuyos sistemas frontales acotados para la BC se

correlacionan positivamente con la TAS de las regiones del Golfo de México y alrededores; el RCA4-CNRM, cuya correlación más importante se da sobre el Caribe y zonas tropicales de Atlántico; e incluso, el RCA4-MOHC, en donde los valores de las correlaciones espaciales no son tan marcadas como para definir o señalar zonas de interés.

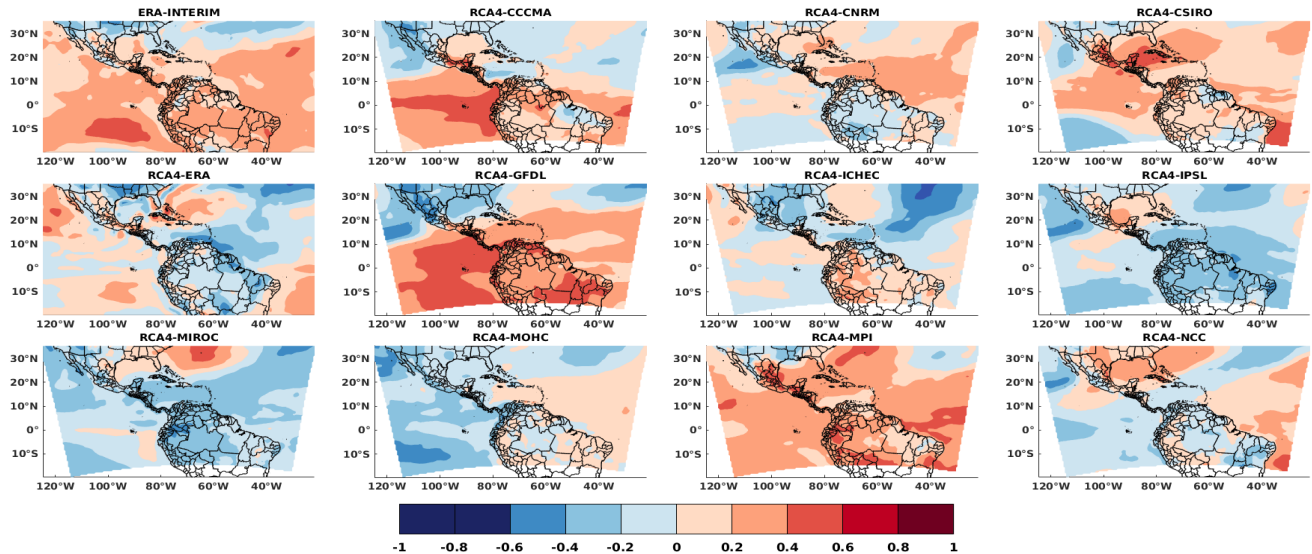


Figura 12. Correlación espacial entre el número de sistemas frontales calculados para la MN y la temperatura superficial promedio del dominio CAM; ambas obtenidas para período noviembre-abril, de 1981 al 2005.

El mismo análisis es realizado también para la región de la MN (fig. 12); en donde se explora nuevamente las zonas de correlación entre el número de sistemas frontales, ahora calculados en la región de la MN, contra la TAS del dominio del CAM. En la figura 12 se observa que, para ERA-INT, la principal región asociada positivamente con el número de sistemas frontales que se da en la MN, se centra sobre el Pacífico, i.e., entre los 5°S-15°S y los 80°W-115°W, cuyo valor de correlación espacial se ubica entre los 0.4 y 0.6; el cual muestra ser menor en extensión que lo observado anteriormente por ERA-INT para la región de la BC.

Por su parte, en este caso son los modelos RCA4-CCCMA, RCA4-ERA, RCA4-GFDL y en menor manera el RCA4-MPI, los que destacan por presentar características similares al perfil espacial descrito para ERA-INT, puesto que las zonas de mayor correlación para éstos (del orden de 0.4, hasta 0.6), se ubican principalmente a lo largo de la zona Ecuatorial y partes aledañas, del Océano Pacífico. En tanto que, modelos como RCA4-CNRM, RCA4-ICHEC, RCA4-IPSL, RCA4-MIROC y RCA4-MOHC muestran entre sí, un perfil totalmente diferente al del ERA-INT; al presentar, además, una correlación espacial negativa para gran parte del dominio del CAM.

En la figura 13a, se presenta el mismo análisis de correlaciones, referido al dominio del GM, en el cual se observa que también para este caso (ERA-INT), el número de sistemas frontales contabilizados mantiene una correlación positiva (del orden de 0.4 a 0.6) con la zona

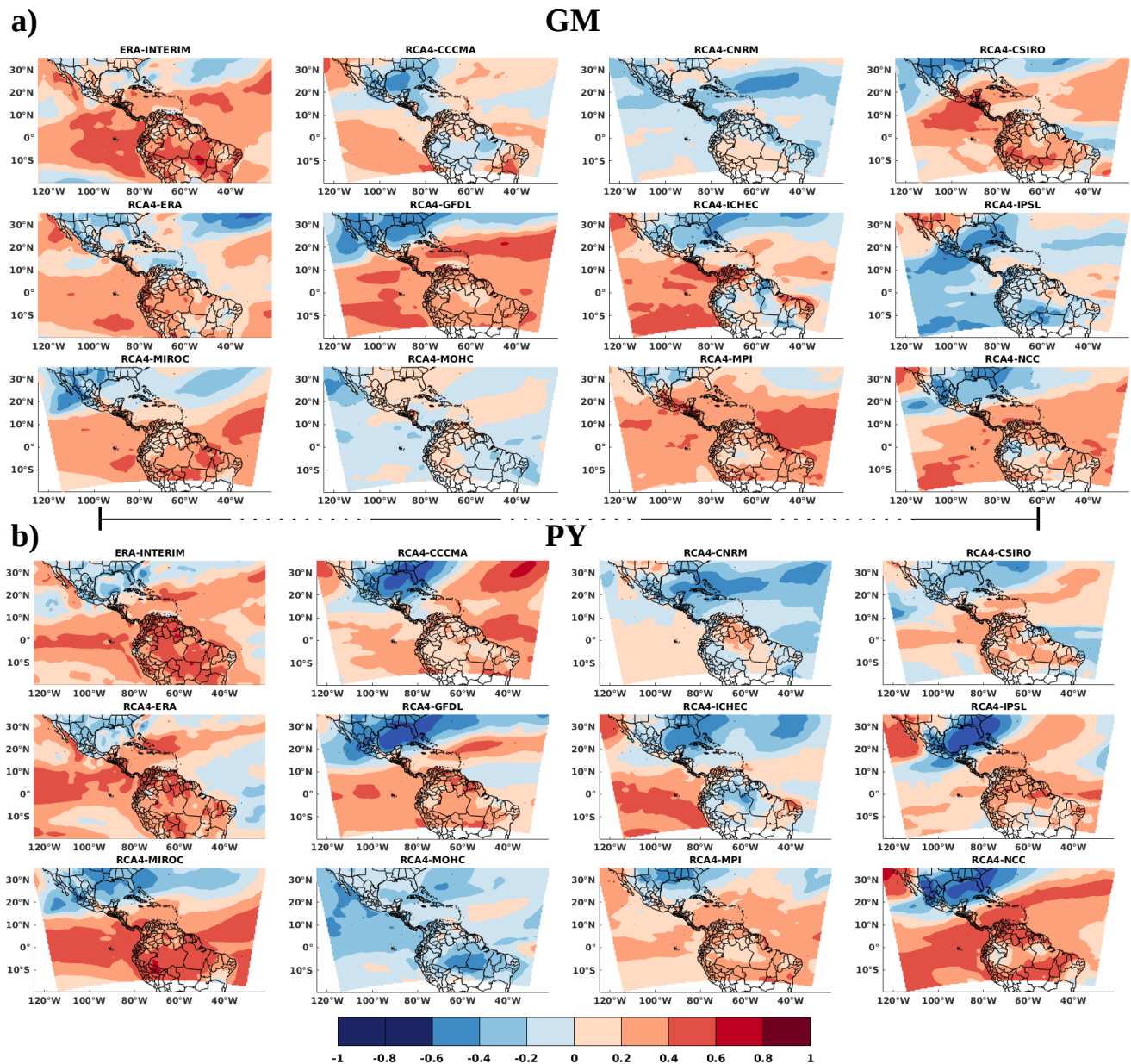


Figura 13. Igual que en la figura 12, pero para a) GM y b) PY.

Ecuatorial del Océano Pacífico y zonas adyacentes; perfil que es también observado en los modelos regionalizados del RCA4-CCCMA, RCA4-CSIRO, RCA4-ERA, RCA4-GFDL, RCA4-ICHEC, RCA4-MIROC, RCA4-NCC y, en menor grado, RCA4-MPI, que con algunas variantes en la posición y distribución espacial, éstos tienden a señalar la región del Pacífico Ecuatorial y

zonas aledañas, como la región en donde la TAS se correlaciona significativamente con la frecuencia de sistemas frontales que se desarrolla en México, y en este caso, referido al dominio de la GM. Misma situación es observado nuevamente para la región acotada de PY (fig. 13b); que para este caso, son los modelos RCA4-CCCMA, RCA4-CSIRO, RCA4-ERA, RCA4-GFDL, RCA4-ICHEC, RCA4-MIROC, RCA4-MPI y RCA4-NCC, los que han tendido a presentar cierta similitud con respecto a ERA-INT.

En resolución, se ha observado que el número de sistemas frontales que se desarrolla en México presenta una correlación importante con el comportamiento de la TAS de las regiones Ecuatoriales, en este caso centrado en el Océano Pacífico, en acorde a ERA-INT; sin embargo, muchos de los modelos regionalizados, independientemente de la región de enfoque, mantuvieron un perfil espacial similar al del reanálisis. Por lo tanto, si existe dicha correlación, lo consiguiente sería investigar las características térmicas que se presentan en mencionada región de interés durante el desarrollo de estos eventos; y así establecer de manera concreta cómo la TAS se vincula específicamente con el aumento o la disminución en la actividad de los sistemas frontales en México.

4.3. Anomalía de la TAS

4.3.1. Anomalía de la TAS para los tres años con eventos frontales más activos

En acorde a lo discutido anteriormente, en la figura 14 se presenta para cada modelo, las características espaciales de las anomalías en la TAS del CAM, considerando los tres años con más registros de frentes fríos dentro la BC. En ella, se observa que en ERA-INT, cuando en la región de la BC se presentan temporadas de sistemas frontales muy activos, destaca una región que se caracteriza por ser anómalamente más cálida (del orden de 1.2 hasta 2°C) que el resto del CAM, ubicada entre los 20°N-15°S y los 80°W-120°W, misma que había sido referida anteriormente como aquella zona de mayor correlación positiva, entre el número de sistemas frontales que se desarrolla en la BC y la TAS. De la misma forma, se puede notar que dicho patrón térmico superficial se tiende a observar en los modelos regionalizados RCA4-CSIRO, RCA4-GFDL, RCA4-MIROC, RCA4-MPI y RCA4-NCC, en donde las anomalías en estos casos tienden ubicarse entre los 0.5°C hasta los 2.5°C; siendo el RCA4-GFDL el modelo que mayor anomalía térmica presenta de entre todos los modelos. Además, es de notar que el RCA4-ERA

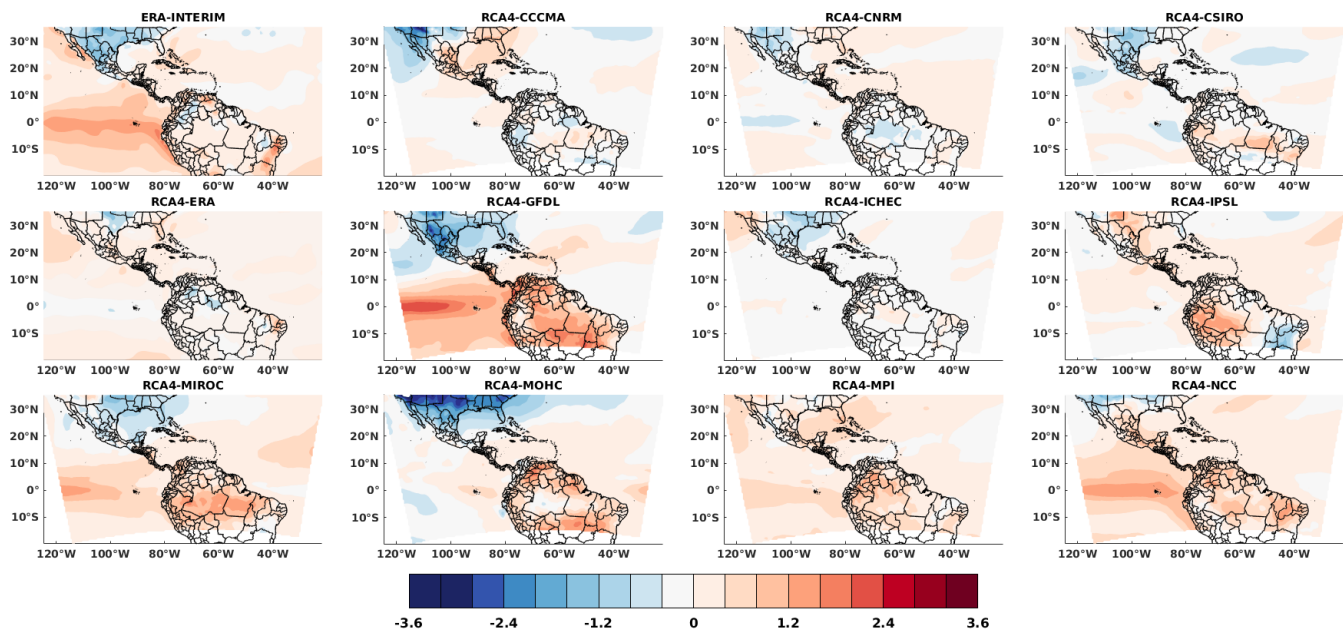


Figura 14. Anomalia de la TAS ($^{\circ}\text{C}$) para los tres años de sistemas frontales más activos, referido al dominio de la BC.

no muestra amplias zonas (polígonos de máxima intensidad) que pudieran referir a zonas de interés dentro del dominio del CAM, a pesar de que en análisis anteriores se había destacado la región confinada entre los 10°S - 15°S y 80°W - 120°W , como la de mayor correlación positiva entre el número de sistemas frontales entre la BC y la TAS.

