

# 5 Pronóstico estacional de la precipitación en Colombia

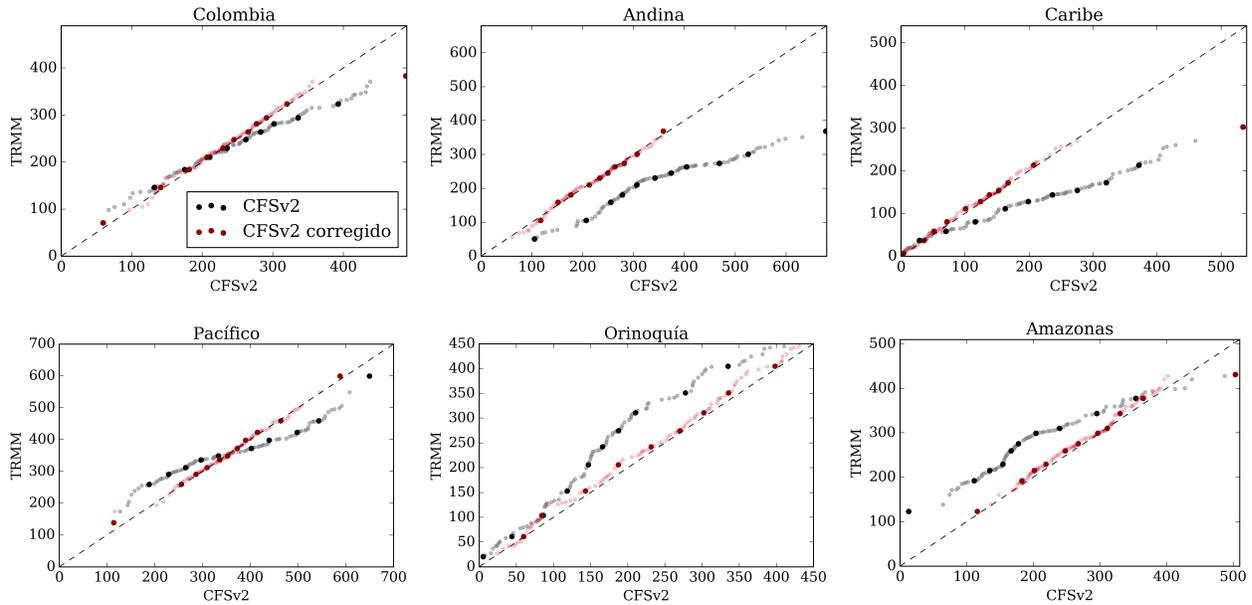
En el capítulo anterior se identificaron las principales debilidades del modelo CFSv2 en la representación de la precipitación sobre Colombia y cada una de sus regiones climáticas.

En este capítulo se desarrollan y evalúan diferentes metodologías que permitan mejorar los resultados del modelo CFSv2 y obtener pronósticos que representen con mayor precisión el comportamiento observado de la precipitación en el dominio estudiado. En la primera sección se aplican diferentes tipos de post-procesamiento estadístico de las salidas del modelo, mientras que en la segunda sección se discuten diferentes tipos de combinaciones de modelos estadísticos con los resultados del modelo dinámico para la construcción de modelos híbridos dinámico-estadísticos.

