

3.3.1. Análisis de asociación y dependencia

La temperatura superficial del mar es una de las principales variables asociadas con la ocurrencia de diferentes fenómenos macroclimáticos, por lo que el cálculo de la correlación entre esta variable y las series de precipitación en el país, permite identificar las zonas del océano que pueden estar más relacionadas con la precipitación en el país. En la Figura 3-10 se presentan los mapas de correlación de SST con la PC1 de la precipitación en Colombia para rezagos de 0, 2, 4 y 6 meses.

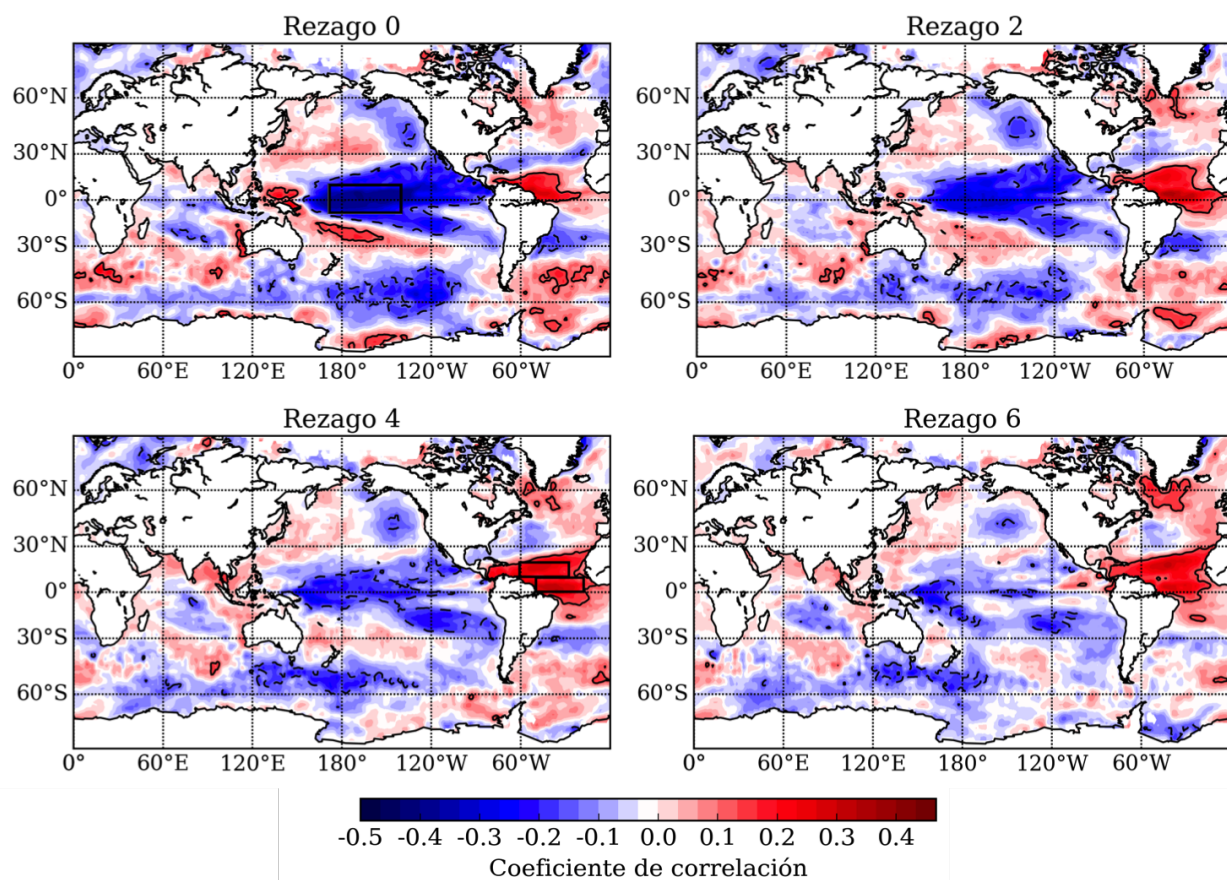


Figura 3-10: Mapas de correlación de SST con la PC1 de la precipitación en Colombia para rezagos de 0, 2, 4 y 6 meses. Contornos indican zonas con correlaciones que superan el nivel de significancia estadística del 95 %.

En la Figura 3-10 se observa que en el mapa de rezago 0 se presentan altas correlaciones negativas de la primera componente de la precipitación en Colombia con la temperatura superficial del mar sobre el Océano Pacífico Tropical, las cuales son mayores hacia el centro del

mismo, en la región donde se encuentran las zonas Niño, que corresponden a donde se desarrolla el fenómeno ENSO. De igual forma se observan correlaciones positivas hacia el oeste del Pacífico formando una herradura, lo cual igualmente responde al patrón característico de SST que se forma sobre este océano con la ocurrencia del fenómeno (Wang and Picaut, 2004). Sobre el Pacífico Norte se observa igualmente una región con correlaciones negativas significativas a rezagos de 0 y 2 meses cerca a la costa de Norteamérica, donde se desarrolla la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés) (Mantua and Hare, 2002).

En el Océano Atlántico, por otro lado, se observa una región con altas correlaciones positivas hacia el norte del ecuador y sobre el Mar Caribe, las cuales aumentan a medida que se va aumentando el rezago, siendo máximas en los rezagos entre 4 y 6 meses, en los cuales se alcanzan valores similares a los obtenidos con el Océano Pacífico Tropical. De igual forma, se identifica que para el rezago de 6 meses se tiene una región al norte del Océano Atlántico con correlaciones significativas, en zonas donde se desarrollan fenómenos como la Oscilación del Atlántico Norte (NAO por sus siglas en inglés) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO por sus siglas en inglés) (Grossmann and Klotzbach, 2009).

A partir de las relaciones encontradas de la primera componente de la precipitación en el país con la temperatura superficial del mar, es posible definir zonas con máximas correlaciones para establecer índices que guarden una alta relación con la precipitación del país. En la Figura 3-10 se presenta sobre los mapas de correlación de rezago 0 y 4 meses la localización de los 3 índices calculados; el índice *O.PAC* entre las latitudes 10°S y 10°N y las longitudes 170°E y 140°W, índice *O.ATLT* entre latitudes 0° y 10°N y longitudes 50°W y 20°W e índice *O.ATLNe* entre latitudes 11°N y 21°N y longitudes 60°W y 30°W.

Además de estos índices calculados, existen diferentes índices sobre los océanos Pacífico y Atlántico que pueden ayudar a caracterizar la relación entre las anomalías de precipitación en Colombia y la variabilidad de estos océanos. En la Figura 3-11 se presenta la matriz de correlación entre las primeras dos componentes de la precipitación estandarizada en Colombia y los índices climáticos de la NOAA y los calculados a partir de los mapas de correlación con la temperatura superficial del mar para diferentes rezagos.

Se observa en la Figura 3-11 que la PC1 guarda una relación significativa con el Océano Pacífico Tropical, que es máxima en el rezago 0 y estadísticamente significativa hasta los 3 meses de rezago aproximadamente. Esta relación es inversa con las anomalías de temperatura en este océano, como se había observado en la Figura 3-10 y continúa negativa con índices como el MEI y el BEST, que aunque incluyen otras variables en su cálculo, su signo es dominado por las anomalías de temperatura. Con el índice SOI las correlaciones son positivas debido a que por la naturaleza del índice que mide diferencias de presión, su signo es contrario a los demás índices relacionados con el ENSO. Por otro lado, se observa que con los

índices medidos el norte del Océano Atlántico Tropical(TNA, O.ATLT, O.ATLN, AMM) se obtienen correlaciones significativas en todos los meses de rezago, las cuáles son más fuertes en rezagos entre 2 y 6 meses, mientras que con el Atlántico Tropical sur las correlaciones son más bajas aunque significativas a partir del segundo mes y máximas en los 5 meses de rezago. Con el Atlántico Norte se obtienen correlaciones más altas con el índice AMO, mientras que con la NAO sólo son significativas en el sexto mes de rezago. Ambos índices presentan correlaciones máximas en el sexto mes de rezago pero presentan signo contrario dado que ambos guardan una relación inversa (Grossmann and Klotzbach, 2009).

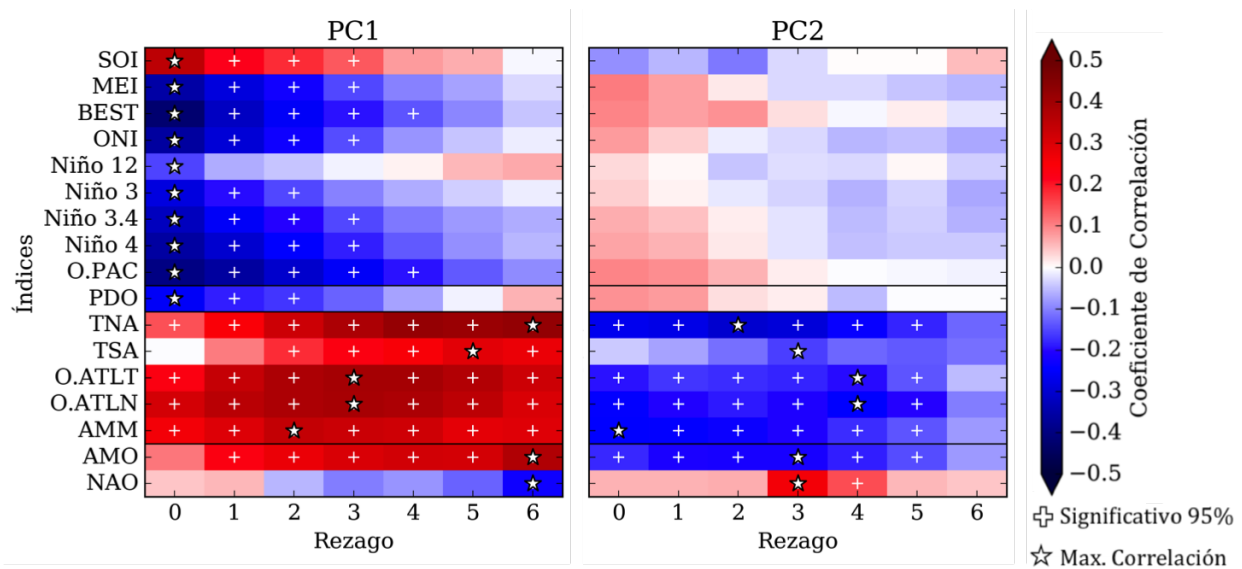


Figura 3-11: Matriz de correlación entre los índices macroclimáticos y las PC1 y PC2 de la precipitación estandarizada en Colombia para diferentes rezagos.

Para la segunda componente de la precipitación (PC2) se observa que se pierde completamente la relación con el ENSO, pero se conservan correlaciones significativas aunque más bajas y de signo contrario con el océano Atlántico. En este caso la relación con el Atlántico tropical y norte se observa más fuerte para rezagos menores, siendo con todos los índices más alta entre los 2 y 4 meses, con excepción del AMM con el que se observan las correlaciones máximas en el rezago 0.