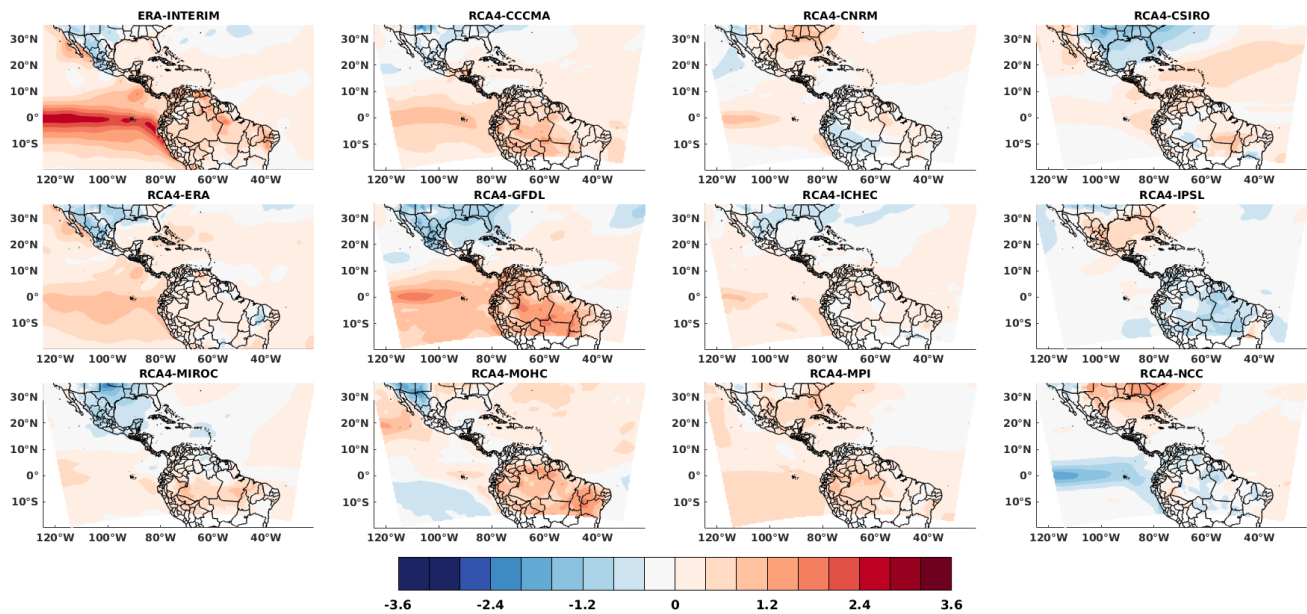


Figura 15. Anomalia de la TAS ($^{\circ}\text{C}$) para los tres años de sistemas frontales más activos, referido al dominio de la MN.

Por su parte, al realizar el mismo análisis para los tres años con sistemas frontales más activos en la MN (fig. 15), se observa que ERA-INT muestra un patrón espacial similar al descrito anteriormente; en donde el máximo positivo de anomalía en la TAS (del orden de 2.4°C hasta 3°C) se ubica principalmente sobre la zona Ecuatorial del Océano Pacífico, con extensión hacia los 10°N y 12°S , y alcance longitudinal confinado entre 80°W y 120°W . Dicho perfil espacial se observa también para los modelos RCA4-CCCMA, RCA4-CNRM, RCA4-ERA, RCA4-GFDL y RCA4-ICHEC, aún que en menor grado de anomalía (de 1°C hasta 1.5°C), con ligeras diferencias en la posición del núcleo térmico máximo, pero siempre ubicado a lo largo de la zona Ecuatorial.

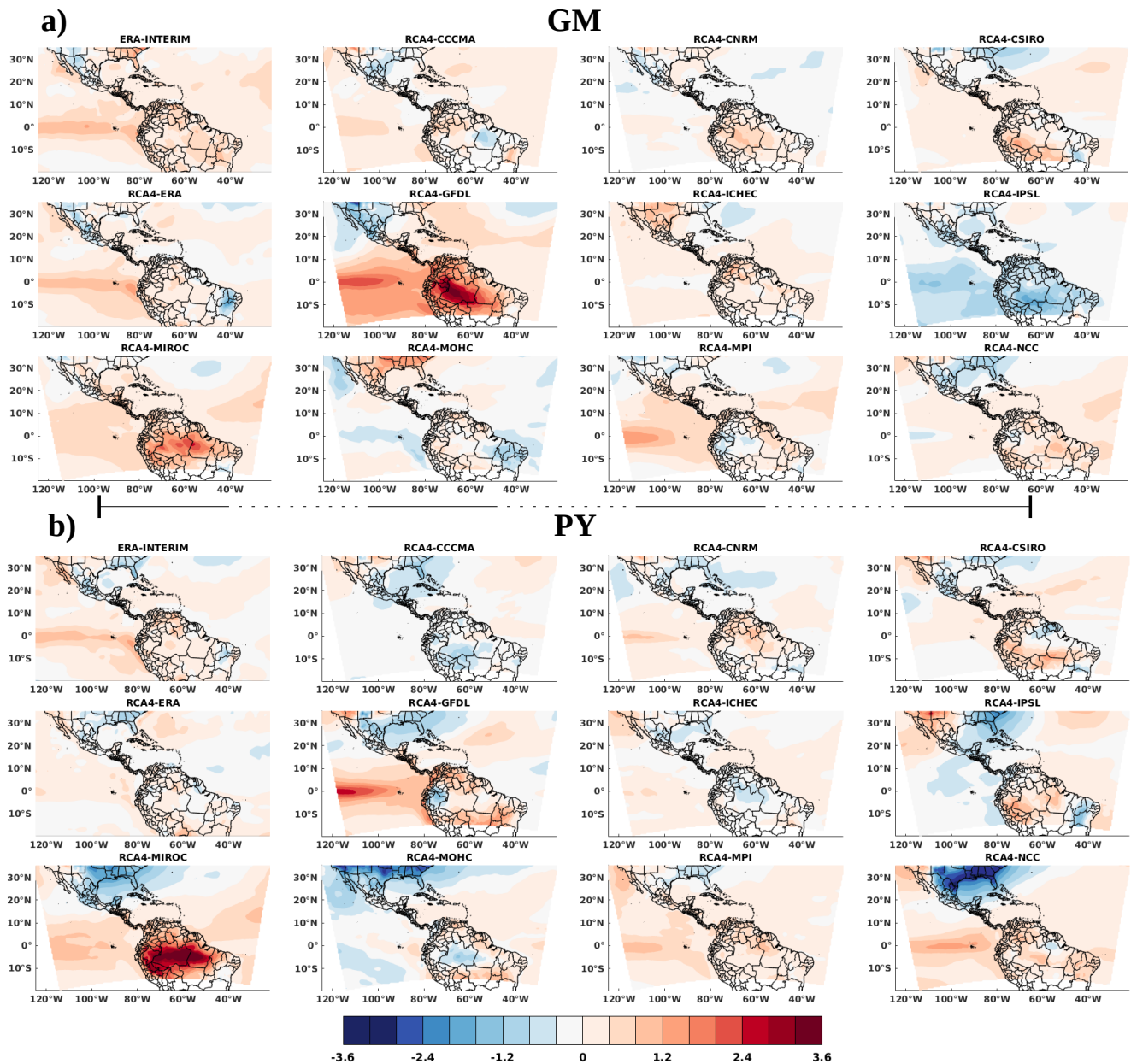


Figura 16. Igual que en la figura 15, pero para a) GM y b) PY.

Con respecto a la región de la GM (fig. 16a) nuevamente observamos que para ERA-INT, la TAS destaca por presentar zonas de anomalías positivas en la región Ecuatorial del Pacífico, llegando a presentar valores del orden de 1.2°C . Por consiguiente, en los modelos regionalizados se observan patrones algo similares al perfil superficial de ERA-INT, para los cuales son RCA4-CCCMA, RCA4-ERA, RCA4-GFDL, y RCA4-MPI los que destacan por presentar anomalías positivas en la zona Ecuatorial del Pacífico, las cuales van desde 1°C hasta los 2°C , siendo el RCA4-GFDL el que mayor anomalía presenta de entre todos los modelos, incluso en zona continental.

Finalmente se presenta el análisis de la anomalía de la TAS del CAM, para los tres años de sistemas frontales más activos en la región de la PY (fig. 16b), la cual muestra características similares a las ya descritas anteriormente; puesto que se observan anomalías positivas del orden de 1°C a 1.5°C sobre la región del Pacífico Ecuatorial en ERA-INT, pero también en los modelos RCA4-CNRM, RCA4-GFDL, RCA4-ICHEC, RCA4-MIROC, RCA4-MPI y RCA4-NCC.

Por lo tanto, tal como se ha ido observado desde la sección 4.2: en este punto se puede señalar que para México, existe una correlación positiva e importante entre el número de sistemas frontales contabilizados individualmente por dominio (BC, MN, GM y PY) y el promedio de la TAS, la cual se desarrolla principalmente sobre la zona Ecuatorial del Pacífico; en donde máximo de actividad en sistemas frontales viene dado cuando existe una importante anomalía

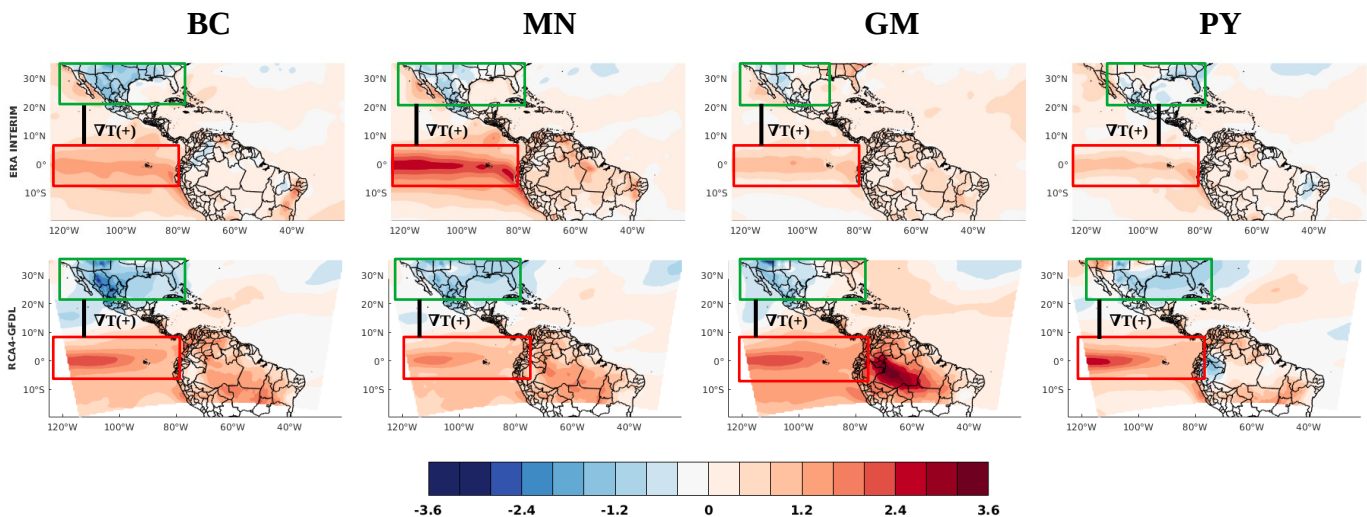


Figura 17. Anomalía de la TAS ($^{\circ}\text{C}$) para los tres años de sistemas frontales más activos, visto en los modelos ERA-INT y RCA4-GFDL, para todos los dominios. En ella se destaca la diferencia térmica (∇T) que se desarrolla entre las latitudes medias (zona con tendencia a ser la más fría del dominio del CAM, encerrada en recuadro verde) y la zona Ecuatorial (zona con tendencia a ser la más cálida, encerrada en recuadro rojo).

positiva en la TAS sobre la región Ecuatorial del Océano Pacífico; en cuyo caso, consecuentemente se genera un importante perfil gradiental en la TAS ($\nabla T(+)$), que se desarrolla al comparar latitudinalmente la TAS de la zona ecuatorial (zona cálida) con la TAS de las latitudes medias del Hemisferio Norte (zona relativamente fría), y que se hace aún más evidente para los modelos ERA-INT y RCA4-GFDL (fig. 17).

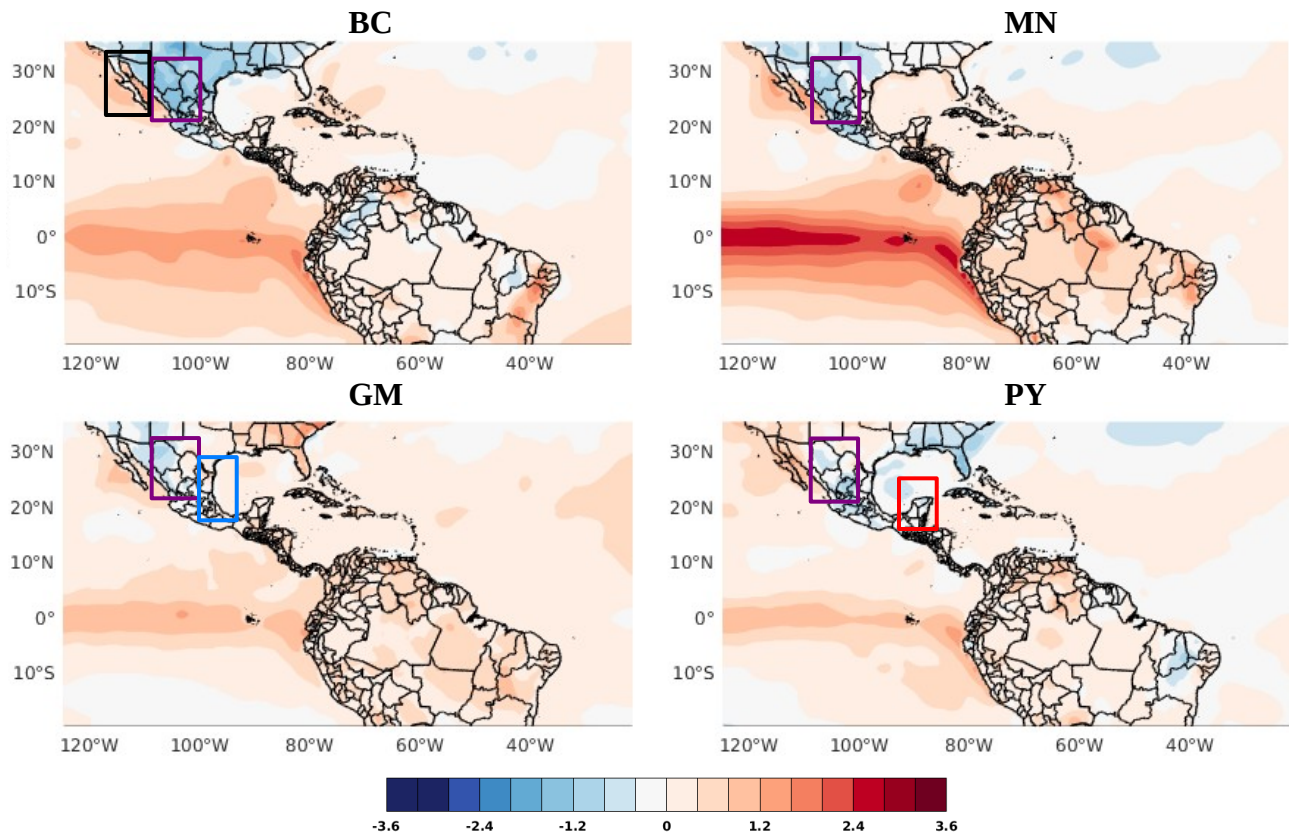


Figura 18. Anomalía de la TAS ($^{\circ}\text{C}$) de los tres años de sistemas frontales más activos para la BC, MN, GM y PY, vistos para el modelo de ERA-INT. En ella se destaca la región de referencia en recuadro de color negro la BC, de color morado la MN, de color azul el GM y rojo la PY.