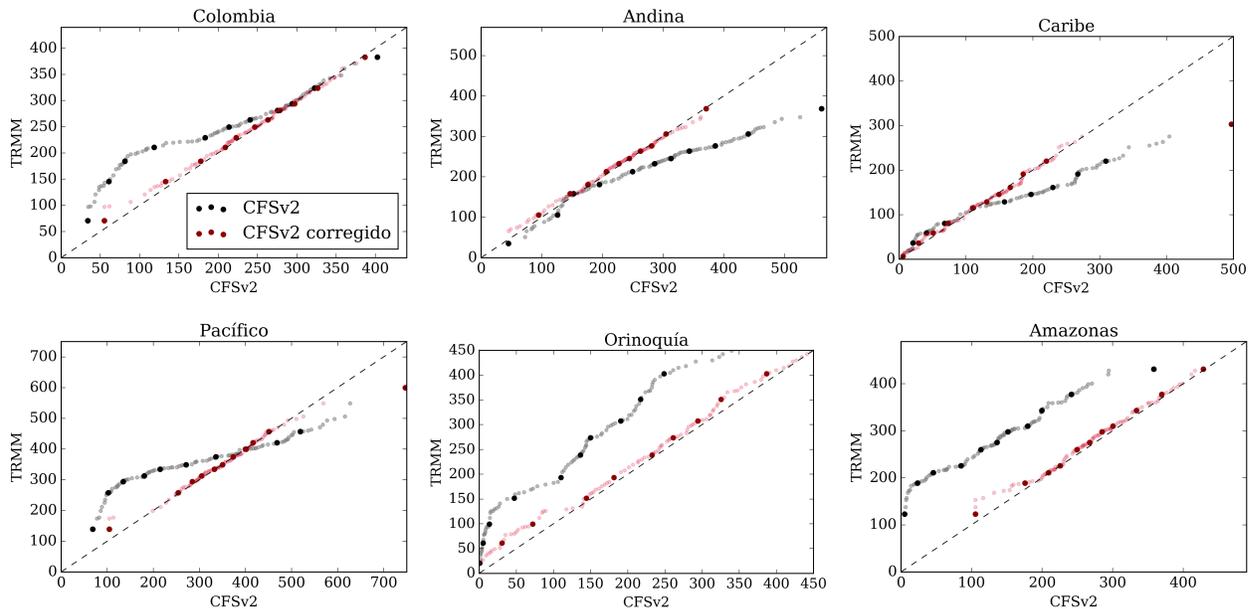
## 5.1. Post-procesamiento estadístico de la precipitación pronosticada por el modelo CFSv2

### 5.1.1. Ajuste de distribución estadística de la precipitación

El ajuste cuantil a cuantil permite corregir los sesgos identificados en el capítulo anterior de los pronósticos del modelo CFSv2. En las Figuras 5-1 y 5-2 se presenta la gráfica cuantil a cuantil de los pronósticos de horizonte 0 y 9 de precipitación con respecto a los datos del satélite TRMM. Se observa que en el horizonte 0, los pronósticos de precipitación sobre Colombia tienden a subestimar levemente los percentiles más bajos y a presentar una sobrestimación más marcada de los percentiles altos, mientras que los valores medios presentan magnitudes similares a las observadas con el TRMM. Sobre las regiones Andina y Caribe, se observa una sobrestimación significativa de casi toda la distribución, caso contrario al que se presenta en las regiones Amazonas y Orinoquía, en las cuales el modelo pronostica valores menores a los observados; en cuanto a la región Pacífico, se observa subestimación de los percentiles bajos y sobrestimación de los altos, siendo muy similares las magnitudes de los sesgos negativos y positivos con respecto al TRMM.



**Figura 5-1:** Ajuste cuantil a cuantil de los pronósticos de precipitación a horizonte de 0 meses del modelo CFSv2 con respecto a los datos del satélite TRMM.