De igual forma, se presentan en la Figura 3-12 las correlaciones de los índices con la precipitación en cada una de las regiones delimitadas en el país, donde se observa que las regiones Caribe y Andina presentan un comportamiento muy similar al de la PC1, siendo más fuerte la relación con el Atlántico en la región Caribe que en la Andina, mientras que en la región Pacífico la relación con este océano es prácticamente insignificante y es el Océano Pacífico el que domina las correlaciones, siendo esta relación más fuerte en el rezago 0. Con respecto a

las regiones Orinoquía y Amazonas, la relación lineal con el Océano Pacífico es muy baja e insignificante sobre el Amazonas, sin embargo, se observa para ambas regiones una relación significativa con el Océano Atlántico, la cual en el caso de la región Orinoquía tiene el mismo signo que en las regiones Andina y Caribe pero es bastante baja a pesar de ser estadísticamente significativa a partir del tercer o cuarto mes de rezago. Con la región Amazonas se observa que se invierte el signo de la correlación con el Atlántico y la relación se presenta más fuerte en los rezagos más bajos, reflejando en gran medida lo observado con la PC2.

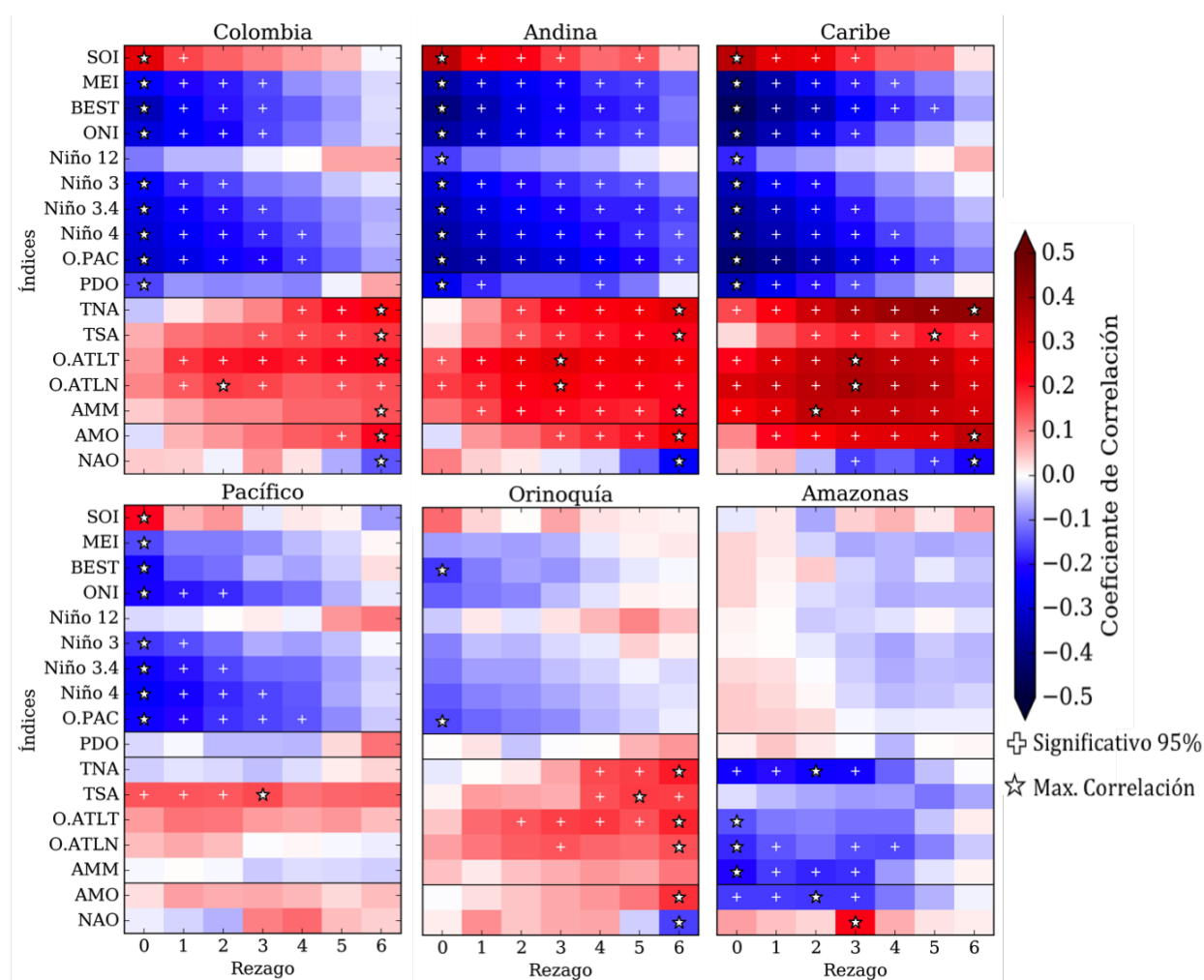


Figura 3-12: Matriz de correlación entre los índices macroclimáticos y la precipitación estandarizada sobre las regiones de Colombia para diferentes rezagos.

El patrón espacial de las relación de los océanos Pacífico y Atlántico con la precipitación en el país se puede observar más claramente en la Figura 3-13, donde se presentan las correlaciones de los índices Niño 3.4 y TNA con cada uno de los pixeles del TRMM sobre Colombia para los rezagos 0 y 3, respectivamente. Allí se evidencia la relación más potente e inversa de

las temperaturas del Océano Pacífico sobre el oeste y norte del país, cubriendo las regiones Andina, Pacífico y Caribe y la relación directa con el Océano Atlántico Tropical más fuerte sobre el norte y extendiéndose sobre los Andes e invirtiendo el signo hacia el sur del país, presentando una correlación inversa con la región cubierta por la selva amazónica colombiana.

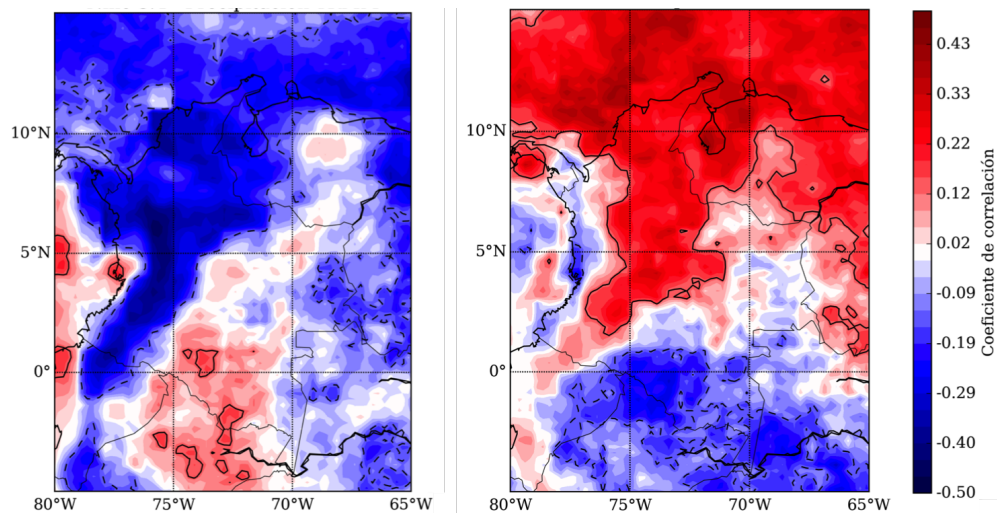


Figura 3-13: Mapa de correlación entre los índices Niño 3.4 (izq) y TNA (der) con la precipitación del TRMM sobre Colombia para rezagos de 0 y 3 meses respectivamente. Contornos indican zonas con correlaciones que superan el nivel de significancia estadística del 95 %.

3.3.2. Análisis probabilístico

El análisis probabilístico consiste en evaluar como cambian las probabilidades de excedencia de la precipitación en las regiones de Colombia cuando se tienen condiciones extremas por encima o por debajo de lo normal en los índices de temperatura superficial del mar identificados en las sección anterior que presentan una mayor relación con cada una de las regiones del país. El análisis se basa en los cambios observados en las probabilidades de excedencia de los quintiles o percentiles 20, 40, 60 y 80, que para la distribución completa le corresponden probabilidades de excedencia de 80 %, 60 %, 40 % y 20 % respectivamente. En la Figura 3-14 se presentan los mapas con las magnitudes de los diferentes percentiles sobre Colombia.

En la Figura 3-14 se observa que las magnitudes de la precipitación de cada uno de los quintiles coincide con la variabilidad espacial de la precipitación en Colombia, la cual se caracteriza por mayores acumulados sobre la costa Pacífica y la zona más seca al norte del país, así como en las zonas más altas de la cordillera de los Andes. En las Figuras 3-15 y 3-16 se presentan los cambios en las probabilidades de excedencia de los quintiles de la precipitación en Colombia en condiciones de anomalías positivas y negativas de los índices

Niño 3.4 y TNA respectivamente.

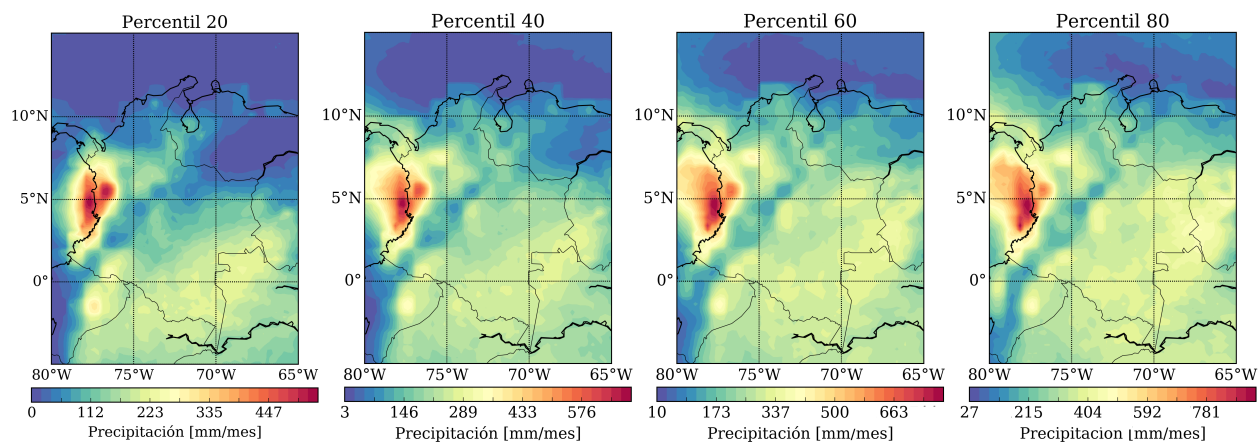


Figura 3-14: Magnitudes de precipitación de los percentiles 20, 40, 60 y 80 sobre Colombia.