Por otra parte, refiriéndonos a un análisis con enfoque más particular, hacia las regiones mencionadas anteriormente como zonas relativamente frías (fig. 18): podemos observar que para ERA-INT, ante eventos frontales activos en la BC, la región de la BC (fig. 18; recuadro negro) se caracteriza por presentar anomalías positivas en la TAS (de 1.2° a 1.5°C) sobre las regiones oceánicas, en cuyo caso pareciera repercutir como amortiguador térmico en la Península de Baja California; no así sobre Sonora, en donde negativas anomalías térmicas (de hasta -1.2°C) se hacen presente durante dicho período. En el caso de la MN, la región de la MN (fig. 18; recuadro morado), durante su período de sistemas activos, se caracteriza por presentar

anomalías térmicas negativas (del orden de -1.2°C) que se desarrollan a lo largo del dominio. En tanto que para la GM, el dominio de la GM (fig. 18; recuadro azul) se perfila como una región con tendencia a anomalías positivas (de hasta 1°C); mientras que para la PY, el dominio de la PY (fig. 18; recuadro rojo), se caracteriza por presentar ligeras tendencias negativas (-0.5°C), aún que en realidad no es discernible en éstos dos último. Sin embargo, al conjuntar los resultados individuales: BC, MN, GM y PY, cada una con su respectivo período más activo en sistemas frontales, se observa de forma generalizada que la región con mayor impacto se centra sobre la MN, puesto que ahí, independientemente del dominio de enfoque, la anomalía de la TAS siempre destaca por ser más negativa en comparación con el resto de los cuatro dominios acotados (marcado con recuadros de color morado, fig. 18).

Ahora bien, toda vez que se ha concluido que las zonas térmicas Ecuatoriales del Pacífico están asociados con un incremento en la actividad de sistemas frontales en México, queda abierta la cuestión relacionada con los eventos menos activos; por lo tanto, en la siguiente sección se realiza dicho análisis más generalizado, al abordar los rasgos más importantes que se pudieran observar en la TAS dentro del dominio del CAM.

4.3.2. Anomalía de la TAS para los tres años con eventos frontales menos activos

La figura 19 recluta los resultados más destacados de la TAS para los tres años menos activos en sistemas frontales, para cada una de las cuatro regiones acotadas (ver resultados completos en ANEXO C). Nótese que para este caso, la gran mayoría de ellos tienden a mostrar un perfil espacial algo similar entre si; el cual, así como en la figura 17, se remarcan de forma generalizada a través de recuadros de color verde, aquellas zonas relativamente frías, y de rojo, las cálidas. El análisis muestra que para ERA-INT, y al retomar el dato de correlación positiva que se ubicaba sobre los 10°N - 15°S y los 80°W - 115°W , encontramos que los tres años con eventos frontales menos activos se caracteriza por presentar una anomalía negativa en la TAS (del orden de -0.5° a -1°C) que se confina nuevamente a lo largo y zonas aledañas del Ecuador, sobre el Océano Pacífico, tal como se puede apreciar para los dominios BC, MN y PY. Además, hacia México y Estados Unidos, sobre continente, podemos encontrar la prevalencia de anomalías cálidas de entre 1° y 1.5°C ; que al ser tomada en cuenta junto con lo observado en las zonas

Ecuatoriales, generan un importante gradiente latitudinal ($\nabla T(-)$), cuyo perfil es opuesto a lo observado durante los años más activos en sistemas frontales.

Con respecto a la parte regionalizada, el RCA4-ERA, a excepción de la MN, muestra un importante enfriamiento en la TAS para los dominios de la BC, GM y PY sobre la zona Ecuatorial del Pacífico; que además, contrasta de manera importante con las regiones de latitudes medias del Hemisferio Norte, generando un gradiente ($\nabla T(-)$) más marcado, que con respecto a ERA-INT. Misma que se observa para los modelos RCA4-CCCMA, RCA4-GFDL y RCA4-CSIRO, en todos los dominios.

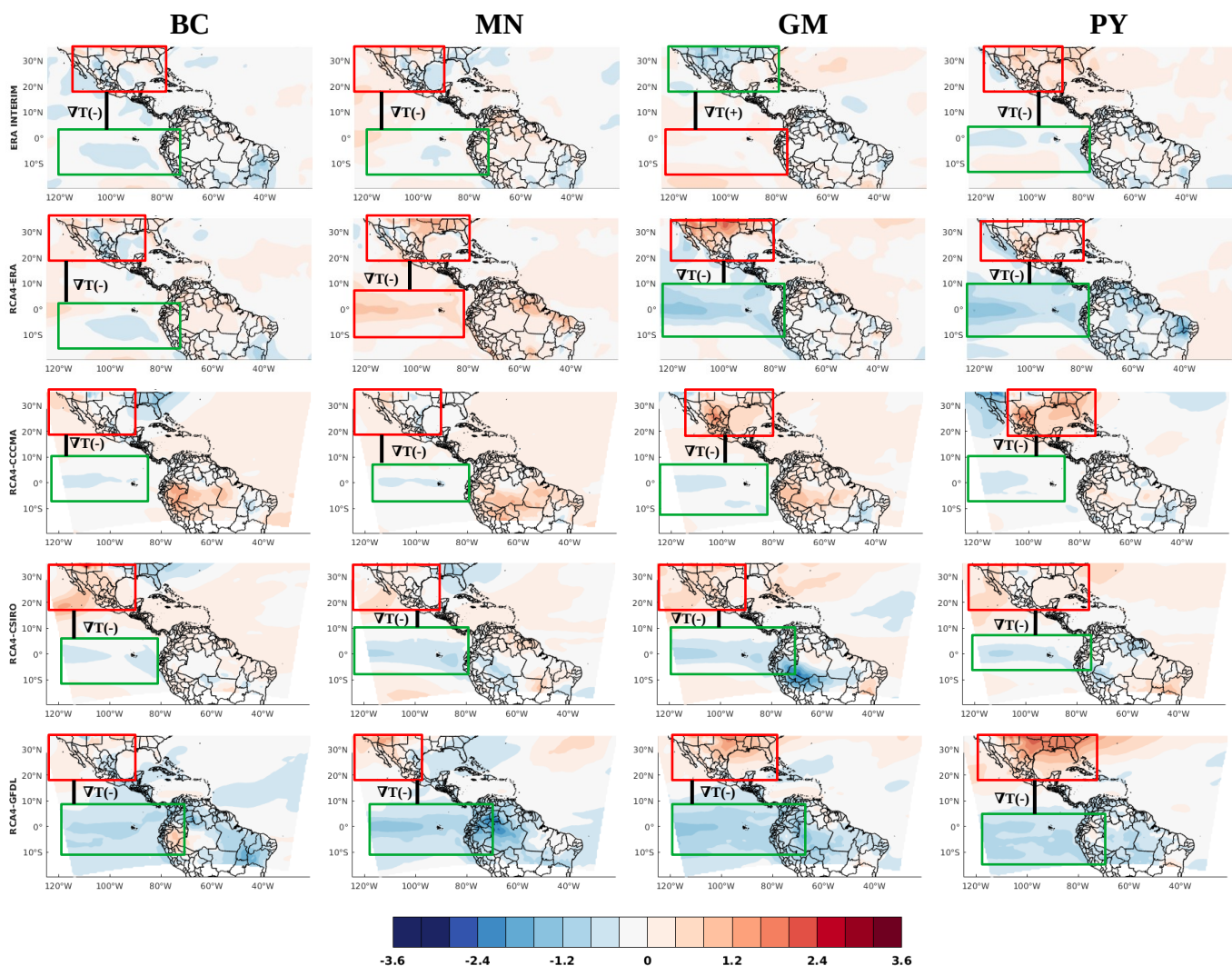


Figura 19. Anomalia de la TAS ($^{\circ}\text{C}$) para los tres años de sistemas frontales menos activos, visto en los modelos ERA-INT, RCA4-ERA, RCA4-CCCMA, RECA4-CSIRO y RCA4-GFDL, para todos los dominios. En ella se destaca la diferencia térmica (∇T) que se desarrolla entre las latitudes medias y zona Ecuatorial.

4.4. Resumen del análisis cualitativo de correlaciones y anomalías para la TAS

En resumen y tal como se ha mencionando, el análisis para las regiones acotadas en el presente estudio (BC, MN, GM y PY) se ha caracterizado, de acuerdo a los modelos estudiados, por presentar una alta correlación entre la actividad de sistemas frontales y la TAS que se desarrolla sobre la región Ecuatorial del Océano Pacífico; cuyo máximo en actividad se asocia a anomalías positivas ($>1.5^{\circ}\text{C}$) y el mínimo a tendencias negativas (del orden de -0.5 a -1°C).

Sin embargo, la región Ecuatorial del Océano Pacífico ha sido profundamente relacionada con el desarrollo de El Niño y La Niña (para ver más detalles y sus vínculos a través de la Celda de Walker, ir a ANEXO D), eventos oceánicos-atmosféricos que se manifiestan por aumentos y disminuciones anómalos en las temperaturas de la superficie del mar en el Océano Pacífico Ecuatorial, y que incluyen varios fenómenos concurrentes: como a) la falta o presencia de afloramientos ricos en nutrientes frente a las costas de América del Sur, b) fluctuación de la presión atmosférica entre el Pacífico oriental y occidental, c) alteración del patrón de los vientos Alisios y c) cambios dramáticos en los patrones de lluvia en amplias áreas (Rosenzweig y Hillel, 2008). Dicha región ha sido dividida en áreas en acorde a los promedios térmicos superficiales con el objetivo de dictaminar índices asociados con las anomalías positivas o negativas, y de esta forma, establecer si se cuenta con evento de Niño (índice positivo) o Niña (índice negativo; ver figura 20).

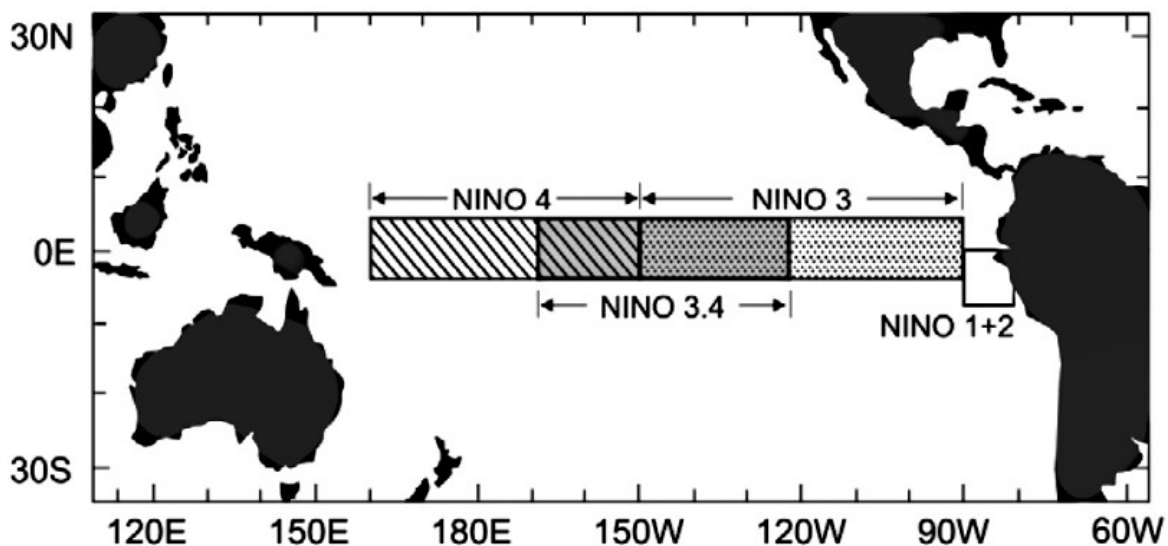


Figura 20. Áreas del Océano Pacífico en las que se promedian las temperaturas de la superficie del mar para obtener los índices de El Niño (Rosenzweig y Hillel, 2008)

El comportamiento de la anomalía térmica superficial del mar sobre el Océano Pacífico Ecuatorial (fig. 20) y su repercusión en México, ha sido estudiado anteriormente, y los resultados se han centrado principalmente en cuando ésta se encuentra con anomalías térmicas positivas (i.e., ante un evento de Niño); cuyos efectos, aquí acotados a los meses del invierno, se han descrito por el aumento relativo de las precipitaciones en las regiones noroccidentales y nororientales de México, así como en la península de Yucatán; además de presentarse, una caída generalizada de la temperatura en el centro y norte de México, con excepción a la península de Baja California, que ha tendido a presentar una considerable anomalía positiva de temperatura durante eventos de Niño, mientras que en el sur y sureste del país las anomalías de temperatura no muestran un patrón claro (Galindo y Mosiño 1992; Magaña, 1999). Lo anterior deriva de un cambio en los patrones climáticos, tales como la Corriente de Chorro Subtropical, que durante eventos de Niño, migra hacia el sur con respecto a su posición normal, permitiendo que sistemas meteorológicos de latitudes medias desciendan hacia México.