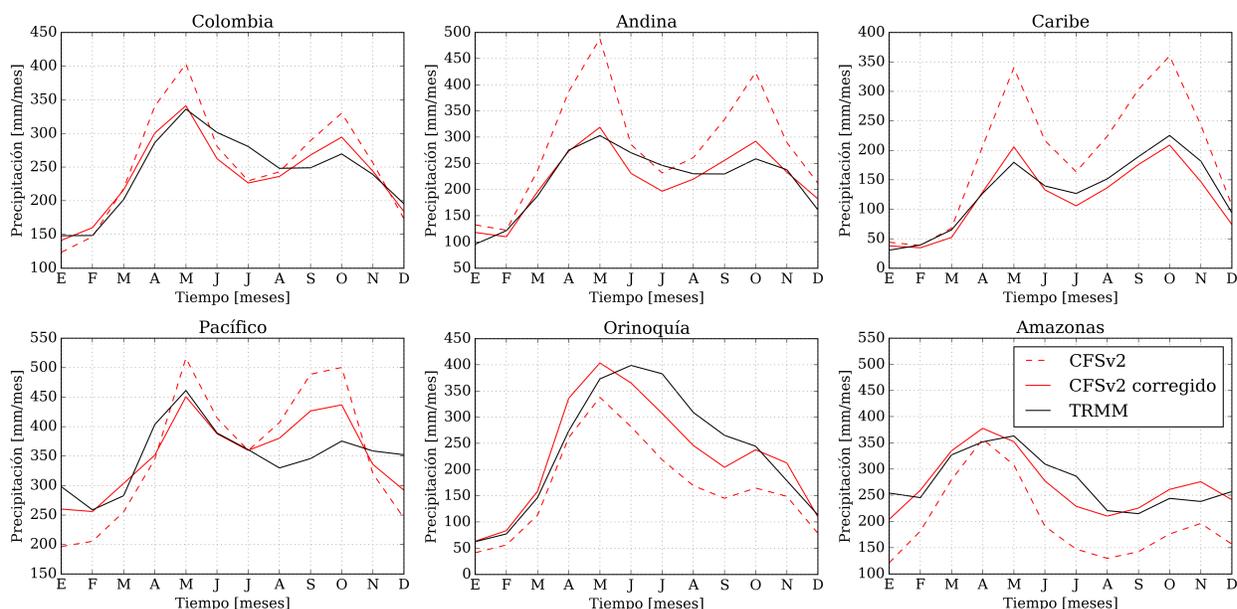
**Figura 5-2:** Ajuste cuantil a cuantil de los pronósticos de precipitación a horizonte de 9 meses del modelo CFSv2 con respecto a los datos del satélite TRMM.

En la Figura 5-2, se observa que en el horizonte 9, los pronósticos de precipitación sobre Colombia, que presentaban un buen ajuste en los percentiles bajos y medios en el horizonte 0, para este caso se ven subestimados significativamente, mientras que los percentiles altos que son sobrestimados en el horizonte 0, en este horizonte presentan magnitudes más ajustadas

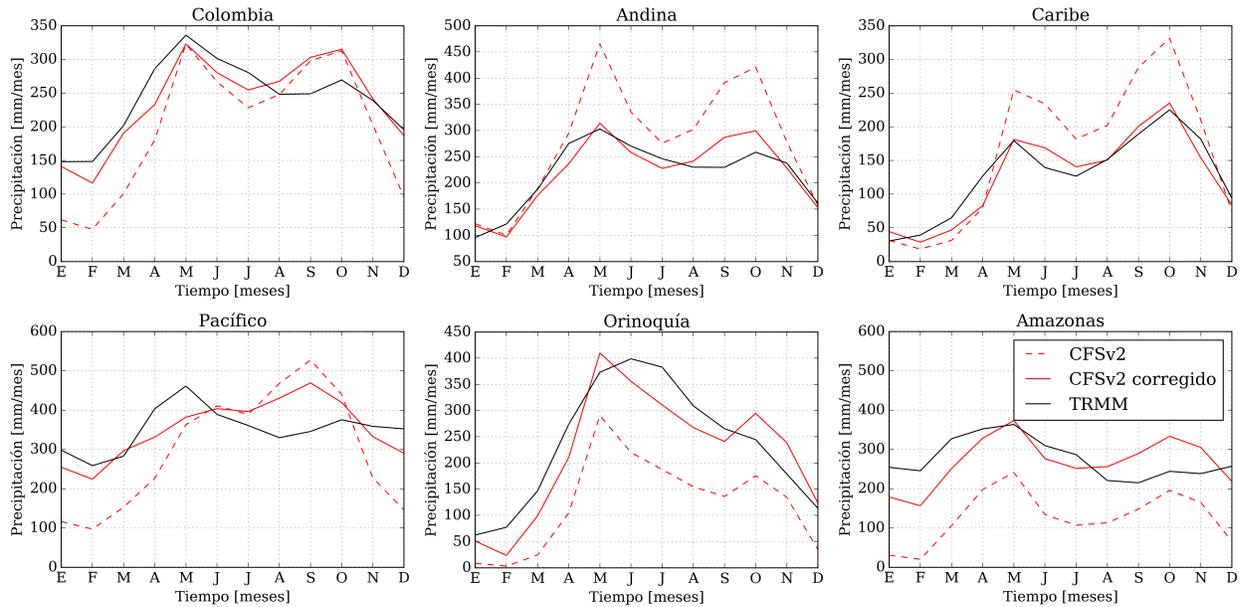
## 5.1 Post-procesamiento estadístico de la precipitación pronosticada por el modelo CFSv2