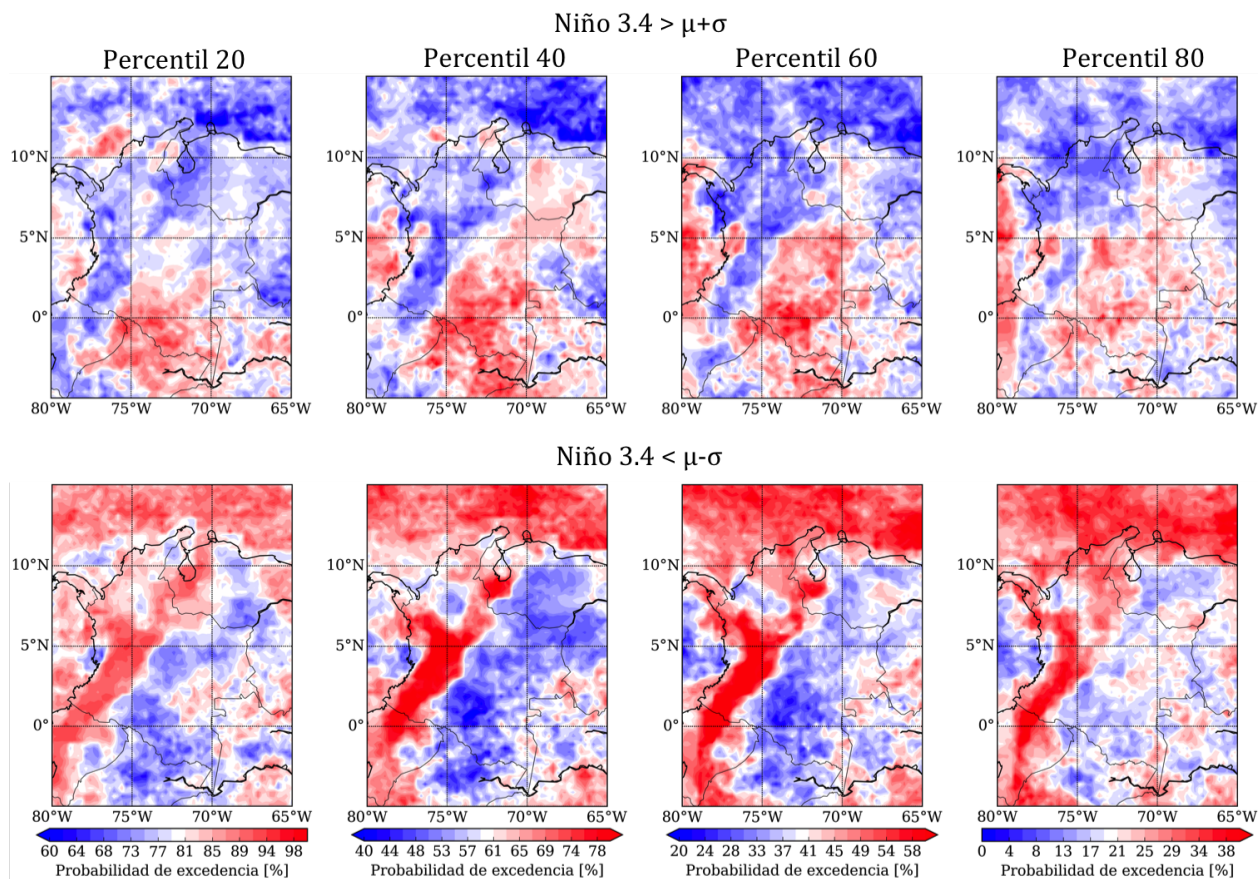


Figura 3-15: Cambios en las probabilidades de excedencia de los quintiles de la precipitación en Colombia en condiciones de anomalías positivas y negativas del índice Niño 3.4

En la Figura 3-15 se observa que en el caso de anomalías en la región Niño 3.4 superiores a una desviación estándar por encima de la media, las probabilidades de excedencia de la precipitación se reducen sobre las regiones Andina, Caribe y Pacífico, mientras que sobre la región amazonas especialmente y sobre la región Orinoquía, las probabilidades de excedencia aumentan bajo estas condiciones del océano Pacífico Tropical. Con respecto al caso de anomalías negativas inferiores a una desviación estándar por debajo de la media, se observa que la región que principalmente se ve afectada es la región Andina, en la cual las probabilidades de excedencia de la precipitación aumentan significativamente, lo cual ocurre igualmente en la región Caribe y Pacífico, a pesar de que en estas regiones no es tan marcado el impacto de esta condición del Océano Pacífico. En las regiones Orinoquía y Amazonas se observa igualmente que se invierte el impacto, presentandose probabilidades de excedencia menores a las observadas en condiciones normales. Para ambas condiciones de la región Niño 3.4, se observa que los efectos sobre Colombia se ven más marcados en los percentiles 40 y 60, mientras que en los percentiles que se acercan más a los extremos, 20 y 80, las probabilidades de excedencia no se ven tan altamente modificadas.

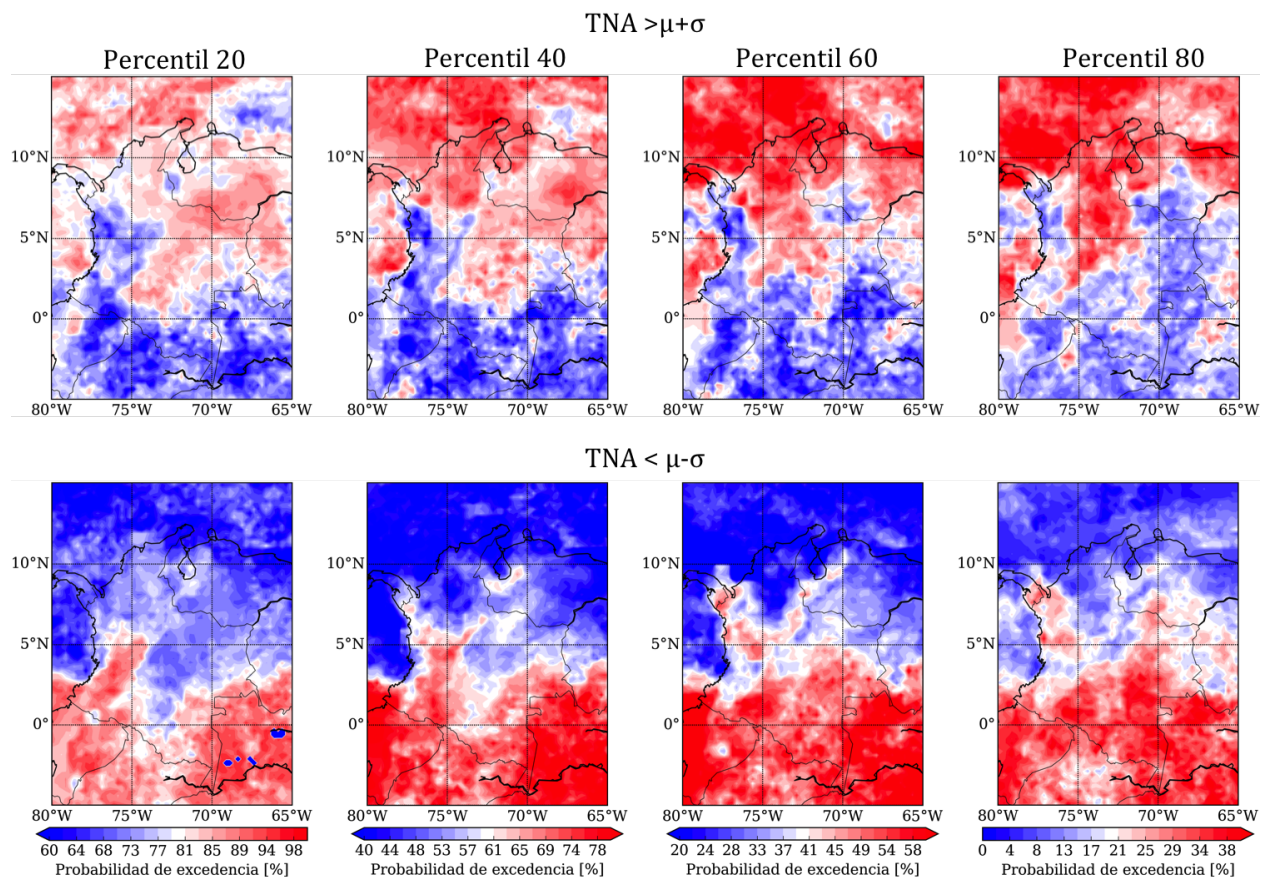


Figura 3-16: Cambios en las probabilidades de excedencia de los quintiles de la precipitación en Colombia en condiciones de anomalías positivas y negativas del índice TNA

En el caso de anomalías positivas y negativas del índice TNA, se observa en la Figura 3-16 que la precipitación sobre el país presenta una respuesta opuesta a la observada con las condiciones del océano Pacífico, puesto que en este caso se identifica un aumento de las probabilidades de excedencia de la precipitación principalmente sobre la región Caribe y un poco sobre el centro del país, cuando las anomalías del índice superan una desviación estándar por encima de la media; mientras que cuando el índice presenta valores negativos, las probabilidades de excedencia de la precipitación en estas mismas zonas del país tienden a disminuir, reflejando la relación directa entre esta zona del océano Atlántico y la región Caribe y parte de la Andina. Con el sur del país, el comportamiento es opuesto, caracterizado por menores probabilidades de excedencia de la precipitación cuando el índice presenta valores altos y mayores probabilidades cuando el índice es negativo. Cuando se tienen anomalías positivas del TNA se observa que las probabilidades de excedencia presentan mayores cambios en los percentiles 60 y 80, mientras que cuando se presentan anomalías negativas, las modificaciones se observan principalmente en los percentiles 40 y 60.

El mismo análisis es posible aplicarlo a las series de precipitación integradas sobre cada una de las regiones, de tal forma que se pueda observar con mayor claridad la modificación de toda la curva de distribución de probabilidades en condiciones de anomalías positivas y negativas de los índices climáticos. En la Figura 3-17 se presenta la distribución de la serie de precipitación de la región Caribe y sus modificaciones bajo condiciones de anomalías significativas negativas y positivas de los índices Niño 3 y TNA.

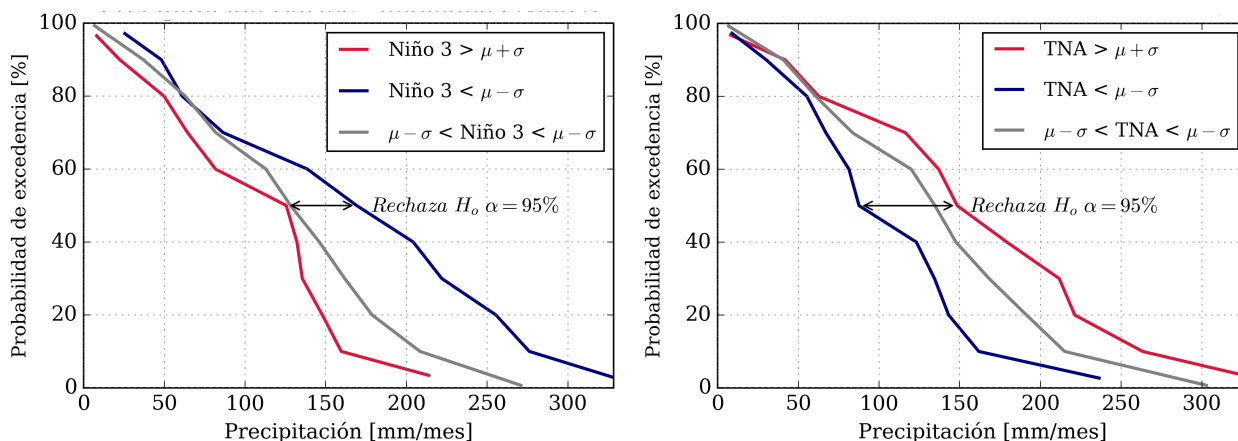


Figura 3-17: Cambios de la distribución de probabilidad de la serie de precipitación en la región Caribe en condiciones de anomalías positivas y negativas del índice Niño 3 y del índice TNA.