En base ello, podemos juzgar que ERA-INT, y buena parte de los modelos regionalizados, han reproducido los patrones térmicos mencionados anteriormente:

- a) Puesto que se ha hallado una correlación positiva, generalizada, entre la actividad de sistemas frontales invernales en México y la TAS que se genera sobre la región 3 del Niño (fig 19).
- b) En donde el máximo de eventos frontales por temporada, en cualquiera de los dominios acotados en el estudio (BC, MN, GM y PY), viene dado por una importante anomalía positiva ($>+1.2^{\circ}\text{C}$; i.e., ante eventos de Niño) sobre la región 3 del Niño. En este sentido, dicho resultado sugiere que la dinámica de interacción océano-atmósfera presenta consistencia ante los cambios de patrones climáticos, dentro de los modelos; puesto que ante eventos de Niño, tal como se mencionó anteriormente, éstas anomalías positivas sobre el Océano Pacífico Ecuatorial se relacionan con la alza de eventos invernales en México.
- c) En tanto que la mínima actividad de sistemas frontales en una temporada invernal ha mostrado estar relacionada con una tendencia negativa en la anomalía de la TAS, sobre la región 3 del Niño.

d) Además se observó que latitudinalmente, entre la región 3 del Niño (cálido) y la zona continental de América del Norte (relativamente frío), en conjunto desarrollaban un perfil gradienta ($\nabla T+$) durante los años con los eventos frontales más activos (fig. 17); lo que sugiere que durante eventos de Niños, los sistemas frontales enfrían más las regiones continentales de América del Norte; que para México, fue justamente la región de la MN la que mayor impacto presentó ante estos eventos, al resultar con anomalías negativas (enfriamiento) en todo su dominio acotado.

Por lo tanto, una parte de los modelos aquí utilizados han sabido representar la respuesta a la dinámica oceánica y atmosférica reportada. Sin embargo, también se puede notar, que para cada región, hay un modelo que se acopla bien a la dinámica de una determinada zona, aunque no necesariamente lo haga para todos los eventos climáticos; es decir, para este caso, que reproduzca de manera consistente tanto los eventos con máxima presencia de sistema frontales durante una temporada invernal, como ante eventos con una mínima presencia de sistemas (juntos, considerados aquí en adelante, como períodos de eventos extremos), ésto en acorde a lo observado. Más aún, sería deseable investigar, qué modelo regionalizado tiene la capacidad de reproducir correctamente el residuo de la diferencia espacial entre las anomalías de la TAS del CAM para los períodos de eventos extremos de cada dominio, y describir si ésta dinámica se mantiene con respecto a ERA-INT, sujeto bajo las mismas indicaciones, acotado para dichos dominios; y por lo tanto, describir su potencial uso en estudios climáticos de temporadas invernales en México, incluso ante casos que incluyeran análisis de eventos extremos, por lo que justamente en la siguiente sección se abordará éstos últimos puntos.

4.5. Análisis cuantitativos de correlaciones y anomalías

En la figura 21 se presenta, a modo de muestra, el residuo obtenido entre las anomalías de la TAS para todo el dominio del CAM, considerando los tres años más y menos activos en sistemas frontales, de acuerdo a la BC. En ella se observa que ERA-INT (tomada como de referencia) remarca principalmente la región 3 del Niño como la de mayor contraste térmico que pudiera darse ante estos eventos extremos (de hasta 2.5°C), que incluso se extiende hasta las costas del Pacífico Mexicano y alrededores de la Península de Baja California. Por lo tanto, la repercusión del desarrollo térmico en la región 3 del Niño se ve reflejada en la actividad de estos

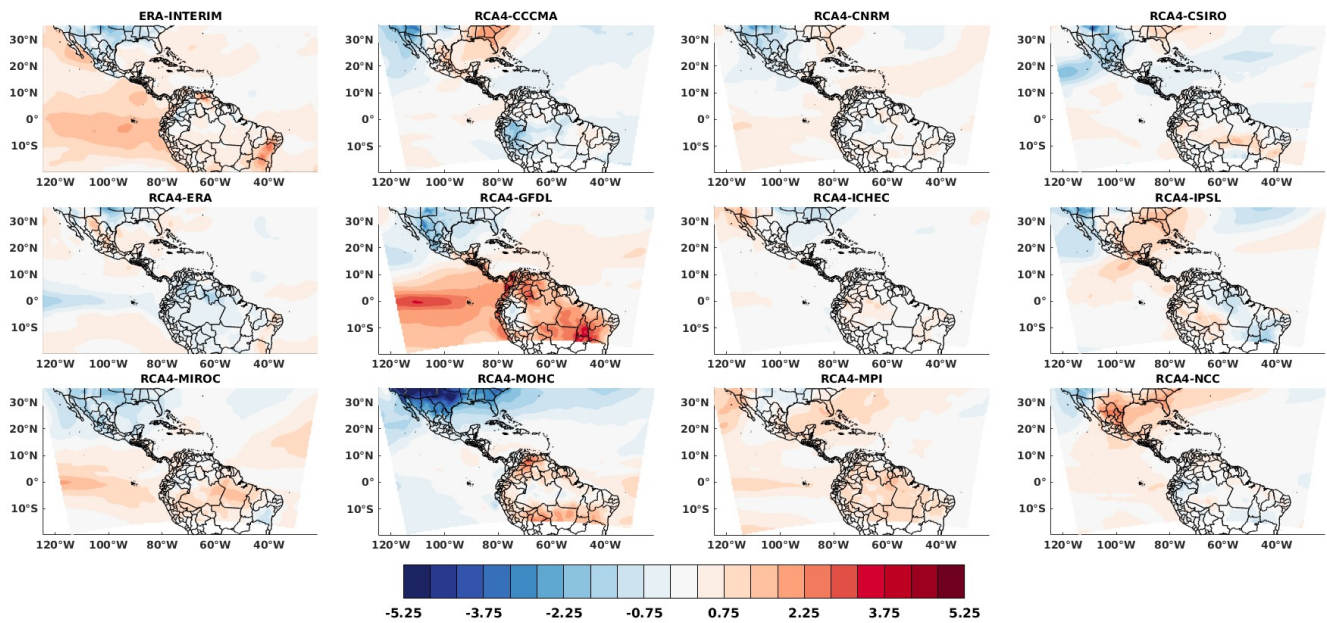


Figura 21. Residuo de anomalías de la TAS (°C) para el dominio del CAM, entre los tres años más y menos activos de sistemas frontales, en referencia a la BC.

sistemas. Sin embargo, y tal como se ha ido observado desde la sección 4.2, la distribución y diferencias de anomalías térmicas durante estos eventos extremos no necesariamente son captados y/o reproducidos en todos los modelos regionalizados, y discernir a estas alturas dichos perfiles dinámicos es de importancia para determinar, en conjunto a lo descrito anteriormente, el modelo regionalizado más apegado a lo observado. Entonces, para hacer un análisis más objetivo, sin subestimar el estudio cualitativo que se realizó en secciones anteriores, se presenta en la figura 22 el resumen cuantitativo de la figura 21, a través del llamado diagrama de Taylor, el cual toma como dato de referencia u observado a ERA-INT, y compara los once modelos regionalizados por el RCA4.

En ella se observa de manera generalizada (fig. 22), que buena parte de los modelos cuentan con importantes limitaciones en representar la dinámica reportada en ERA-INT, puesto que su correlación, en conjunto, caen por debajo de 0.6, con excepción al RCA4-GFDL; siendo éste uno de los modelos que más habilidad presentó, durante los análisis realizados, en representar las anomalías térmicas positivas asociados a los eventos del Niño, en referencia a la BC. Sin embargo, a pesar de ello, la Raíz de Desviación Cuadrática Media (RMSD) junto con sus valores de Desviación Estándar (SD), distan bastante al RCA4-GFDL de lo observado, sugiriendo que éste presenta una fuerte variabilidad (en intensidad) en sus anomalías térmicas espaciales en

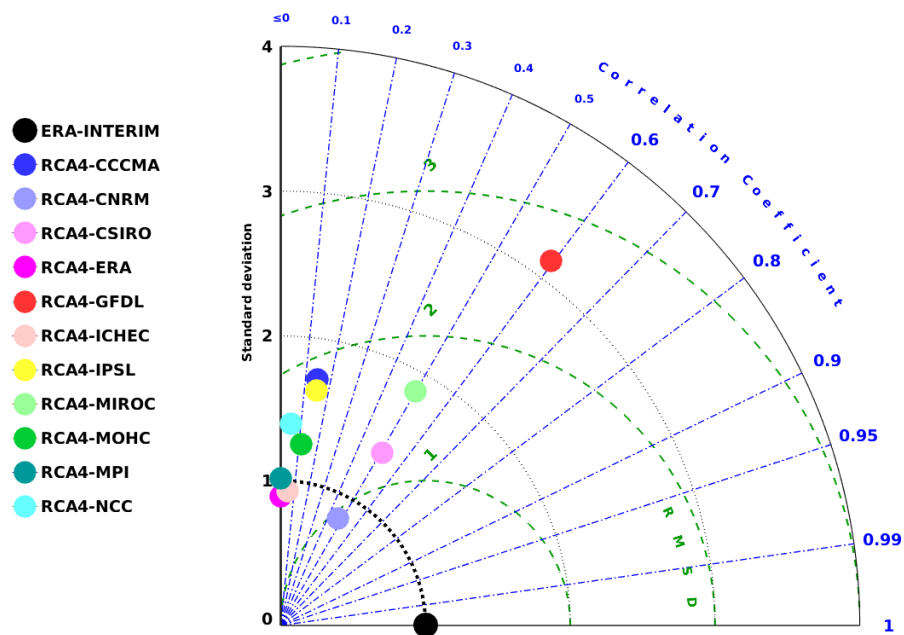


Figura 22. Diagrama de Taylor obtenido del residuo de anomalías de la TAS, entre los tres años más y menos activos de sistemas frontales, en referencia a la BC.

referencia a ERA-INT durante estos eventos (fig. 21). Caso contrario a lo observado en los modelos RCA4-CSIRO y RCA4-CNRM, que en conjunto, a pesar de no distar tanto en su RMSD y SD con respecto a ERA-INT, su correlación queda sujeto a un bajo índice, calculado en 0.5.

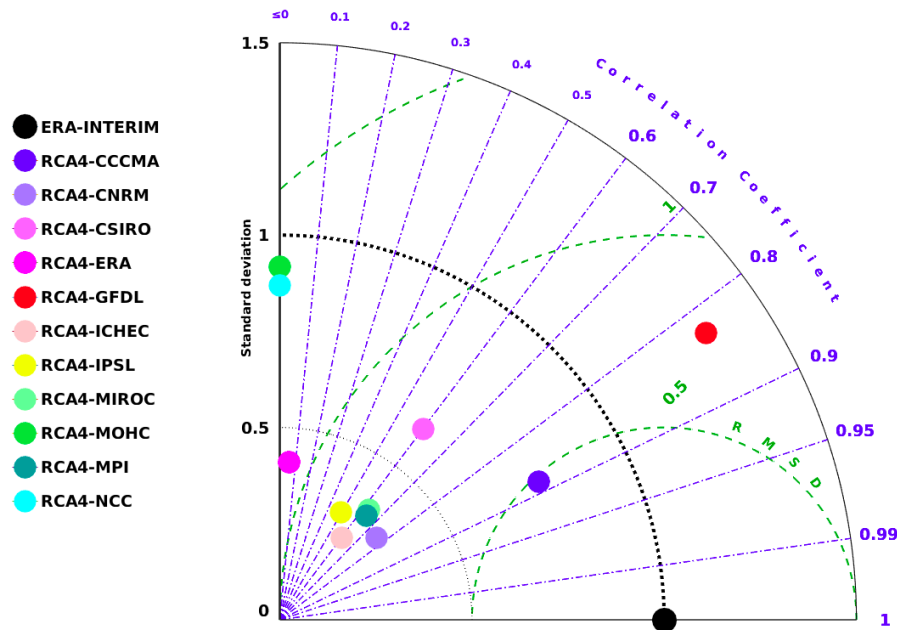


Figura 23. Diagrama de Taylor obtenido del residuo de anomalías de la TAS, entre los tres años más y menos activos de sistemas frontales, en referencia a la MN.

En el mismo tipo de análisis, pero referido a la región de la MN, el gráfico de Taylor muestra que para este caso, el RCA4-GFDL cuenta con una buena correlación espacial con respecto a ERA-INT, del orden de 0.83; sin embargo en éste, son los períodos con sistemas frontales menos activos los que propician que, eventos de Niña representados intensamente (comparar RCA4-GFDL con ERA-INT, en las fig. 17 y 19), generen importantes sesgos espaciales, y por consiguiente, que la RMSD y el SD lo hagan distar bastante al reanálisis. Por lo tanto para este caso, es justamente el RCA4-CCCMA, el que mostró una muy buena habilidad de representar el residuo espacial entre ambos períodos de eventos extremos, al presentar una correlación espacial, de 0.89, con respecto a ERA-INT, cuyos valores de RMSD (0.5) y SD (0.7) no lo hacen distar tanto con respecto al dato observado; siendo además, uno de los modelos que anteriormente había presentado buena habilidad en mostrar la influencia térmica de la zona de El Niño 3, tanto en eventos muy activos en sistemas frontales, como en los menos activos (comparar RCA4-CCCMA con ERA-INT, en las fig. 15 y 19).

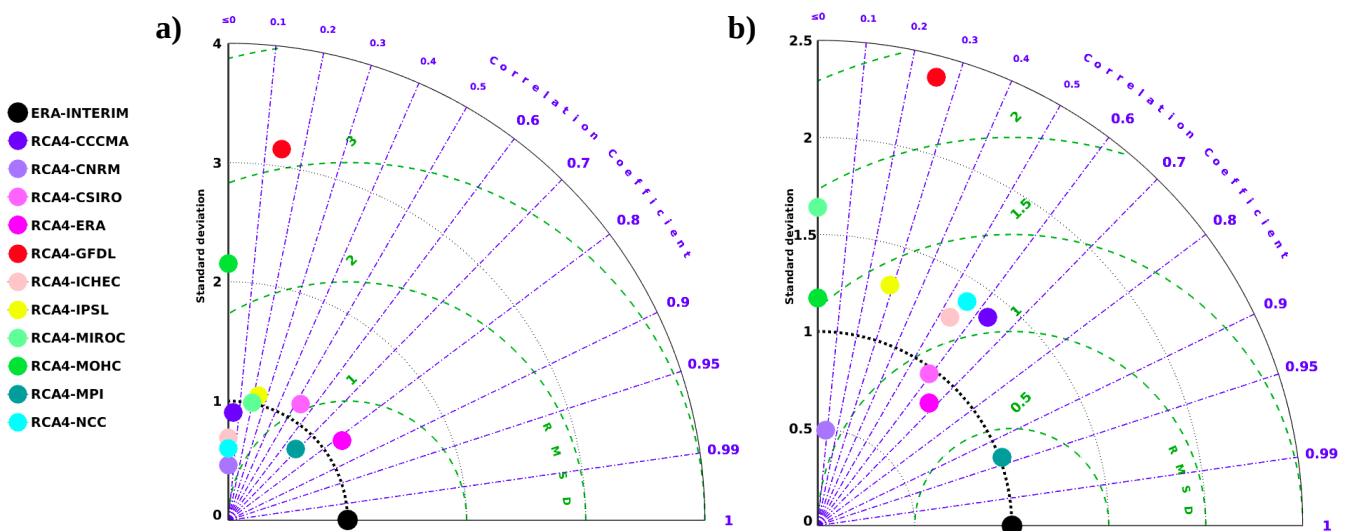


Figura 24. Igual que en la figura 23, para a) GM y b) PY.