a los datos satelitales. En los pronósticos para cada una de las regiones se observa el mismo comportamiento descrito para el horizonte 0, siendo en este caso menores las sobrestimaciones sobre la región Andina y Caribe, las cuales en este horizonte presentan un buen ajuste en los percentiles bajos. Caso contrario ocurre en las regiones Pacífico, Orinoquía y Amazonas, en las cuales se intensifican las subestimaciones observadas en el horizonte 0. En general, se puede afirmar que las magnitudes de la precipitación en el horizonte de pronóstico 9 son menores a las de horizonte 0, lo que genera que en las regiones con sobrestimación se reduzca el sesgo positivo existente y en las regiones con subestimación se aumente la magnitud de los sesgos negativos.

El ciclo anual de la precipitación en cada una de las regiones luego de aplicar la corrección se presenta en las Figuras 5-3 y 5-4 para los horizontes de pronóstico 0 y 9. En estas gráficas es posible observar que esta metodología ajusta principalmente las magnitudes, más no afecta considerablemente la variabilidad temporal, por lo que en las regiones que se observaba un leve rezago en el ciclo anual en comparación con los datos del TRMM, este sigue presente luego de realizar la corrección.



**Figura 5-3:** Ciclo anual de los pronósticos de precipitación a horizonte de 0 meses del modelo CFSv2 antes y después del ajuste cuantil a cuantil con respecto a los datos del satélite TRMM.



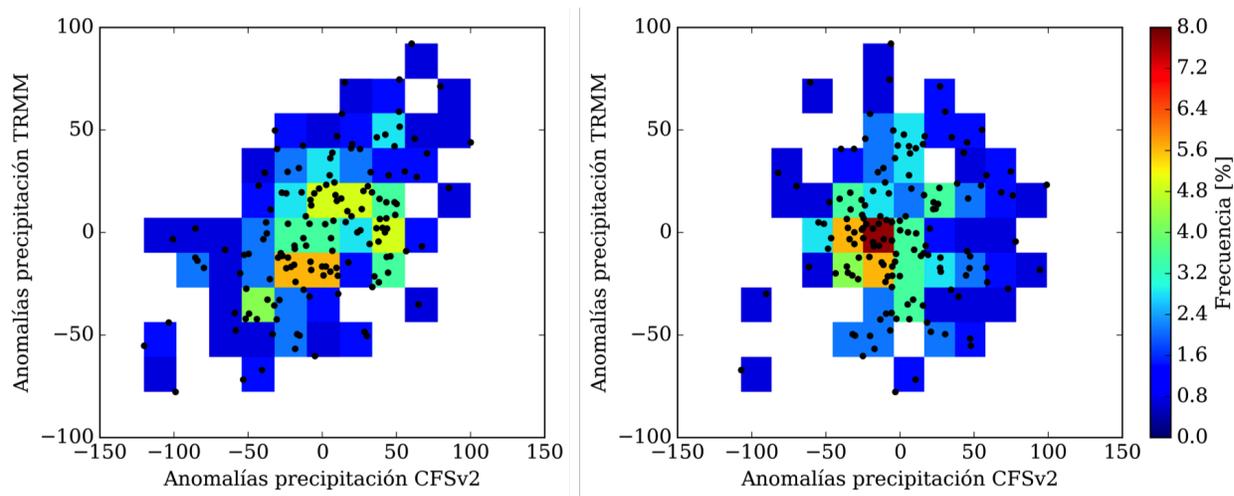
**Figura 5-4:** Ciclo anual de los pronósticos de precipitación a horizonte de 9 meses del modelo CFSv2 antes y después del ajuste cuantil a cuantil con respecto a los datos del satélite TRMM.