En la Figura 3-17 se observa que la distribución de probabilidades de la precipitación en la región Caribe cambia de acuerdo a las condiciones de los índice que se están analizando. En el caso de anomalías en la zona Niño 3, se observa que las probabilidades de excedencia

de la precipitación en la región Caribe aumentan en condiciones de anomalías negativas del índice y se ven reducidas en condiciones de anomalías positivas. Caso contrario ocurre con el índice TNA, con el cual la precipitación en la región Caribe presenta una relación directa, caracterizada por reducciones de las probabilidades de excedencia de la precipitación en el caso de anomalías negativas del índice y aumentos de las probabilidades en el caso de anomalías positivas. Para ambos índices se observa que los mayores cambios en la precipitación se presentan desde la mitad de la distribución hasta los percentiles más altos.

En la Figura 3-18 se presenta la distribución de probabilidades de la precipitación sobre la región Amazonas y sus modificaciones en casos extremos de los índices Niño 3.4 y TNA. Se observa que la relación con el Océano Pacífico es baja, por lo que la prueba de Kolmogorov-Smirnov no permite rechazar la hipótesis de que las distribuciones de la precipitación en el Amazonas durante anomalías negativas y positivas del índice Niño 3.4 sean iguales, con un 95% de confiabilidad. En el caso de anomalías del índice TNA, las distribuciones son diferentes y se observa que las probabilidades de excedencia de la precipitación aumentan en condiciones de anomalías negativas del índice y disminuyen en condiciones de anomalías positivas.

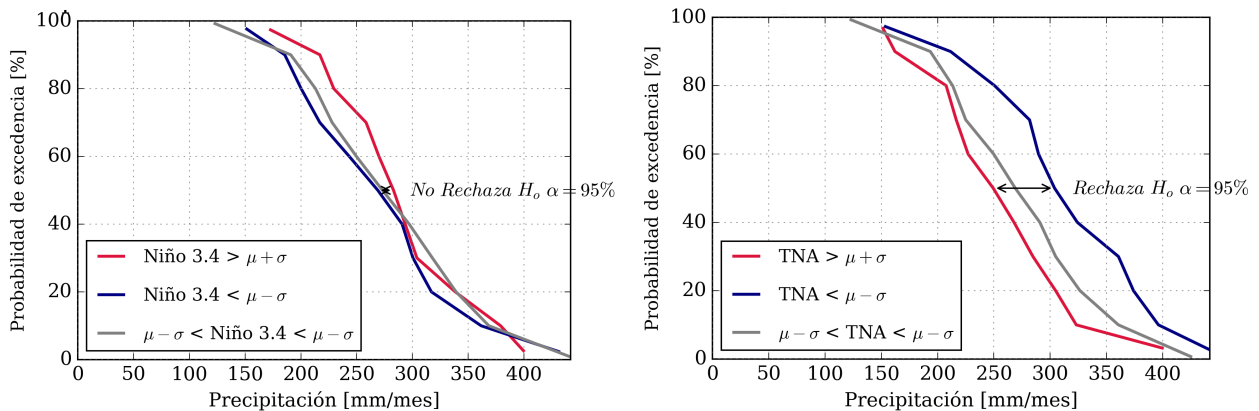


Figura 3-18: Cambios de la distribución de probabilidad de la serie de precipitación en la región Amazonas en condiciones de anomalías positivas y negativas del índice Niño 3.4 y del índice TNA.

En general, los resultados reflejan que la región Caribe es la que presenta mayores modificaciones de la distribución de probabilidades de la precipitación bajo condiciones extremas de los índices climáticos de los océanos Pacífico y Atlántico Tropical, seguida por la región Andina que igualmente se ve considerablemente afectada por las anomalías temperatura superficial del mar en estas zonas. Las región Orinoquía no presenta cambios significativos con las condiciones extremas de ninguno de los índices analizados, mientras que la región Amazonas sólo responde al Atlántico Tropical Norte y la región Pacífico solo se ve afectada

por las condiciones del Océano Pacífico Tropical.

En la Tabla 3-1 se presenta el resumen de los índices con los cuales se presentan mayores cambios en la distribución de la precipitación en cada una de las regiones y las diferencias en la probabilidad de excedencia de los quintiles en los casos de anomalías positivas o negativas del índice.

Tabla 3-1: Cambios en las probabilidades de excedencia de la precipitación en las regiones de Colombia en condiciones anómalas de los índices climáticos

Serie	Índice	Condición	Diferencias en la probabilidad de excedencia			
			P. 20	P. 40	P. 60	P. 80
Colombia	Niño 3	Positivo	-5%	-10%	0%	2%
		Negativo	3%	-5%	-6%	1%
Andina	Niño 3.4	Positivo	-4%	-7%	-2%	-2%
		Negativo	9%	2%	3%	1%
Caribe	Niño 3	Positivo	-9%	-4%	-16%	-11%
		Negativo	1%	6%	14%	24%
Pacífico	Niño 4	Positivo	0%	-9%	-10%	-5%
		Negativo	3%	7%	14%	15%
Orinoquía	TNA	Positivo	4%	2%	3%	-5%
		Negativo	-1%	-3%	2%	3%
Amazonas	TNA	Positivo	-4%	-7%	-8%	-8%
		Negativo	7%	19%	17%	18%

3.4. Mecanismos físicos de teleconexión con fenómenos macroclimáticos

En la sección anterior se evidencia la relación existente entre la precipitación en las regiones de Colombia y diferentes fenómenos macroclimáticos, resaltando las temperaturas superficiales del mar en la banda tropical del Atlántico y centro-este del Pacífico como zonas que pueden llegar a tener una alta influencia en la lluvia sobre la mayor parte del territorio colombiano. En esta sección se busca investigar los posibles mecanismos físicos que explican dicha teleconexión, a través del análisis del comportamiento de diferentes variables climáticas durante condiciones anómalas de precipitación y de los índices macroclimáticos.

En La Figura 3-19 se presentan las anomalías de las variables de temperatura superficial del mar, omega a 500 hPa y humedad específica integrada en la vertical promediadas para todos los meses en los cuales se presentan anomalías positivas y negativas de precipitación

en Colombia.

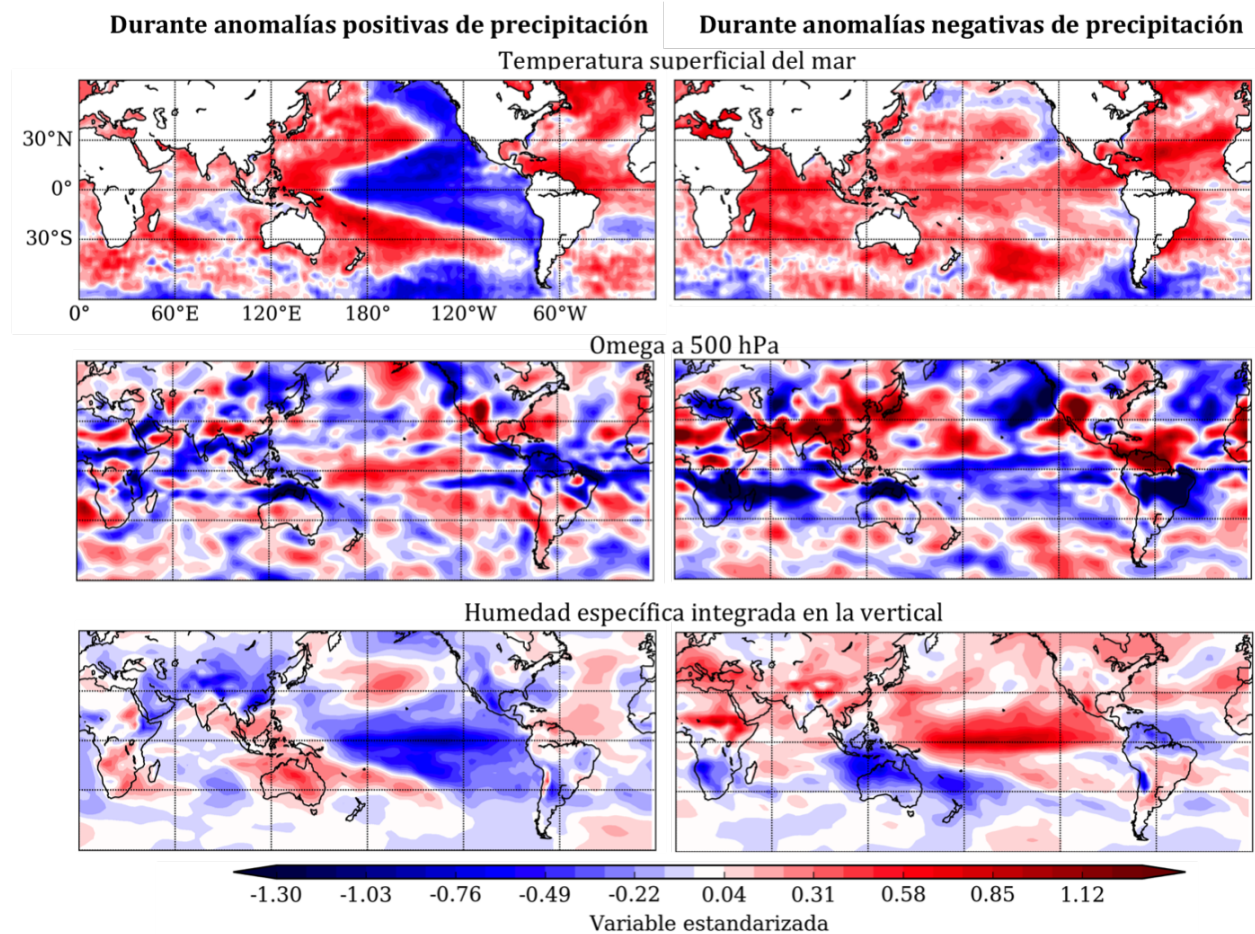


Figura 3-19: Anomalías promedio de temperatura superficial del mar, omega a 500 hPa y humedad específica integrada en la vertical durante los meses con anomalías positivas y negativas de precipitación en Colombia

La Figura 3-19 muestra que durante los meses con anomalías positivas de precipitación en Colombia coinciden con temperaturas por debajo de lo normal en el centro-este del Pacífico Tropical, donde se forma el patrón característico del fenómeno de la Niña, caracterizado por anomalías negativas de temperatura en esta zona y anomalías positivas de temperatura en el oeste del océano formando una herradura (Wang et al., 2012). Sobre el Pacífico Norte, se identifica de igual forma un patrón de temperaturas que se asimila al que se obtiene durante una fase fría de la PDO (Newman et al., 2016). En cuanto al océano Atlántico se observa un calentamiento significativo sobre el norte del ecuador y el norte del océano, que podrían estar relacionados con la ocurrencia de fenómenos macroclimáticos como la AMO (Marshall et al., 2001; Grossmann and Klotzbach, 2009).