Con respecto a la GM (fig. 24a), son RCA4-CSIRO, RCA4-MPI y RCA4-ERA los modelos regionalizados que más se aproximaron a la dinámica espacial descrita por ERA-INT; siendo éste último el que mayor correlación (del orden de 0.8), RMSD (0.75) y SD (1.2) presentó con respecto a los demás. En tanto que, para la PY (fig. 24b) el modelo RCA4-MPI destaca de entre todos los modelos, al presentar una correlación importante (0.94), una RMSD inferior al radio de 0.5 y una desviación estándar muy similar al de ERA-INT (1); sin embargo, otros modelos como el

RCA4-CCCMA, RCA4-CSIRO y RCA4-ERA han presentado resolver la dinámica espacial de ERA-INT de manera hábil.

Por lo tanto, como se pudo ver a lo largo del análisis de los gráficos de Taylor, la representación de la dinámica espacial, obtenida del residuo entre las anomalías de la TAS para los períodos de eventos extremos, muestra tener un buen desempeño para las regiones del centro y sureste de México. En este sentido, fueron justamente las zonas de la MN (RCA4-CCCMA), GM (RCA4-ERA) y PY (RCA4-MPI) las que mantuvieron una importante correlación y vínculo con la dinámica del entorno espacial del CAM ante éstos eventos extremos, en acorde a ERA-INT.

Ahora bien, en base a estos resultados quedaría generalizada la relación dinámica entre los cambios térmicos superficiales que se desarrollan sobre las regiones Ecuatoriales y la actividad de sistemas frontales en México; sin embargo, la respuesta atmosférica, que se desarrolla a niveles medios, también exhibe una correlación importante en respuesta a éstos, el cual provee patrones importantes que pueden ayudar a generalizar y evaluar las habilidades de estos modelos en representar el sistema climático.

La Altura Geopotencial (Z_g) suele ser referida como la coordenada vertical de aplicaciones atmosféricas en la que la energía juega un papel importante (e.g., en movimientos atmosféricos a gran escala); cuya fluctuación se relaciona con el espesor de una determinada capa, en asociación a las características térmicas de una masa de aire (Wallace y Hobbs, 2006), por lo tanto, cuanto mayor (menor) sea la temperatura del aire en ésta, mayor (menor) será la Z_g .

En acorde a ello, en la figura 25 se muestran las anomalías de la Z_g para los tres años con eventos frontales más activos, de acuerdo a cada dominio, para ERA-INT y los modelos regionalizados que mejor desempeño tuvieron en resolver la TAS espacial. En ella se observan importantes patrones asociados a anomalías negativas que se desarrollan en el norte de México y latitudes medias (hacia Estados Unidos), que contrastan de manera importante contra las regiones tropicales y Ecuatoriales, en donde las anomalías tienden de ser positivas. Este hecho es importante, porque de manera generaliza, a través de estos gradientes, los modelos regionalizados estarían representando la ubicación de la Corriente de Chorro Subtropical, como resultado del balance de los mecanismos de forzamiento sinóptico verticales y latitudinales (e.g., la celda de Walker incentivada por las regiones Ecuatoriales y su interacción con la de Ferrel). Por

consiguiente y en consistencia con la TAS, el alcance latitudinal de la anomalía negativa de la Zg sugieren que en dichos períodos existen importantes brotes de masas de aire frío como resultado del recorrimiento hacia el sur de los límites de interacción entre la celda de Ferrel (latitudes medias) y la de Walker (intertropical), que terminan favoreciendo el perfil característico de la Zg, con importantes anomalías negativas sobre México durante períodos invernales intensos y, en este caso, eventos de Niño (ver Lu et al., 2008; R. Hall et al., 2015).

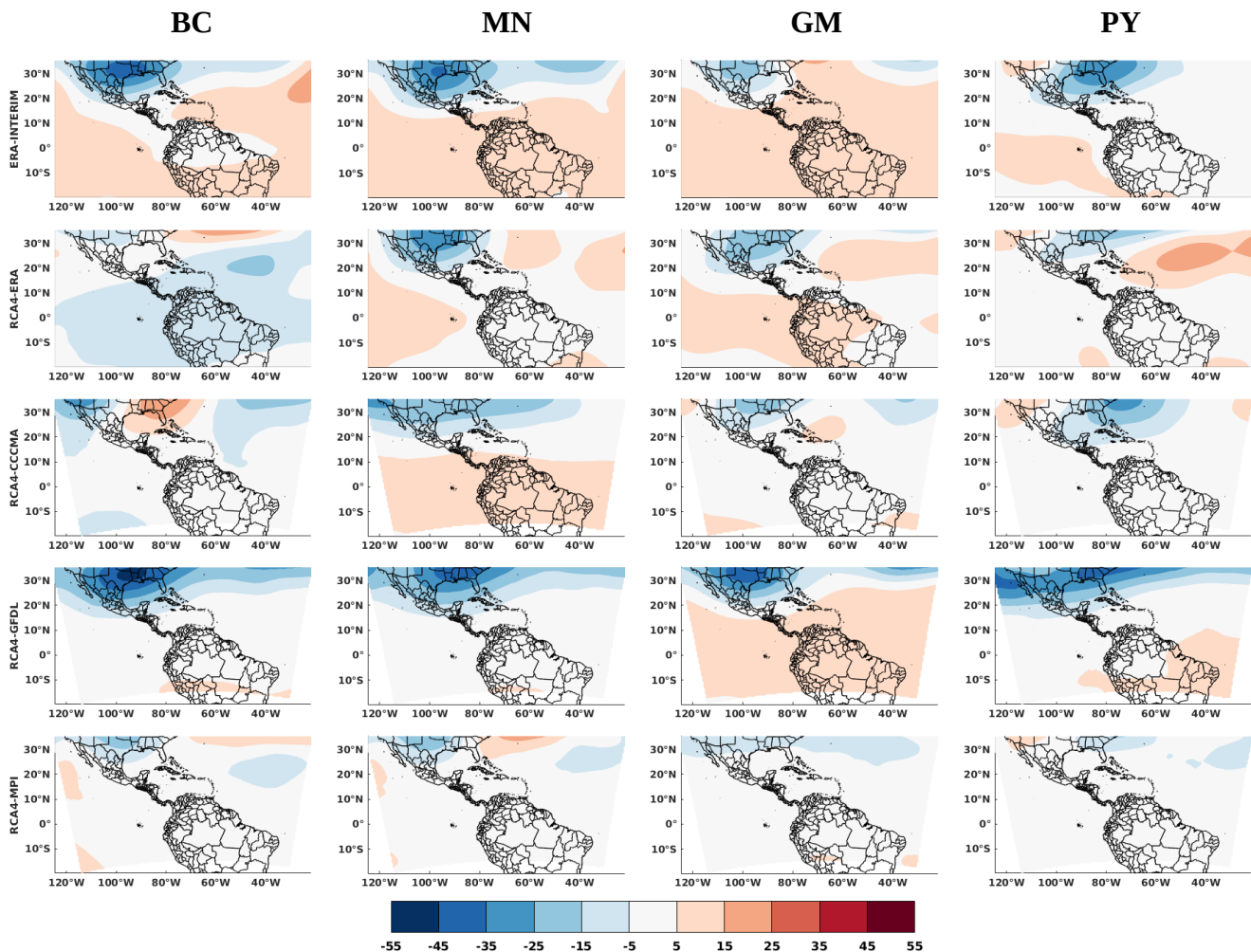


Figura 25. Anomalía de la Zg (m) para los tres años de sistemas frontales más activos.

En este punto, en la figura 26a se hace el mismo análisis realizado en los anteriores diagramas de Taylos de la TAS, pero aplicado para la Zg, considerando nuevamente como dato observado la información de ERA-INT. En ella se observa que la diferencia espacial de la Zg en el CAM, obtenida en referencia a los eventos extremos reportados en la BC, revelan que el modelo regionalizado que más se aproxima a ERA-INT es el RCA4-MOHC, al presentar un valor de

correlación bastante estrecho (.94), una SD similar al observado (1.25) y un RMSD menor al radio de 0.5. Sin embargo, modelos como RCA4-CNRM, RCA4-MIROC, RCA4-GFDL y RCA4-NCC también han mostrado estar en el orden de 0.9 de correlación positiva, con respecto a ERA-INT, siendo un detalle determinante la SD y RMSD, por distanciarlos tanto de lo observado, posiblemente derivado de la fuerte intensidad espacial en las que éstas fueron resueltas (e.g., BC del modelos RCA4-GFDL en comparación a ERA-INT, fig. 25).

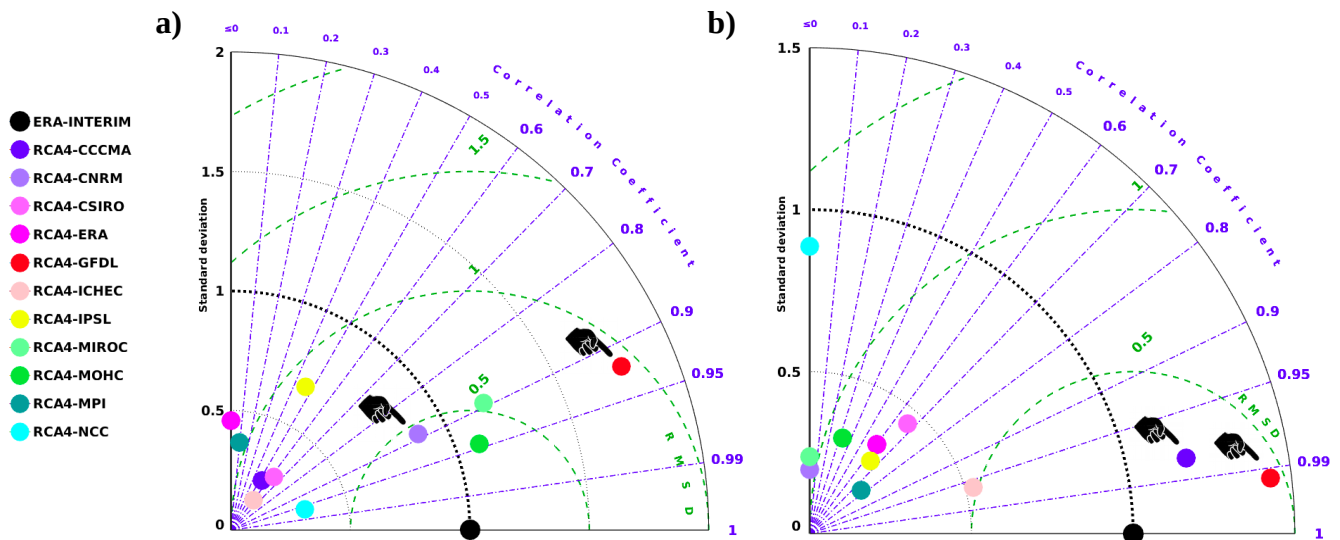


Figura 26. Diagrama de Taylor obtenido del residuo de anomalías de la Z_g , entre los tres años más y menos activos de sistemas frontales, en referencia a a) BC y b) MN. La mano señala los dos modelos regionalizados que mejor habilidad presentaron en el análisis realizado de la TAS.

El mismo análisis es realizado en referencia a la MN, en la figura 26b. En ella se observa que el modelo RCA4-CCCMA es el que mejor se ajusta a la dinámica descrita por ERA-INT, al presentar una correlación espacial de 0.97, una SD próxima al observado (1.2) y un RMSD menor a 0.5. En tanto que el RCA4-GFDL destaca por presentar una correlación ligeramente por arriba del 0.99 con respecto al observado, siendo la SD (1.4) la que hace distanciarla de ERA-INT, nuevamente, como resultado de su fuerte variación espacial (ver MN del modelos RCA4-GFDL en comparación a ERA-INT, fig. 25).

Con respecto a la GM (fig. 27a), es justamente el modelo RCA4-MPI el que más se aproximó a lo observado, al presentar una muy buena correlación (0.9) y una SD similar a ERA-INT, además de una RMSD del orden de 0.5. En tanto que para PY (fig. 27b), es el RCA4-IPSL el que mejor se ajustó a lo observado.

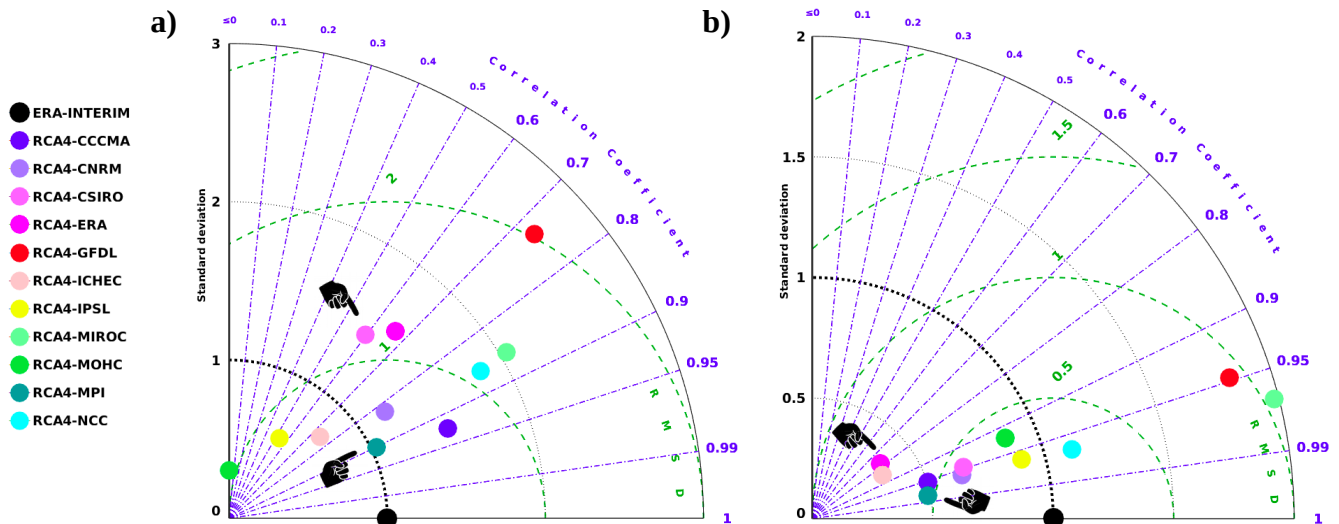


Figura 27. Igual que 26, para a) GM y b) PY.