### 5.1.2. Ajuste no paramétrico de anomalías de precipitación

En esta sección se realiza el ajuste de las anomalías de precipitación pronosticadas por el modelo a través del histograma conjunto con las anomalías observadas por el satélite TRMM. El ajuste únicamente de las anomalías pronosticadas, permite corregir las desviaciones respecto al valor medio de cada mes, para luego sumarlo a la climatología calculada a partir de las observaciones.

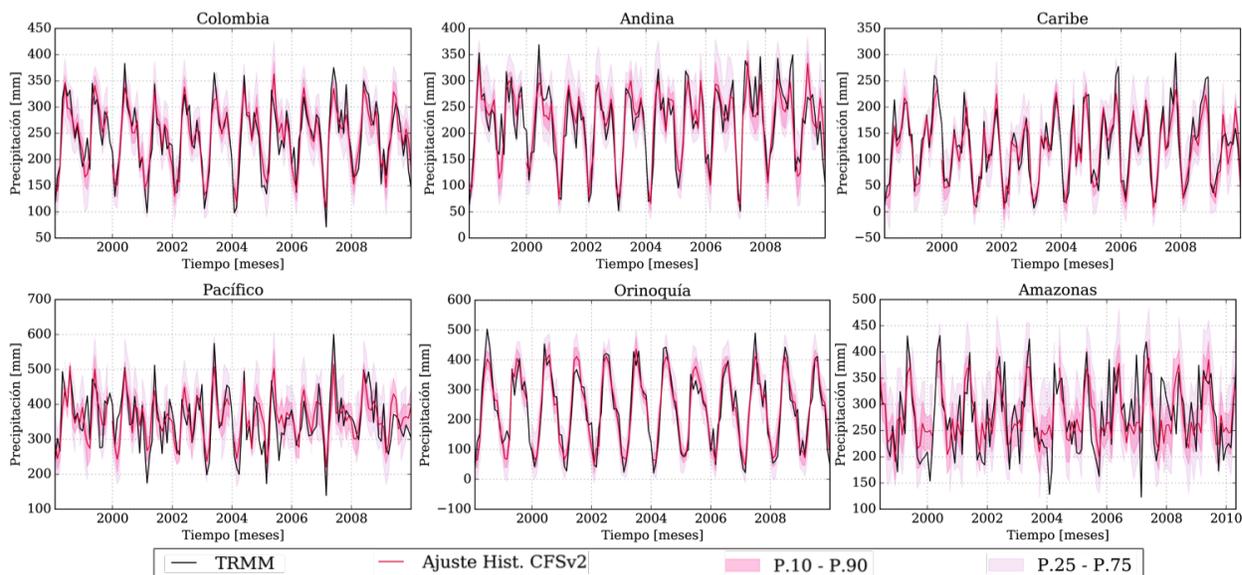
En la Figura 5-5 se presentan los histogramas conjuntos de las anomalías de precipitación de los pronósticos de horizonte 0 y 9 del CFSv2 con las anomalías de precipitación del TRMM sobre Colombia, donde se puede apreciar que si bien para el horizonte de pronóstico de 0 meses hay una relación más lineal con las observaciones, para el horizonte de 9 meses se obtiene una mayor dispersión de las parejas de datos, que no permitiría ajustar ninguna función al conjunto.