En el caso de anomalías negativas de precipitación, el patrón de temperatura del mar no es tan claro como en el caso de anomalías positivas. En este caso, se observa un calentamiento sobre la mayor parte de los tres océanos, que en el caso del Océano Pacífico, a pesar de que no se forma con tanta precisión el patrón de El Niño, se puede pensar en la asociación de algunos de los eventos con dicho fenómeno. Sobre el Océano Atlántico, el patrón es muy similar al obtenido en el caso de anomalías positivas de precipitación, lo cual confunde y no va de acuerdo con lo esperado teniendo en cuenta el signo de las correlaciones observadas de la precipitación con el Atlántico Tropical Norte y Atlántico Norte, presentadas en los análisis anteriores. Sin embargo, se observa que el calentamiento en este caso se presenta en una zona levemente más al norte que en el caso de anomalías positivas.

La velocidad vertical del viento, presenta un comportamiento mucho más variable que la temperatura del mar. Sin embargo, se alcanza a identificar sobre el Océano Pacífico central anomalías positivas de esta variable en el caso de meses más lluviosos y anomalías negativas en el caso de meses más secos en el país. Las anomalías positivas de esta variable están asociadas a una mayor subsidencia (o un menor ascenso) de aire, mientras que las anomalías negativas se asocian a un mayor ascenso de aire, por lo que el comportamiento de esta variable en el Pacífico está indicando que durante las anomalías positivas de precipitación en el país, se observa una mayor subsidencia en el centro de este océano y mayor ascenso de aire hacia el continente marítimo y Suramérica, mientras que las anomalías negativas de precipitación en el país coinciden con un mayor ascenso de aire en el centro del pacífico y subsidencia hacia el oeste del océano y Suramérica. Dicho patrón describe el comportamiento característico de la Celda de Circulación de Walker durante las fases de La Niña y El Niño respectivamente (Wang et al., 2012; Wang and Picaut, 2004).

En cuanto a la humedad específica integrada en la vertical, se observa que durante ambos casos de anomalías de precipitación en el país, el patrón más significativo se obtiene sobre el Pacífico Tropical, el cual se caracteriza por anomalías negativas de humedad en el centro-este y anomalías positivas en sobre Australia y el continente marítimo y Suramérica en el caso de excesos de lluvia en el país y un comportamiento totalmente opuesto durante los meses con anomalías negativas de lluvia. Dichas anomalías coinciden con lo que normalmente ocurre con esta variable durante un fenómeno de La Niña o El Niño, respectivamente y que responde principalmente a la alteración de la celda de Walker durante ambas fases del ENSO, como se observa con el comportamiento de omega. Sobre el Atlántico Tropical norte se observan anomalías de humedad que pueden estar relacionadas con la misma alteración de la celda de Walker por el ENSO o por la dinámica inducida por las temperaturas altas observadas en esta zona en ambos casos.

En la Figura **3-20** es posible observar con mayor claridad, a partir de las anomalías de las funciones másicas de corriente, las modificaciones de la circulación de las celdas de Hadley

y de Walker que se encuentran asociadas a anomalías positivas y negativas de precipitación en Colombia.

Durante anomalías positivas de precipitación Durante anomalías negativas de precipitación

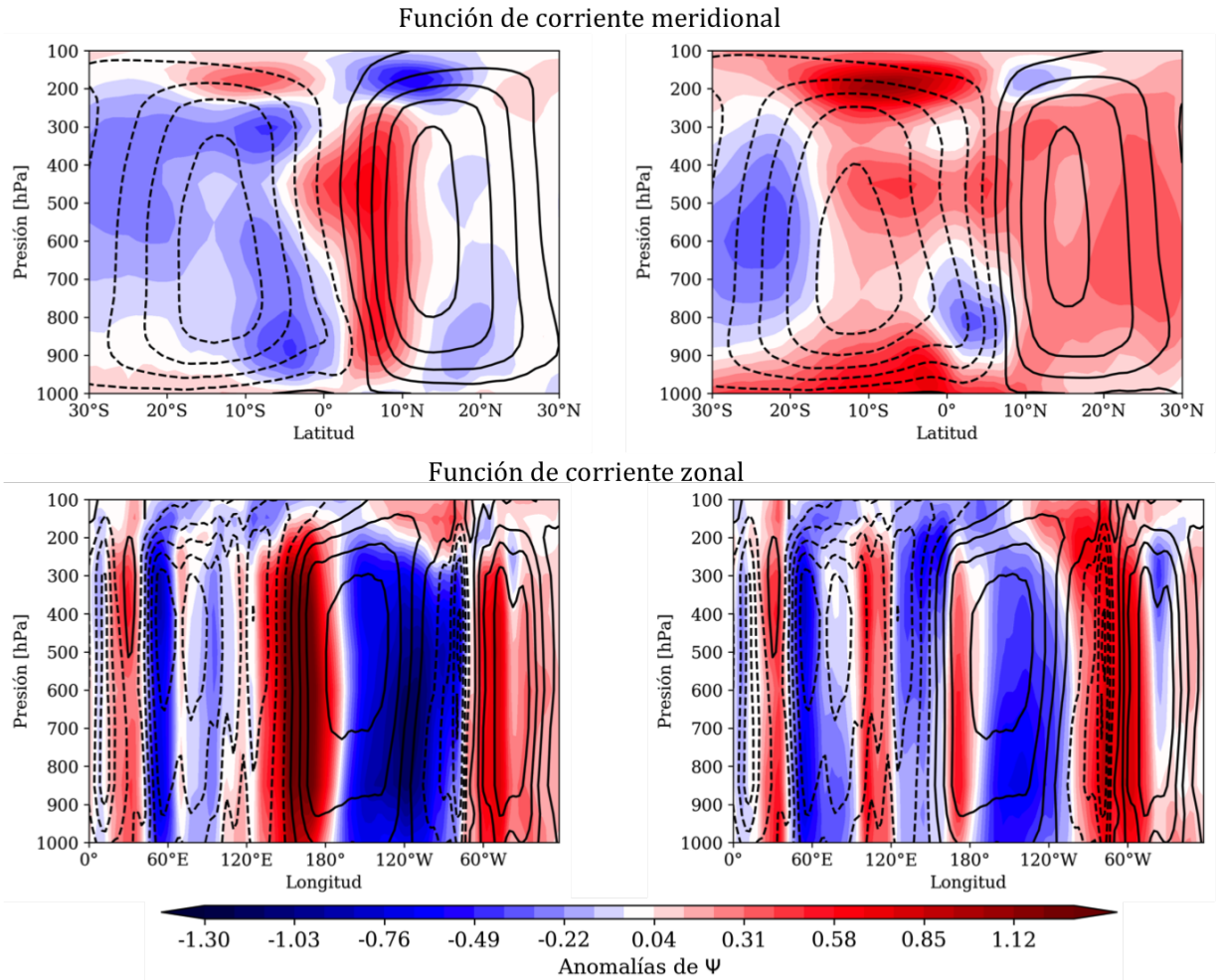


Figura 3-20: Anomalías promedio de las funciones másicas de corriente zonal y meridional durante los meses con anomalías positivas y negativas de precipitación en Colombia

Las anomalías de la función de corriente meridional muestran que los casos de lluvia por encima de lo normal en el país se encuentran asociados con un fortalecimiento de la Celda de Hadley, debido a que se observan anomalías positivas en el hemisferio norte, donde la celda tiene circulación positiva y anomalías negativas en la celda de circulación negativa al sur del ecuador. En cuanto a la celda de circulación de Walker, se observan en este caso anomalías negativas que representan un fortalecimiento de los ramos convectivos entre 40°E y 60°E y entre 80°W y 70°W, que coincide con la localización de Suramérica. De igual forma, sobre el

centro del Pacífico se observa una intensificación de la subsidencia de aire, lo que genera un comportamiento de la celda de Walker muy similar al que ocurre cuando se encuentra una fase fría del ENSO activa (Bayr et al., 2014; Wang, 2004).

En el caso de las anomalías negativas de precipitación, se observa que la función másica de corriente meridional presenta principalmente anomalías positivas en ambos hemisferios, lo que podría implicar un desplazamiento de la celda hacia el sur, dado que dichas anomalías significan que la circulación del hemisferio norte se estaría intensificando mientras que la del sur se estaría debilitando. Con respecto a la celda de Walker, no es posible a partir de la Figura afirmar que se presente un reversamiento de la celda, como normalmente ocurre durante los eventos El Niño (Bayr et al., 2014; Wang, 2004). Sin embargo, se observan anomalías positivas intensas de la convección entre 110°E y 120°E que corresponden al continente marítimo y sobre Suramérica, que podría incluso implicar subsidencia sobre estas regiones, así como también se presentan anomalías negativas en la rama subsidente entre 180° y 120°W , las cuales no son tan intensas.

Dado que se observa que las anomalías de precipitación del país están principalmente relacionadas con las dinámicas inducidas por la variabilidad de la temperatura superficial del mar sobre el Pacífico Tropical y Atlántico Tropical Norte, se analiza a continuación la conexión entre estos océanos y la circulación atmosférica a partir de la caracterización del movimiento vertical del aire en los niveles medios (500 hPa) y el potencial de velocidad en la alta tropósfera (200 hPa) durante condiciones anómalas de índices medidos en estas regiones, con el objetivo de comparar dichos patrones con los obtenidos a partir de las anomalías de precipitación y de igual forma cuantificar los potenciales cambios que podrían sufrir variables que se encuentran altamente relacionadas con la precipitación del país.

En las Figuras **3-21** y **3-22** se presentan los cambios en las probabilidades de existencia de los percentiles 25, 50 y 75 de las variables de omega a 500 hPa y potencial de velocidad a 200 hPa, que ocurren durante anomalías significativas (más de una desviación estándar por encima o por debajo de la media) del índice Niño 3.4.

En la Figura **3-21** se logra identificar un comportamiento similar al encontrado para la variable en la Figura **3-19** durante ambos casos de anomalías de precipitación en Colombia. Se identifica el comportamiento opuesto sobre el Pacífico central-este, que se caracteriza por un aumento de los movimientos ascendentes durante anomalías positivas del índice y un aumento de los descendientes durante el caso de condiciones frías en esta zona del océano. Este comportamiento, va acompañado de las modificaciones en las demás ramas de la celda de Walker, las cuáles se observan muy claramente sobre el norte de Australia y el continente marítimo y con menos intensidad sobre el norte de Suramérica y la costa del Atlántico.