En resumen se puede apreciar que la dinámica observada en la TAS se relaciona hasta cierto punto con la Z_g . Puesto que, los modelos que mejor ajuste tuvieron con respecto a ERA-INT en la TAS, no necesariamente fueron los mejores para la Z_g . Este hecho es señalado dentro de las figuras 26 y 27; en donde se observa que si bien para la MN, los modelos RCA4-CCCMA y RCA4-GFDL cumplen hábilmente en representar con buena aproximación las anomalías espaciales en los eventos acotados como extremos, en acorde a lo observado (tanto en TAS como Z_g ; ver señalamientos de la figura 26b), así como para la GM el RCA4-MPI (ver señalamientos de la fig. 27a); no es así para las regiones de la BC y PY. Lo cual sugiere que la dinámica atmosférica varía espacialmente de manera importante; al grado de que no necesariamente por obtenerse en una variable determinado perfil (patrón) similar al observado, se deba mantener resultados análogos en las demás variables. Sin embargo, cierta consistencia debe mantenerse, y ésto es observado a través de índices en los valores de correlación, por ejemplo, en el caso BC, el modelo que mejor desempeño obtuvo en representar la TAS (RCA4-CNRM), tuvo una correlación del orden de 0.9 para la Z_g (ver señalamientos en la fig. 26a). Mismo caso es observado para la PY, con respecto al RCA4-MPI, cuya correlación obtenida en la Z_g rondó los 0.99, ciertamente el mejor índice de entre todos los modelos; sin embargo, fue justamente la SD y la RMSD las que la hicieron distar bastante de lo observado (ver señalamientos en la fig. 27b).

5. Conclusiones

Tabla 4 (resumen):

A. Correlación positiva entre el número de frentes fríos + |SD| ≤ 1.5, en referencia ERA-INT.

Región	BC	MN	GM	PY
	RCA4-GFDL	RCA4-CCCMA	RCA4-CCCMA	RCA4-CCCMA
	RCA4-ERA	RCA4-CSIRO	RCA4-CNRM	RCA4-ERA
	RCA4-IPSL	RCA4-ERA	RCA4-ERA	RCA4-IPSL
	RCA4-MPI	RCA4-GFDL	RCA4-ICHEC	RCA4-MOHC
				RCA4-MPI

B. Correlación positiva entre en número de frentes fríos, dada la región, y la TAS del CAM (con enfoque hacia la región 3 de El Niño).

Región	BC	MN	GM	PY
	RCA4-CSIRO	RCA4-CCCMA	RCA4-CCCMA	RCA4-CCCMA
	RCA4-ERA	RCA4-CSIRO	RCA4-CSIRO	RCA4-CSIRO
	RCA4-GFDL	RCA4-ERA	RCA4-ERA	RCA4-ERA
	RCA4-ICHEC	RCA4-GFDL	RCA4-GFDL	RCA4-GFDL
	RCA4-MIROC	RCA4-MPI	RCA4-ICHEC	RCA4-ICHEC
	RCA4-NCC		RCA4-MIROC	RCA4-MPI
			RCA4-MPI	RCA4-MIROC
			RCA4-NCC	RCA4-NCC

C. Los modelos regionalizados (RCA4-) que representaron con mejor habilidad las diferencias espaciales y el entorno del CAM con respecto a ERA-INT; presentes durante los tres años con más y menos actividad en frentes fríos, basados para las regiones acotadas.

Región	BC		MN		GM		PY	
	TAS	ZG	TAS	ZG	TAS	ZG	TAS	ZG
En acorde a los diagramas de Taylor (generalizado)	CNRM	CNRM	CCCMA	CCCMA	ERA	CNRM	ERA	IPSL
	CSIRO	MOHC	GFDL	GFDL	MPI	MPI	MPI	NCC
En acorde a la mejor correlación (≥0.6)	GFDL	GFDL	CCCMA	CCCMA	ERA	CCCMA	ERA	CNRM
		MOHC	GFDL	GFDL	MPI	MPI	MPI	MPI

La metodología de identificación objetiva de frentes fríos, que aquí se planteó, ha servido como pilar fundamental para evaluar el desempeño de los modelos regionalizados por el RCA4. Los resultados aquí mostrados se dividen en dos partes con respecto a las climatologías de los frentes fríos en México:

1. Documentar los resultados obtenidos de los datos observados por el NHC (OBS-NHC). Los cuales mostraron que, además de ser el mes de diciembre el de mayor actividad de

frentes fríos en la mayoría de los dominios acotados; la frecuencia con la que ingresan al país durante la temporada invernal es mayor en las regiones MN y GM, seguida de la PY, y notablemente menor en la BC (como resultado del bloqueo orográfico que desempeña la Sierra Madre Occidental).

2. Destacar los modelos regionalizados que mejor correlación y desviación estándar presentaron en la contabilización anual de frentes fríos, por región (sin considerar el entorno que dio causa a ello), y se resume en la tabla 4A.

En un análisis más adentrado con la dinámica espacial de los modelos regionalizados, se encontró que el número de frentes fríos que se desarrolla anualmente, en cualquiera de los dominios acotados, se relaciona estrechamente con la TAS que se genera en la región 3 de El Niño (ver tabla 4B). Sin embargo, no todos los modelos regionalizados reprodujeron dicha señal.

Por su parte, y en referencia al párrafo anterior, se encontró que los años con eventos frontales más activos se asocian a anomalías cálidas ($>+1.2^{\circ}\text{C}$) sobre la región 3 de El Niño (i.e., durante eventos de Niño), de acuerdo a ERA-INT. En cuyo caso, se encontró consistencia con la presencia de anomalías negativas en la Zg sobre la porción continental de México y Estados Unidos, el cual se asocia con el desplazamiento hacia el sur de las circulaciones atmosféricas, como la celda de Ferrel y su interacción con la de Hadley, causando que sistemas de latitudes medias desciendan hacia México con mayor frecuencia (con respecto a lo normal) y dando paso a temperaturas con anomalías negativas, siendo la región de la MN la más afectada. En este sentido, muchos de los modelos regionalizados lograron representar éstos índices (tabla 4B).

De la misma forma, las temporadas de sistemas frontales menos activas se asociaron a tendencias negativas (del orden de -0.5° a -1.0°C) en la TAS sobre la región 3 de El Niño.

Finalmente, aunque en la tabla 4C se resumen los modelos que mejor habilidad presentaron en resolver la dinámica espacial de la TAS y la Zg; se puede apreciar que algunos de ellos derivan de condiciones que no reproducen bien la variabilidad espacial en alguno de los eventos, por ejemplo: al asociar la TAS contra el número de sistemas frontales para la BC, se encontró que el RCA4-CNRM no logró reproducir índices de correlaciones importante sobre la región 3 de El Niño (fig. 11), e incluso anomalías térmicas de importancia sobre ésta durante eventos frontales muy activos (fig. 14); sin embargo, fue justamente su representación espacial de anomalías de la TAS durante los eventos de frentes fríos menos activos, la que compensó

esta primera parte (ver figura A3, sección de ANEXO C), haciendo que el residuo obtenido de ambos eventos extremos se aproxime a ERA-INT (ver BC de la tabla C) aun que en realidad de manera muy limitada (fig. 22). Además, se halló cierta consistencia entre la representación espacial de la TAS y la Zg; pues se encontró que los modelos regionalizados que obtuvieron mejor representación en la TAS, no necesariamente lo fueron para el análisis de la Zg, aunque se mantuvo una relación razonable.

Por lo tanto, tomando en cuenta los detalles mencionados, se concluye que aunque los modelos regionalizados, analizados a través de algoritmos automatizados, pueden proveer climatologías similares a lo observado, no significa que deriven de un entorno estable, y por lo tanto, de las causas correctas; pues basta ver, como muchos de éstos son filtrados a través de la tabla 4A-C, al pasar de un análisis que no considera el entorno, a otros que si. Entonces, tomando en cuenta los detalles mencionados, se concluye que los modelos regionales que mejor habilidad tuvieron en representar la dinámica (tanto en climatologías, anomalías y correlaciones espaciales) con respecto a ERA-INT, fueron: RCA4-CCCMA, RCA4-CSIRO, RCA4-GFDL, RCA4-ERA y RCA4-MPI.

ANEXO A

Los sistemas frontales

Se le llama zona frontal, o simplemente frente, a la región-límite de interacción entre masas de aire de diferentes características termodinámicas (e.g., temperatura, presión, densidad); en donde además, el tiempo meteorológico puede cambiar muy rápidamente porque, a medida que el frente se mueve, una masa de aire en la superficie es reemplazada por otra con características muy diferentes (Whiteman, 2000).

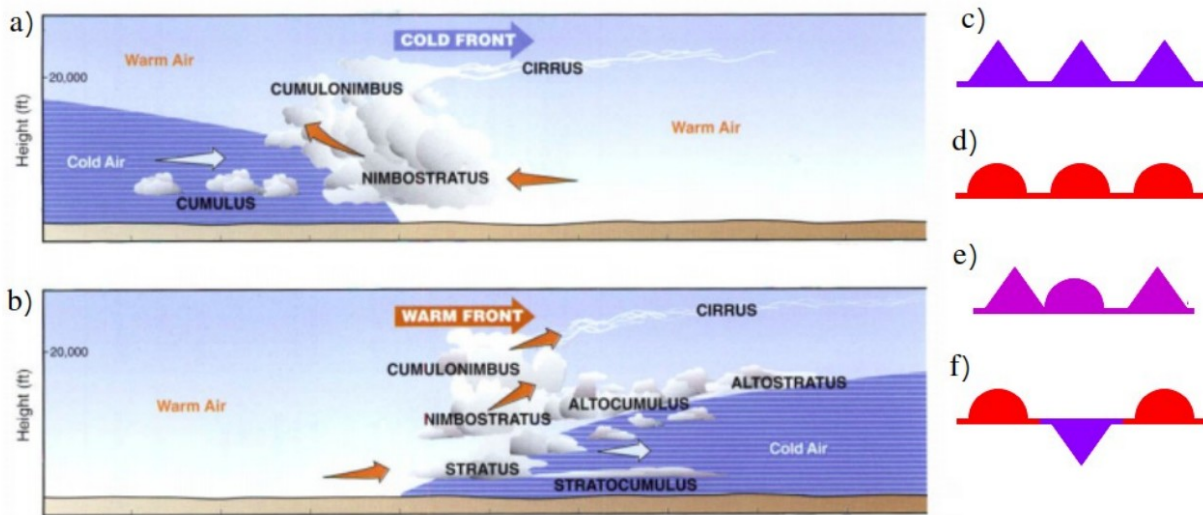


Figura A1. A la izquierda, se presenta los esquemas ilustrativos de los frentes fríos (a) y cálidos (b) y el tipo de nubosidad al que están comúnmente asociados estos sistemas; nubes cúmulus y de tormentas generalmente abundan en la región de paso de un frente frío, mientras que en la cálida estas características no son tan marcadas.

A la derecha, se muestran las líneas de simbología usadas en las cartas meteorológicas de superficie para representar la ubicación de c) un frente frío, d) un frente cálido, e) un frente ocluido y f) un frente estacionario (Adaptado de Slade, 1968 y Whiteman, 2000)

Existen cuatro tipos de frentes; los cuales son mostrados en la figura A1 c-f y son clasificados como: frentes fríos, frentes cálidos, frentes estacionarios y frentes ocluidos. Éstos, son representados en mapas meteorológicos por las líneas de símbolos (Whiteman, 2000; Ahrens, 2012) cuya identificación está dada por la siguiente forma: un frente frío se indica con una línea azul con triángulos azules que apuntan en la dirección del recorrido del frente (Fig. A1 c) y ocurre cuando el aire frío desplaza al aire caliente (Fig. A1 a); un frente cálido está indicado por una línea roja con semicírculos rojos que también apuntan en la dirección de viaje (Fig. A1 d) y ocurre cuando el aire caliente desplaza al aire frío (Fig. A1 b); un frente ocluido está indicado por una línea violeta con triángulos y semicírculos alternados que apuntan en la dirección del viaje

(Fig. A1 e) y ocurre cuando en la región de análisis las masas de aire no son discernibles; y un frente estacionario se indica alternando segmentos de líneas azules y rojas con triángulos y semicírculos apuntando en direcciones opuestas (Fig. A1 f) y básicamente indica la región en donde, ni la masa de aire frío ni la cálida se mueven (Cervantes, 2011; Ahrens, 2012).