## 5.1 Post-procesamiento estadístico de la precipitación pronosticada por el modelo CFSv2



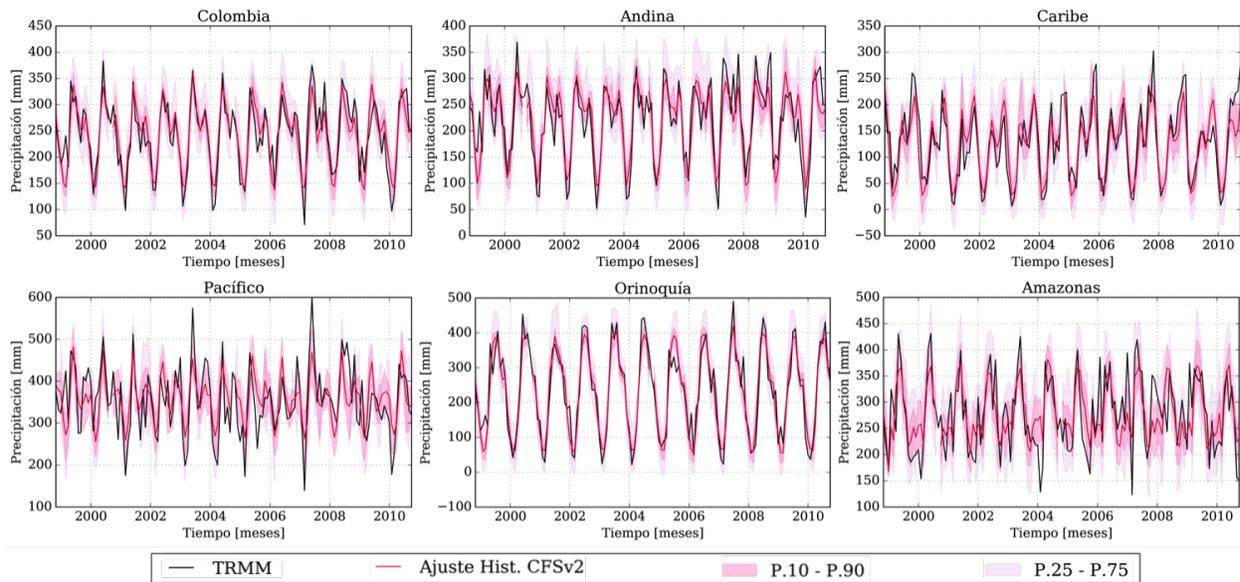
**Figura 5-5:** Histogramas conjuntos de las anomalías de precipitación de los pronósticos de horizonte 0 y 9 del CFSv2 con las anomalías de precipitación del TRMM sobre Colombia

Luego de realizar el procedimiento de ajuste de las anomalías de precipitación de los pronósticos en todos los horizontes a través de los histogramas conjuntos con las observaciones, se pueden obtener generar diferentes series de precipitación, en este caso, se han realizado 100 iteraciones. En las Figuras 5-6 y 5-7 se presentan los resultados de las series promedio de las iteraciones para los horizontes de pronóstico 0 y 9. Las bandas representan los percentiles 25 y 75 la banda más oscura y el 10 y 90 la más clara.



**Figura 5-6:** Series de pronósticos de precipitación de horizonte 0 del CFSv2 ajustadas a partir del histograma conjunto con la precipitación del TRMM

En la Figura 5-6 se observa que los pronósticos de horizonte 0 corregidos logran capturar algo de la variabilidad interanual, principalmente en las regiones Andina y Caribe, mientras que en las regiones Pacífico y Amazonas se observan las mayores diferencias entre la serie observada y la pronosticada. Por otro lado, la región Orinoquía refleja además de su marcado ciclo unimodal, muy poca variabilidad año a año, por lo que el modelo parece coincidir con buena precisión con los valores observados y las bandas de percentiles son más estrechas. La serie para todo Colombia presenta un comportamiento más similar al de las series Andina y Caribe.