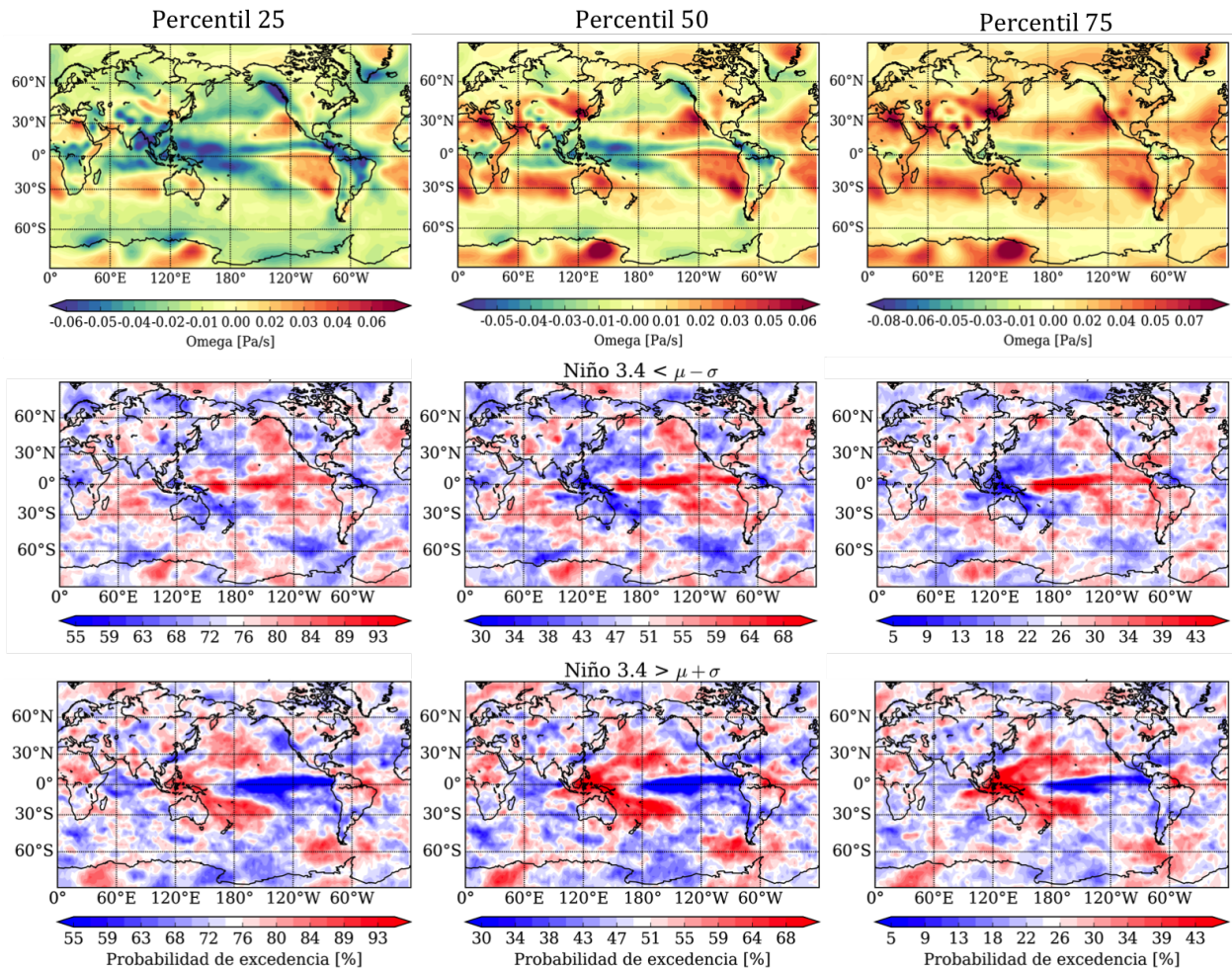


Figura 3-21: Cambios en la probabilidad de excedencia de omega a 500 hPa durante anomalías positivas y negativas del índice Niño 3.4

Sobre el norte de Suramérica se observan mayores modificaciones de la probabilidad de excedencia de omega en el caso de condiciones frías del índice que en el caso de anomalías positivas del mismo. Dicho comportamiento va de acuerdo con los patrones más definidos de la fase fría del ENSO que se obtenían durante anomalías positivas de precipitación que los que se identificaban en los casos de anomalías negativas de precipitación e implicaría una teleconexión más fuerte de esta región con La Niña que con El Niño, lo cual es aparentemente opuesto a las conexiones que normalmente se han identificado de este fenómeno con otras partes del mundo. De igual forma, se observa una mayor alteración de las probabilidades de excedencia sobre norte de Suramérica para percentiles medios y altos de omega, mientras que en el percentil 25 las modificaciones de las probabilidades son considerablemente menores para ambos casos de anomalías del índice.

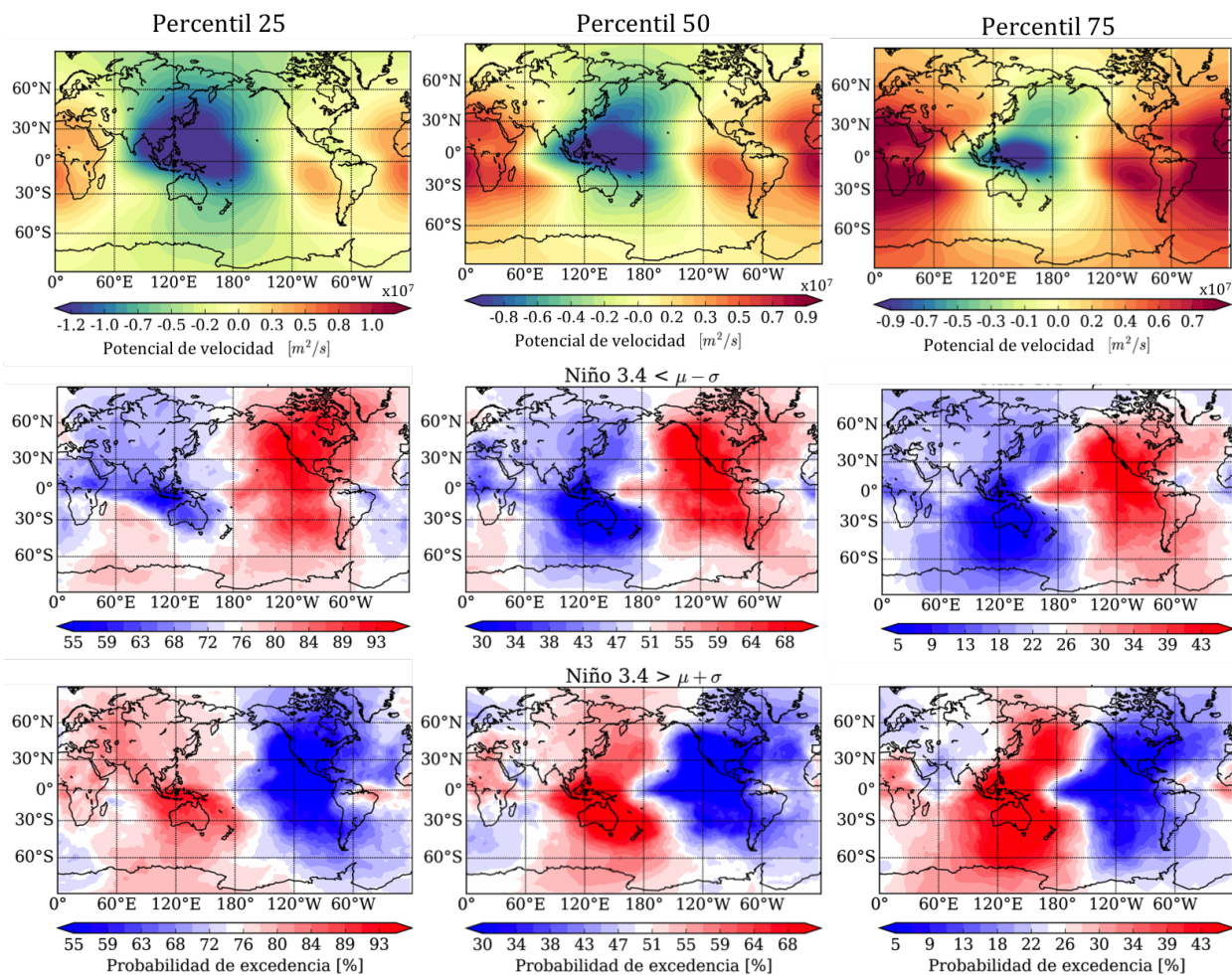


Figura 3-22: Cambios en la probabilidad de excedencia del potencial de velocidad a 200 hPa durante anomalías positivas y negativas del índice Niño 3.4

En la Figura 3-22 se observa que el potencial de velocidad presenta un comportamiento medio caracterizado por un patrón de longitud de onda de número uno, dominado por la circulación de Walker en el sentido este-oeste. En el caso de anomalías negativas del índice, se observa que la subsidencia normalmente observada sobre el Pacífico central-este se intensifica, mientras que sobre el continente marítimo el centro de convección observado aumenta su magnitud. Sobre norte de Suramérica y parte de su costa en el Atlántico se observa un pequeño centro donde las probabilidades de excedencia tienden igualmente a disminuir, implicando un aumento de la convección en esta zona, a pesar de que sobre Colombia este comportamiento no está totalmente definido, tal como ocurría con omega a 500 hPa. En el caso de anomalías positivas del índice Niño 3.4, el comportamiento es totalmente opuesto al descrito para el caso de anomalías negativas.

El hecho de que los patrones de circulación sobre Colombia no sean totalmente definidos en

los casos de anomalías positivas y negativas del índice Niño 3.4 puede responder a que dentro de los eventos analizados, algunos de estos pudieron haber afectado significativamente la precipitación del país, mientras que otros probablemente no generaron un impacto tan fuerte sobre esta región.

De manera análoga, las Figuras 3-23 y 3-24 presentan los cambios de omega a 500 hPa y el potencial de velocidad a 200 hPa durante anomalías positivas y negativas del índice TNA. Se observa en el caso de omega (Figura 3-23) un patrón tipo dipolo de las probabilidades de excedencia sobre el Atlántico Tropical Norte y el Sur, el cual se caracteriza por mayores movimientos descendentes en el norte del ecuador, zona donde se mide el índice, durante anomalías negativas del índice y mayores movimientos ascendentes en anomalías positivas, los cuales van acompañados de un comportamiento inverso al sur del ecuador. Sobre el norte de Suramérica y parte de su costa en el Pacífico, se observan diferencias de las probabilidades de excedencia que tienen el mismo signo que la zona de medición del índice, implicando mayor ascenso de aire en condiciones positivas del índice y mayor subsidencia en condiciones negativas, lo cual va de acuerdo con la relación directa encontrada entre este índice y la precipitación en Colombia.