ANEXO B

Los dominios del CORDEX

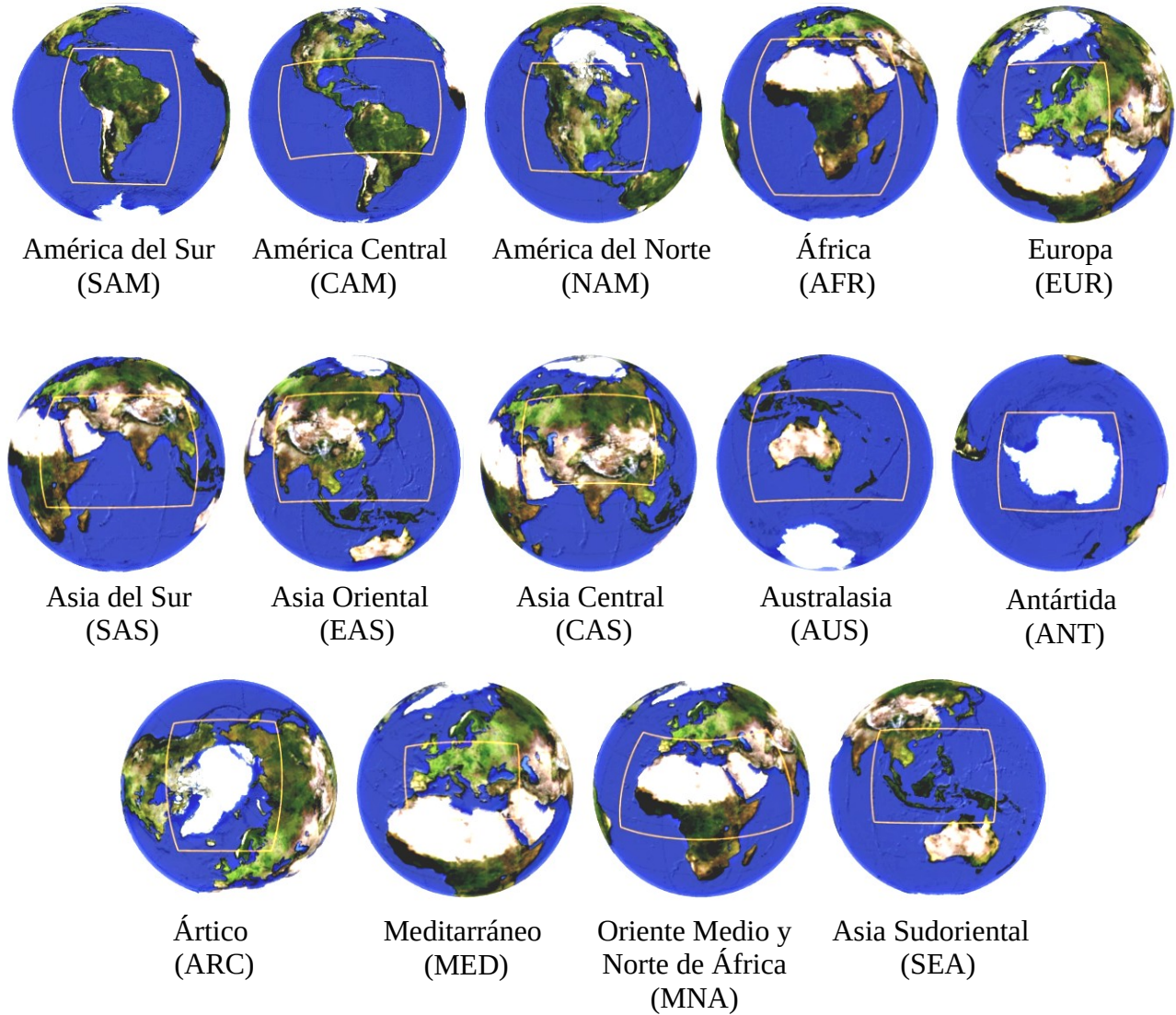
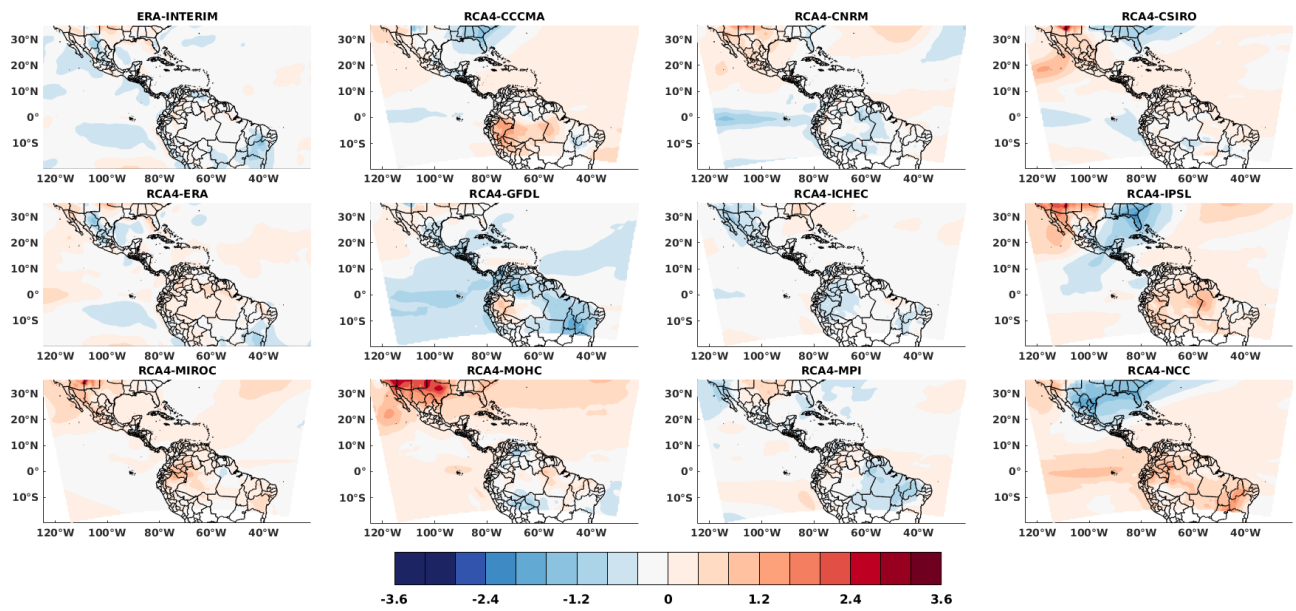
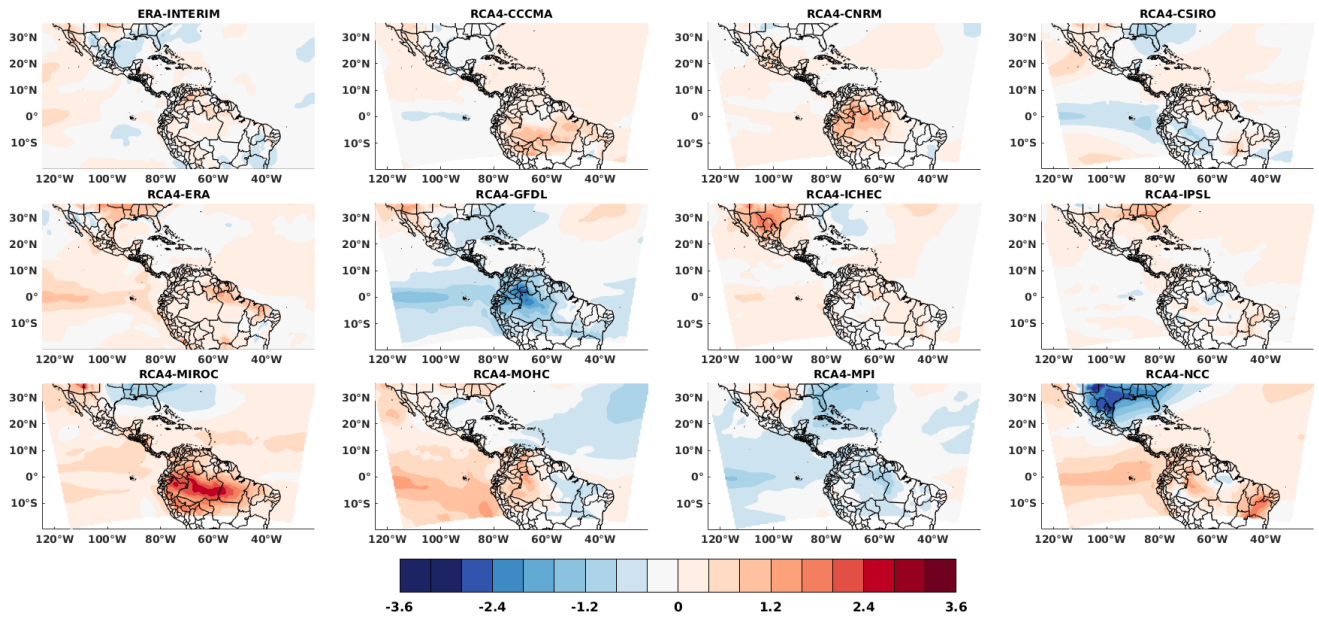


Figura A2. Dominios definidos en el proyecto CORDEX para emplear el proceso de la regionalización dinámica o estadística; fuente <https://www.cordex.org/domains/>.

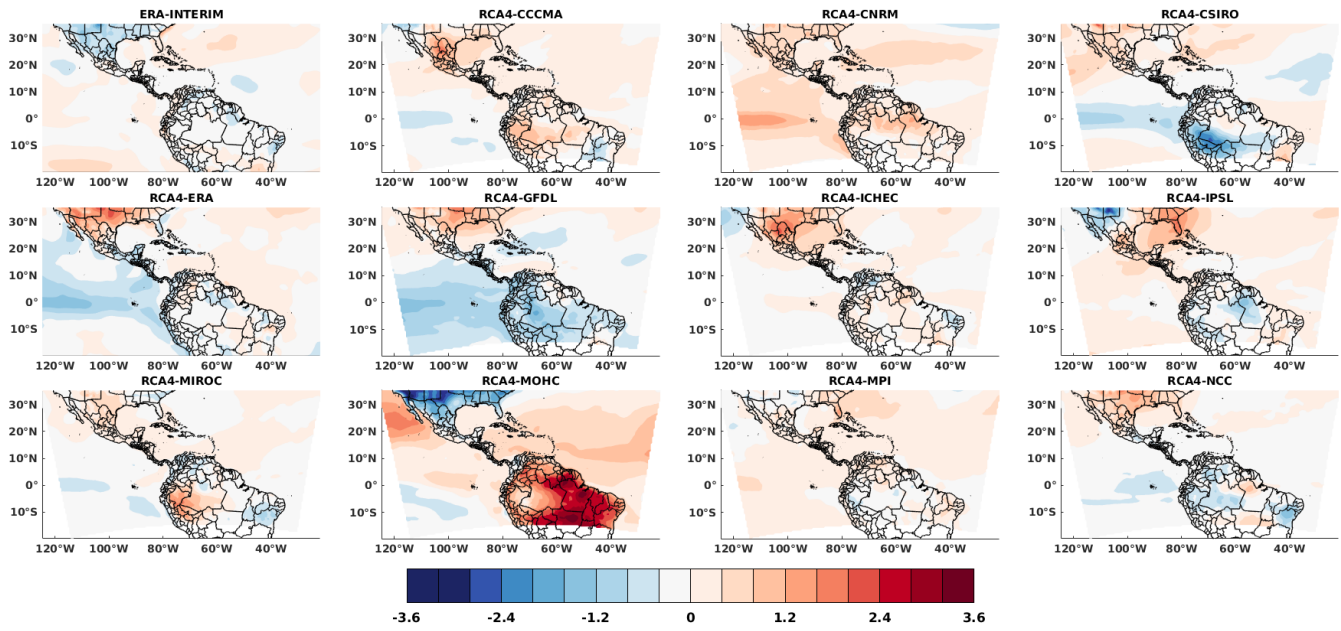
ANEXO C



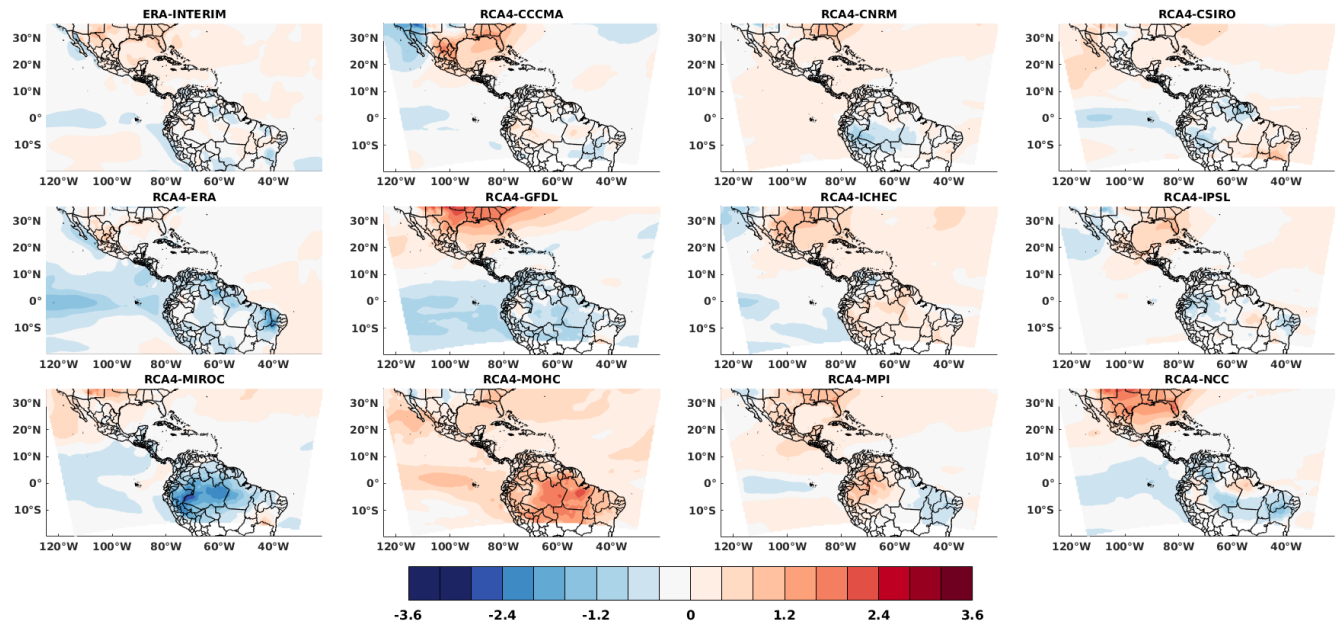
A3. Anomalia de la TAS para los tres años de sistemas frontales menos activos, en referencia a la BC.



A4. Anomalia de la TAS para los tres años de sistemas frontales menos activos, en referencia a la MN.



A5. Anomalía de la TAS para los tres años de sistemas frontales menos activos, en referencia a la GM.



A6. Anomalía de la TAS para los tres años de sistemas frontales menos activos, en referencia a la GM.