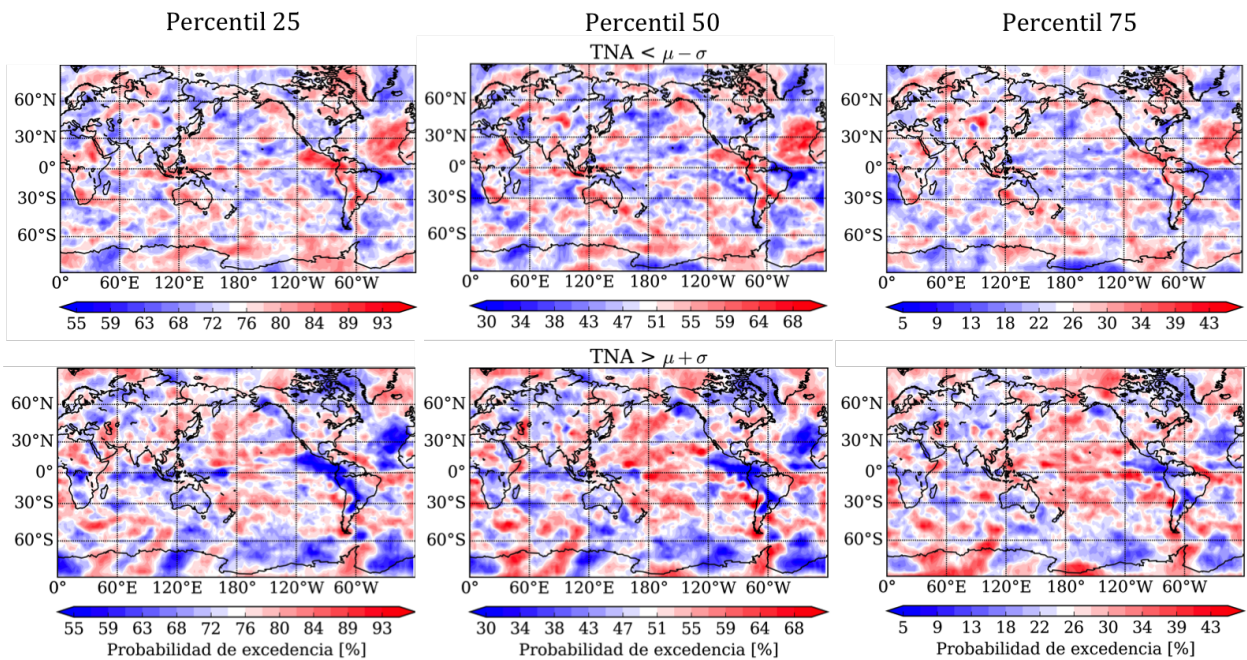


Figura 3-23: Cambios en la probabilidad de excedencia de omega a 500 hPa durante anomalías positivas y negativas del índice TNA

En cuanto al potencial de velocidad a 200 hPa, la Figura 3-24 muestra modificaciones tanto en la dirección zonal como en la meridional, implicando alteraciones tanto en la circulación

de la Celda de Walker como en la de Hadley. Las modificaciones en la dirección meridional son más evidentes en el caso de anomalías negativas del TNA, en el cual se observa bastante coherencia con el comportamiento observado a partir de omega, caracterizado por un aumento en la subsidencia de masas de aire en el norte del ecuador, que se extiende hasta el norte de Suramérica, mientras que hacia el sur las condiciones tienden a favorecer la convección. En el caso de anomalías positivas del índice, las mayores modificaciones se observan en la dirección meridional y los patrones presentan algunas similitudes con lo observado en condiciones de anomalías positivas del índice Niño 3.4, a diferencia que en este caso sobre el norte de Suramérica no se alcanza a identificar el pequeño centro de aumento de probabilidades que se tenía en el caso del índice Niño 3.4. La similitud entre los patrones encontrados en los casos de anomalías positivas de los índices Niño 3.4 da una idea de la relación que posiblemente existe entre la variabilidad de ambos océanos y podría explicar la coincidencia entre anomalías negativas de precipitación en el país y temperaturas por encima de lo normal observadas en la Figura 3-19, que puede responder a la ocurrencia simultánea de ambos fenómenos.

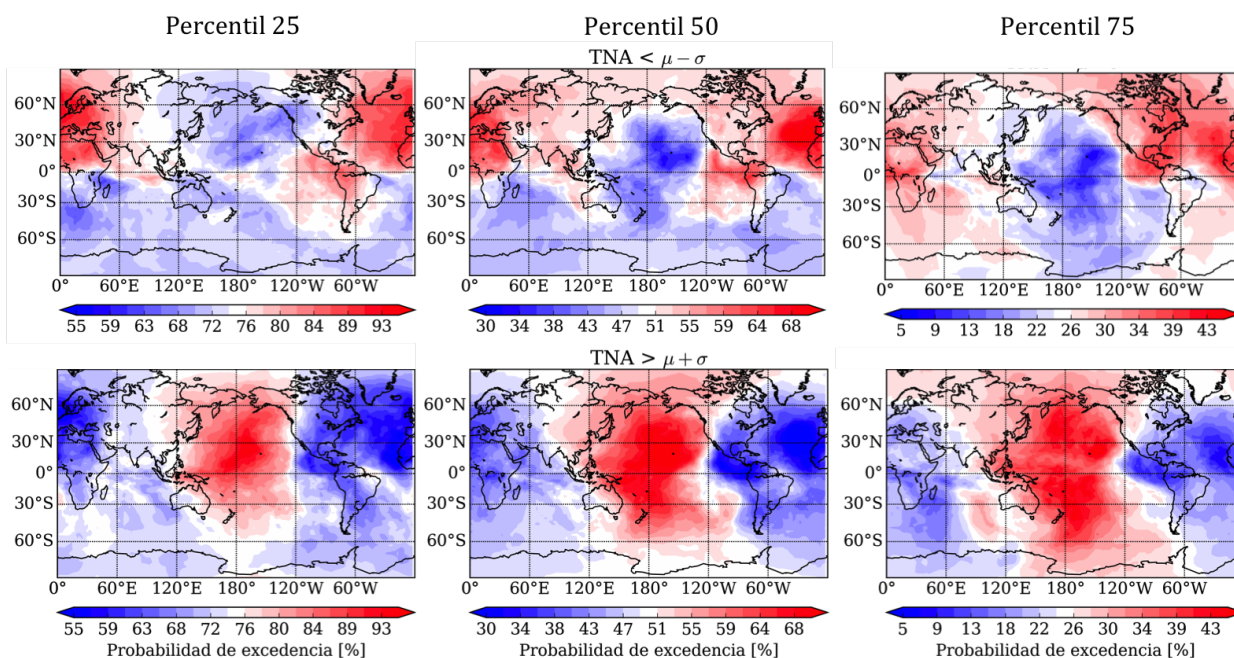


Figura 3-24: Cambios en la probabilidad de excedencia del potencial de velocidad a 200 hPa durante anomalías positivas y negativas del índice TNA

3.5. Relación con patrones de circulación regional

Además de las teleconexiones con fenómenos macroclimáticos y los patrones de circulación a nivel global, existen patrones característicos de la circulación a escala regional que pueden

de igual forma estar relacionados con las anomalías de precipitación en Colombia, como lo son los chorros del Caribe (CLLJ) (Wang, 2007) y del Chocó (Poveda et al., 2006; Poveda and Mesa, 1999, 2000).

De acuerdo con (Wang, 2007) y (Poveda et al., 2006), los Chorros del Caribe y el Chocó se encuentran asociados a una intensificación del viento zonal alrededor de los 925 hPa sobre el Mar Caribe y la Costa Pacífica Colombia respectivamente. Las Figuras 3-25 y 3-26 presentan los compuestos de anomalías en los vientos zonales a 925 hPa en los casos de anomalías positivas y negativas de precipitación en cada una de las regiones.

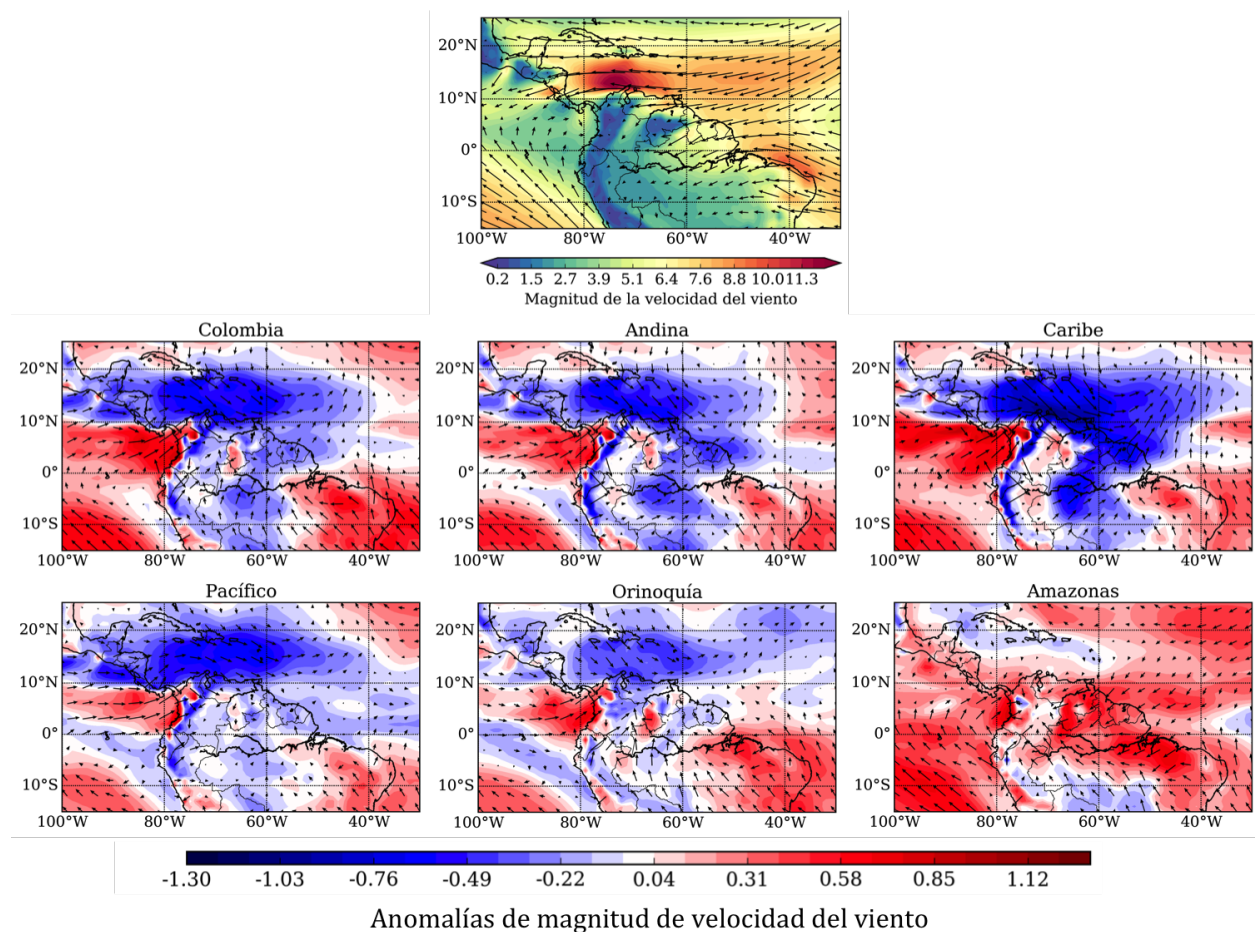


Figura 3-25: Anomalías en la magnitud (contornos) y dirección (flechas) del viento a 925 hPa sobre Suramérica en los casos de anomalías positivas de precipitación en cada una de las regiones del país.