ANEXO D

Celda de Walker

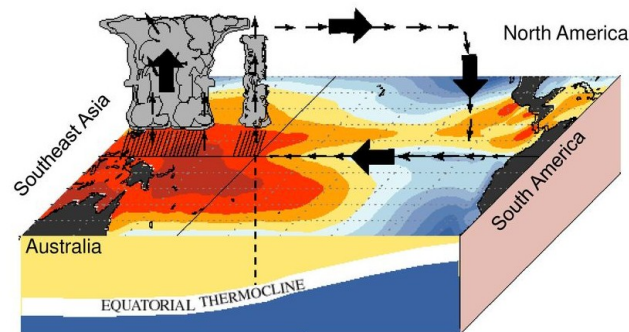


Figura 7A. Esquema ilustrativo de Celda de Waker, eventualmente visto como referencia a condiciones neutras, ante los patrones de temperatura superficial del mar (SST; e.g., desarrollo de nubes de importante crecimiento vertical y precipitaciones sobre el Pacífico occidental); y caracterizarse por presentar aguas con surgencia sobre en las costas de América Ecuatorial (termoclina próxima a la superficie de ésta), i.e., la región del Pacífico oriental, como resultado de los vientos Alisios. NOAA-CPC

La circulación que se da longitudinal (este-oeste) a través del Pacífico ecuatorial se conoce como celda de Walker o circulación de Walker; la cual se genera de la siguiente manera:

-El agua del Pacífico de Indonesia y del norte de Australia está normalmente más caliente que la del otro lado del océano, en las costas americanas, razón por la cual el aire tiende a elevarse en la zona australiana, creando una depresión que induce una corriente de aire superficial que va de América a Indonesia, llevando consigo grandes cantidades de humedad, que dejan importantes lluvias cuando suben. En altura se crea una contracorriente de aire más seco en sentido contrario en altura, que desciende conforme se enfría y se acerca a las costas americanas. Con respecto a los vientos de la parte inferior de la circulación de Walker, referido a los vientos de Alisios, arrastran el agua superficial cálida desde las costas americanas hasta las de Australia, ocasionando una surgencia en las costas de Perú. Esta surgencia de agua fría y muy rica en alimentos hace que, en condiciones normales, estas aguas sean muy ricas en pesca (en este punto, la celda de Walker se encuentra dentro de condiciones normales o neutras; fig. A7). Cuando éstas condiciones varían, la circulación de Walker se modifica y presenta oscilaciones, dando paso a eventos conocidos como El Niño y la Niña-.

El Niño y la Niña

Entonces, cuando las temperaturas de la superficie del mar en el Océano Pacífico tropical central y oriental se vuelven sustancialmente más cálidas que el promedio y los vientos alisios

ecuatoriales entran en proceso de debilitamiento, o incluso una reversión; la celda de Walker se ve modificada sustancialmente (ver figura A8), cuyos patrones asociados generan condiciones favorables para el desarrollo de nubes y lluvias a lo largo de las zonas tropicales, principalmente en las zonas centrales y orientales de la cuenca del Pacífico.

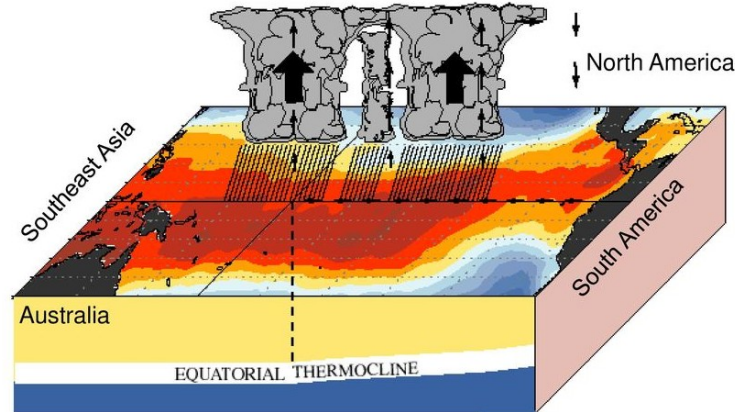


Figura 8A. Esquema ilustrativo similar a la figura 7A, pero referido a eventos de Niño: notar que la SST presenta importantes anomalías cálidas que se extienden sobre toda la región Ecuatorial, causando cambios importantes en la celda de Walker y sus patrones asociados (crecimientos verticales de nubes y precipitaciones sobre la zona central y occidental del Pacífico). Además, debido a la debilidad o ausencia de los vientos Alisios en superficie, en este punto la termoclina se ve inmersa por a bajo de lo normal. NOAA-CPC

Por su parte, La Niña ocurre cuando los vientos alisios son más fuertes de lo normal (fig. A9), lo que causa un aumento de la afluencia de aguas frías a lo largo del Pacífico oriental y se impulsa más agua fría a través del Pacífico.

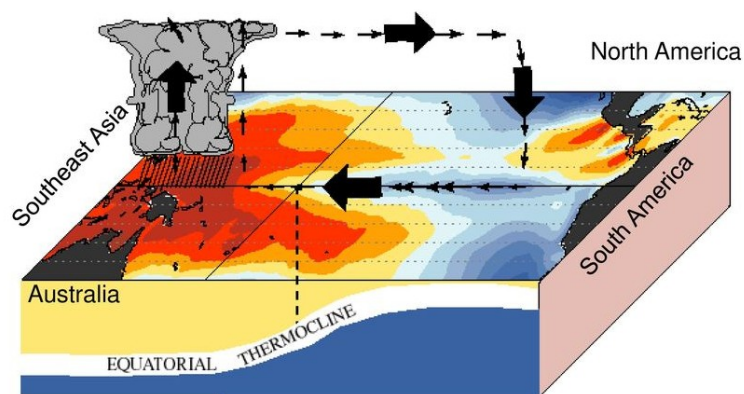


Figura 9A. Esquema ilustrativo referido a eventos de Niña: notar que la SST presenta importantes anomalías frías en esta fase, que se extienden sobre toda la región central y oriental del Ecuador; en este punto, causando el reforzamiento de la celda de Walker y sus patrones asociados (crecimientos verticales de nubes y precipitaciones sobre la zona oriental del Pacífico). NOAA-CPC

Fuentes bibliográficas

- Ahrens, C. D., 2012. *Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment*. Cengage Learning.
- Andrews, D. G., 2010. *An introduction to atmospheric physics*. Cambridge University Press.
- Berry, G., M. J. Reeder, and C. Jakob, 2011. A global climatology of atmospheric fronts. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L04809, doi:10.1029/2010GL046451.
- Bohn, T. J., & Vivoni, E. R., 2016. Process-based characterization of evapotranspiration sources over the North American monsoon region. *Water Resources Research*, 52(1), 358-384.
- Boyd, J., L. Jugan, M. Rich, y B. Roser, 1990. Naval Oceanographic and Atmospheric Research Laboratory, Technical Note # 83. 3-8pp.
- Bukovsky, M. S., C. M. Carrillo, D. J. Gochis, D. M. Hammerling, R. R. McCrary, and L. O. Mearns, 2015. Toward assessing NARCCAP regional climate model credibility for the North American monsoon: future climate simulations. *Journal of Climate* 28:6707–6728.
- Carter, T. R., M. L. Parry, H. Harasawa, and S. Nishioka, 1994. IPCC technical guidelines for assessing climate change impacts and adaptations. University College and Centre for Global Environmental Research Rep. CGER1015-94, 59 pp.
- Catto, J. L., and S. Pfahl, 2013. The importance of fronts for extreme precipitation, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 10,791–10,801, doi:10.1002/jgrd.50852.
- Catto, J. L., N. Nicholls, C. Jakob, and K. L. Shelton, 2014. Atmospheric fronts in current and future climates. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 7642–7650.
- Cavazos, T., & Arriaga-Ramírez, S., 2012. Downscaled climate change scenarios for Baja California and the North American monsoon during the twenty-first century. *Journal of Climate*, 25(17), 5904-5915.
- Cervantes Pérez, J., 2011. *Los procesos del tiempo en la atmósfera, una breve introducción a la meteorología*. IETEC-Arana Editores. Xalapa, Ver. Pág, 30.
- Chan, S. C., & Misra, V., 2011. Dynamic downscaling of the North American Monsoon with the NCEP–Scripps regional spectral model from the NCEP CFS global model. *Journal of Climate*, 24(3), 653-673.
- Cracknell, A. P., 2001. *Remote sensing and climate change*. Springer.

- DiMego, G. J., Bosart, L. F., & Endersen, G. W., 1976. An examination of the frequency and mean conditions surrounding frontal incursions into the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. *Monthly Weather Review*, 104(6), 709-718.
- Dominguez, F., Miguez-Macho, G., & Hu, H., 2016. WRF with water vapor tracers: A study of moisture sources for the North American monsoon. *Journal of Hydrometeorology*, 17(7), 1915-1927.
- Fuentes-Franco R, Coppola E, Giorgi F, Graef F, Pavia EG, 2014. Assessment of RegCM4 simulated inter-annual variability and daily-scale statistics of temperatura and precipitation over Mexico. *Clim Dyn* 42:629–647. doi:10.1007/s00382-013 1686-z
- Galindo, I., & Mosiño, P. A., 1992. Precipitation patterns in Mexico associated with the El Niño/Southern oscillation (ENSO). In *International Symposium on Former ENSO Phenomena in Western South America: Records of El Niño Events* (pp. 111-5). Perú. Nuevo Mundo.
- Hall, R., Erdélyi, R., Hanna, E., Jones, J. M., & Scaife, A. A., 2015. Drivers of North Atlantic polar front jet stream variability. *International Journal of Climatology*, 35(8), 1697-1720.
- Hawcroft, M. K., L. C. Shaffrey, and H. F. Dacre, 2012. How much Northern Hemisphere precipitation is associated with extratropical cyclones? *Geophys. Res. Lett.*, 39, L24809, doi:10.1029/2012GL053866.
- Henry, W. K., 1979. Some aspects of the fate of cold fronts in the Gulf of Mexico. *Monthly Weather Review*, 107(8), 1078-1082.
- Hewson, T. D., 1998: Objective fronts. *Meteor. Appl.*, 5, 37–63.
- Hope, P., Keay, K., Pook, M., Catto, J., Simmonds, I., Mills, G., ... & Berry, G., 2014. A comparison of automated methods of front recognition for climate studies: A case study in southwest Western Australia. *Monthly Weather Review*, 142(1), 343-363.
- Huang, Y., Li, Q., Fan, Y., & Dai, X., 2017. Objective Identification of Trough Lines Using Gridded Wind Field Data. *Atmosphere*, 8(7), 121.
- Jenkner, J., Sprenger, M., Schwenk, I., Schwiertz, C., Dierer, S., & Leuenberger, D. (2010). Detection and climatology of fronts in a high-resolution model reanalysis over the Alps. *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling*, 17(1), 1-18.

- Jiménez, M., Baeza, C., Matías, L. G., Eslava, H., 2012. Mapas de índices de riesgo a escala municipal por fenómenos hidrometeorológicos. Informe preparado para el CENAPRED.
- Kirk, T. H., 1965. A Parameter for objective location of Frontal Zones. *Meteorological Magazine*, 94(1121), 351.
- Lu, J., Chen, G., & Frierson, D. M., 2008. Response of the zonal mean atmospheric circulation to El Niño versus global warming. *Journal of Climate*, 21(22), 5835-5851.
- Magaña, R., & Víctor, O., 1999. Los impactos de El Niño en México. In *Los impactos de El Niño en México*. México. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Maloney, E. D., Camargo, S. J., Chang, E., Colle, B., Fu, R., Geil, K. L., ... & Kinter, J., 2014. North American climate in CMIP5 experiments: Part III: Assessment of twenty-first-century projections. *Journal of Climate*, 27(6), 2230-2270.
- Mascaro, G., Vivoni, E. R., Gochis, D. J., Watts, C. J., & Rodriguez, J. C., 2014. Temporal downscaling and statistical analysis of rainfall across a topographic transect in northwest Mexico. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(4), 910-927.
- Mo, K. C., Schemm, J. K., Juang, H. M. H., Higgins, R. W., & Song, Y., 2005. Impact of model resolution on the prediction of summer precipitation over the United States and Mexico. *Journal of climate*, 18(18), 3910-3927.
- O'Hara, S. L., & Metcalfe, S. E., 1995. Reconstructing the climate of Mexico from historical records. *The Holocene*, 5(4), 485-490.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences discussions*, 4(2), 439-473.
- Reding, P. J., 1992. The Central American cold surge: An observational analysis of the deep southward penetration of North American cold fronts. TEXAS A AND M UNIV COLLEGE STATION.
- Renard, R. J. and Clarke, L. C., 1965. Experiments in numerical objective frontal analysis. *Mon. Wea. Rev.*, 93: 547-556.
- Rosenzweig, C., & Hillel, D., 2008. *Climate variability and the global harvest: Impacts of El Niño and other oscillations on agro-ecosystems*. Oxford University Press.

- Schroeder, M. J., & Buck, C. C., 1970. Fire weather: a guide for application of meteorological information to forest fire control operations. *The Bark Beetles, Fuels, and Fire Bibliography*, 14.
- Schultz, D. M., W. Edward, W. E. Bracken, and L. Bosart, 1998. Planetary and synoptic-scale signatures associated with Central American cold surges. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 5–27.
- Simmonds, I., Keay, K., & Tristram Bye, J. A., 2012. Identification and climatology of Southern Hemisphere mobile fronts in a modern reanalysis. *Journal of Climate*, 25(6), 1945–1962.
- Slade, D. H. (1968). *Meteorology and Atomic Energy*, 1968 (No. TID--24190). Environmental Science Services Administration, Silver Spring, Md. Air Resources Labs..
- Small, R. J. O., De Szoeke, S. P., & Xie, S. P., 2007. The Central American midsummer drought: regional aspects and large-scale forcing. *Journal of Climate*, 20(19), 4853–4873.
- Steinacker, R. A., 1992. Dynamical aspects of frontal analysis. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 48(1-4), 93–103.
- Stumpf, H. G., 1975. Satellite detection of upwelling in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *J. Phys. Oceanogr.*, 5, 383–388.
- Turrent, C., and T. Cavazos, 2012. Numerical investigation of wet and dry onset modes in the North American monsoon core region. Part I: A regional mechanism for interannual variability. *J. Climate*, 25, 3953–3969.
- Torres-Alavez, A., T. Cavazos, and C. Turrent, 2014. Land–sea thermal contrast and intensity of the North American monsoon under climate change conditions. *J. Climate*, 27, 4566–4580.
- Wallace, JM, & Hobbs, PV, 2006. *La ciencia atmosférica: una encuesta introductoria* (Vol. 92). Elsevier
- Whiteman, C. D., 2000. *Mountain meteorology: fundamentals and applications*. Oxford University Press.
- Wigley, T. M. L., Jones, P. D., Briffa, K. R., and Smith, G., 1990. Obtaining sub-grid-scale information from coarse-resolution general circulation model output. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 95(D2), 1943–1953.
- Wilby, R. L., and Wigley, T. M. L., 1997. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in physical geography*, 21(4), 530–548.