La Figura 3-25 muestra que las anomalías positivas de precipitación sobre la región Caribe principalmente y las regiones Andina, Pacífico, Orinoquía y Colombia, coinciden con anomalías negativas de la velocidad del viento a 925 hPa sobre el Mar Caribe, asociadas a un

debilitamiento del CLLJ. En cuanto al Pacífico, se observa que las anomalías positivas de precipitación en todas las regiones del país coinciden con una intensificación de la magnitud y la recurvatura de los vientos Alisios que entran por la costa pacífica colombiana. Para la región Amazonas, se observa de igual forma una relación con los vientos provenientes de las cuencas del Orinoco y del Amazonas, los cuales presentan magnitudes por encima de lo normal en el caso de anomalías positivas de precipitación en esta región.

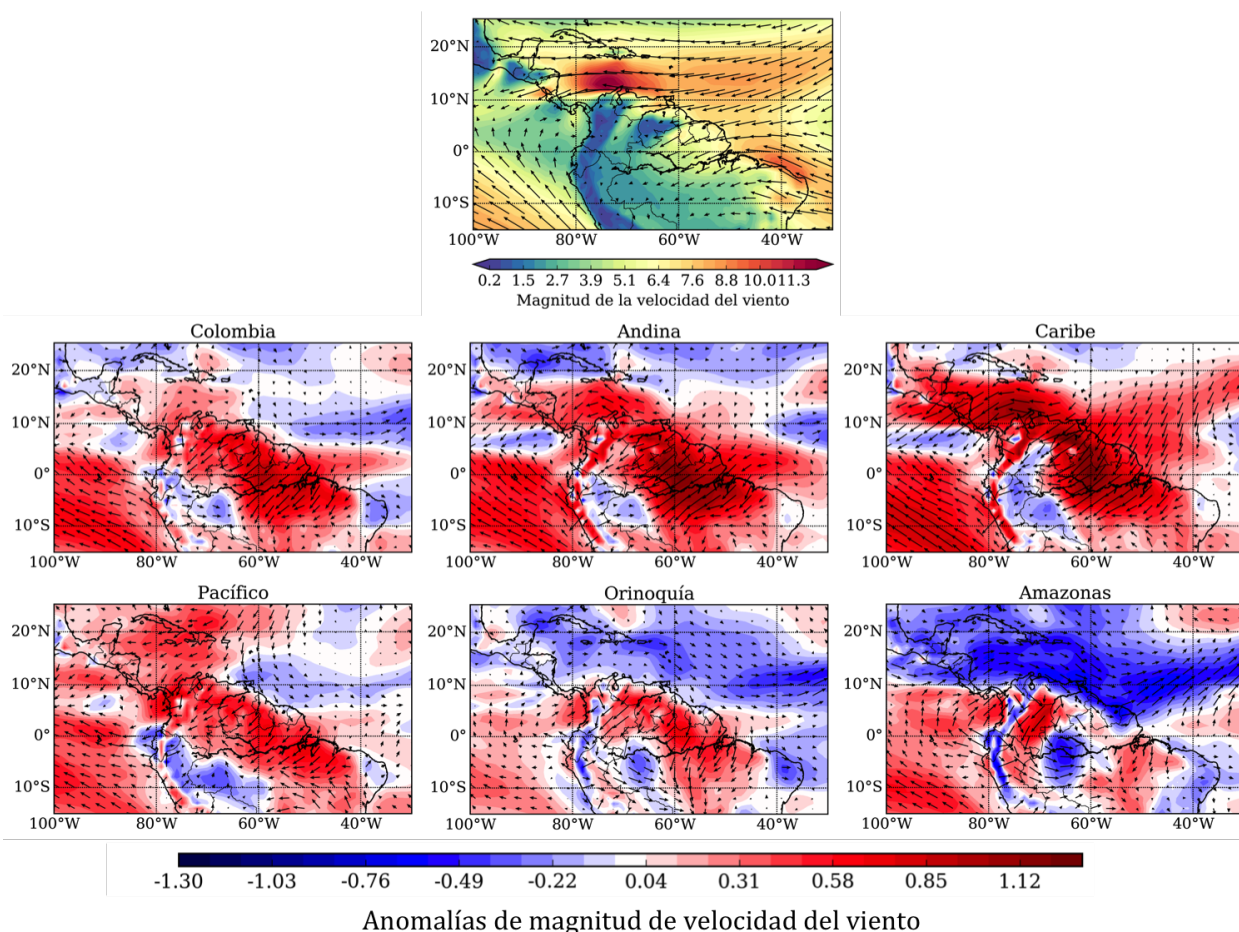


Figura 3-26: Anomalías en la magnitud (contornos) y dirección (flechas) del viento a 925 hPa sobre Suramérica en los casos de anomalías negativas de precipitación en cada una de las regiones del país.

En la Figura 3-26 se observa que en el caso de anomalías negativas de precipitación, las regiones Caribe y Andina y se encuentran principalmente asociadas con una intensificación de los vientos del CLLJ y los vientos que ingresan provenientes del Atlántico Tropical Norte hacia el noreste del continente. La región Amazonas presenta por el contrario un comportamiento casi opuesto, en el cual se observa un debilitamiento de los vientos en el Mar Caribe y el norte del Atlántico Tropical.

La relación opuesta descrita entre la precipitación del centro-norte de Colombia y el CLLJ es similar a la que se ha encontrado entre este Chorro y el clima en Centroamérica, donde se ha asociado la disminución de las precipitaciones que ocurren durante el trimestre de junio a agosto, conocidas como el "Mid-Summer Drought" (MSD) o la "Çanícula", con la intensificación del CLLJ que ocurre en estos meses (Wang, 2007; Cook and Vizzy, 2010). Los posibles mecanismos físicos que explican dicha relación han sido descritos por Wang (2007) y explican como la intensificación del CLLJ puede aumentar la divergencia de los flujos de humedad en el Caribe, suprimiendo la convección y por ende la precipitación.

En cuanto al Chorro del Chocó, la relación directa encontrada puede responder al transporte de humedad proveniente del océano Pacífico mediante la intensificación de esta corriente y a su interacción con la cordillera de los andes y los vientos alisios del este para el favorecimiento del ascenso orográfico y la convección. De igual forma, el Chorro del Chocó ha sido asociado a la formación de Sistemas Convectivos de Mesoescala, los cuales explican un gran porcentaje de la lluvia sobre el oeste del país (Poveda and Mesa, 1999, 2000; Poveda, 2004; Poveda et al., 2006). Por otro lado, el Chorro del Chocó se encuentra altamente asociado al fenómeno ENSO, presentando una mayor intensidad durante eventos de La Niña y menor intensidad durante El Niño (Poveda, 2004; Poveda et al., 2006), lo cual también puede influir en los resultados encontrados y su relación con la lluvia en el país.

Es importante tener en cuenta que las corrientes en chorro analizadas tienen una estacionalidad muy marcada, por lo que su relación con la precipitación del país puede llegar a ser muy variable durante el año y puede tener una influencia en los resultados obtenidos que no se encuentran discriminados por temporadas. De igual forma, se debe tener en cuenta que cada una de estas corrientes no actúa, sino que es la interacción de los Chorros del Caribe y el Chocó y los vientos alisios que provienen del Atlántico hacia los Andes lo que puede generar condiciones más o menos favorables para el ascenso orográfico y la convección sobre las diferentes zonas del país, afectando de esta forma los acumulados de precipitación observados (Poveda and Mesa, 2000; Arias et al., 2015).

Por otro lado, la intensidad de los chorros analizados está directamente relacionada con las temperaturas del mar en los océanos Pacífico y Atlántico, por lo que la relación encontrada de estas variables con la precipitación también se ve afectada con las alteraciones del macroclima descritas en la sección anterior.

3.6. Discusión de predictibilidad

Los resultados muestran que las anomalías de precipitación en las regiones Andina, Caribe y Pacífico presentan una variabilidad interanual significativa, la cual ocurre en una banda de frecuencias que coincide con la semi-periodicidad del ENSO. De igual forma, los análisis muestran que el ENSO presenta una fuerte relación con la precipitación de estas regiones, en rezagos que van desde los 0 hasta los 3 meses. Esta relación implica una fuente de predictibilidad de la precipitación a partir de los índices y variables relacionadas con la ocurrencia del ENSO, las cuáles al ser constantemente monitoreadas y actualizadas durante los primeros días de cada mes, representan una oportunidad para la implementación de modelos operacionales.

La precipitación en las regiones Andina y Caribe principalmente y en menor proporción en la región Amazonas, presenta una relación significativa con las anomalías de temperatura superficial del mar en el Atlántico Tropical Norte, la cual presenta su máxima intensidad en rezagos entre 4 y 6 meses, lo cual podría contribuir a una extensión de la predictibilidad de la precipitación en estas regiones hasta horizontes de pronóstico mayores.

La región Orinoquía no refleja una relación significativa con prácticamente ninguno de los patrones macroclimáticos analizados, lo cual limitaría la capacidad predictiva que se tendría para esta región, al pensar que las anomalías de precipitación en dicha zona pueden estar más relacionadas con procesos a nivel local o regional que son altamente variables y poco predecibles. Sin embargo, se encuentra a través del análisis de Fourier, que esta región presenta un ciclo anual muy dominante y una variabilidad de las anomalías mucho menor al de las demás regiones, lo cual implica que incluso pronósticos sencillos como la climatología podrían ser útiles en esta región para efectos prácticos y de toma de decisiones.

La región Amazonas presenta un comportamiento relativamente diferente al encontrado con las demás regiones del país, lo cual en parte responde a su ubicación en la gran cuenca Amazónica, la cual tiene una dinámica propia altamente dominada por complejos procesos de retroalimentación suelo-vegetación-atmósfera. En cuanto a identificación de posibles predictores, se tiene una muy baja relación de esta región con el Océano Pacífico, pero se observa una asociación significativa de las anomalías de precipitación con las temperaturas del mar del Atlántico Tropical en rezagos temporales alrededor de 3 meses. De igual forma, se podrían considerar variables más regionales como la advección de humedad proveniente de la selva amazónica como un posible predictor.

Dada la alta variabilidad climática que se presenta entre las diferentes regiones delimitadas del país, no resultaría conveniente realizar pronósticos para todo el país en conjunto, dado que al trabajar con la serie integrada sobre todo el territorio colombiano, se pueden perder

u ocultar algunas de las características importantes de cada región que contribuyen a su predictibilidad. Sin embargo, su análisis se considera importante como base de comparación para la predictibilidad por separado de cada una de las regiones.

Es importante resaltar que los fenómenos macroclimáticos y procesos de circulación regional analizados no actúan de manera independiente sobre la precipitación en Colombia, sino que se encuentran altamente asociados entre sí, por lo cual no es posible a partir de los análisis realizados distinguir el porcentaje individual de variabilidad que cada uno de estos explica de la precipitación en las regiones. Sin embargo, la inclusión conjunta de las diferentes variables asociadas a los fenómenos de macro-escala o escala regional identificados en modelos multivariados de pronóstico puede contribuir significativamente al aumento de la predictibilidad de la precipitación en las regiones que se encuentran afectadas por estos procesos.