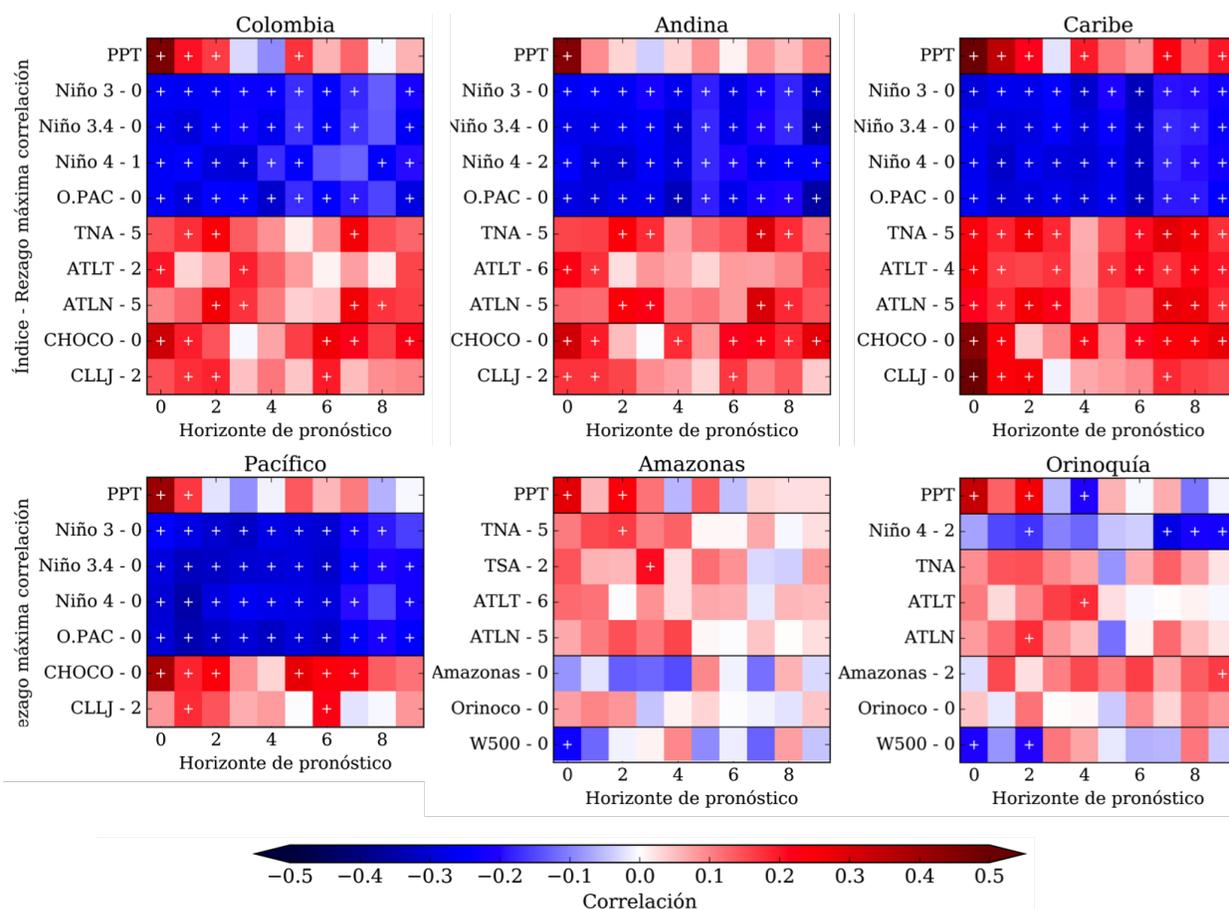
**Figura 5-7:** Series de pronósticos de precipitación de horizonte 9 del CFSv2 ajustadas a partir del histograma conjunto con la precipitación del TRMM

De la Figura 5-7 es posible identificar una expansión de las bandas de percentiles, que se debe a que a horizontes mayores de pronóstico las iteraciones tienen una mayor dispersión, lo que implica un aumento de la incertidumbre con el horizonte. De igual forma, se observa que existe una mayor dificultad de estos pronósticos para capturar los extremos de precipitación, incluso en la banda representada por los percentiles 10 y 90. En general, se conserva el comportamiento identificado en el horizonte 0 en cuanto a que las series Pacífico y Amazonas presentan las mayores diferencias con las observaciones y la región Orinoquía sigue presentando unas bandas muy ajustadas a su ciclo anual.

## 5.2. Modelos híbridos de pronóstico

En el Capítulo 3 se identificaron para cada una de las regiones del país los índices o variables con las que presentan una mayor relación y por tanto pueden ser usados como predictores de la precipitación en las regiones de interés, los cuales de acuerdo con los resultados encontrados en el Capítulo 4, son en general mejor representados por el modelo CFSv2 y tienen una capacidad predictiva que no decae tan rápidamente como la precipitación.

La Figura 5-8 presenta las correlaciones entre los pronósticos del CFSv2 de precipitación y varios índices macroclimáticos y variables de circulación, con la precipitación del TRMM en los diferentes horizontes de pronóstico para cada una de las regiones. Se presenta para cada variable el rezago temporal en el cual se observan las máximas correlaciones con la precipitación y únicamente se presentan los para cada región los índices que se consideran que podrían resultar de utilidad de acuerdo al valor de las correlaciones alcanzadas.



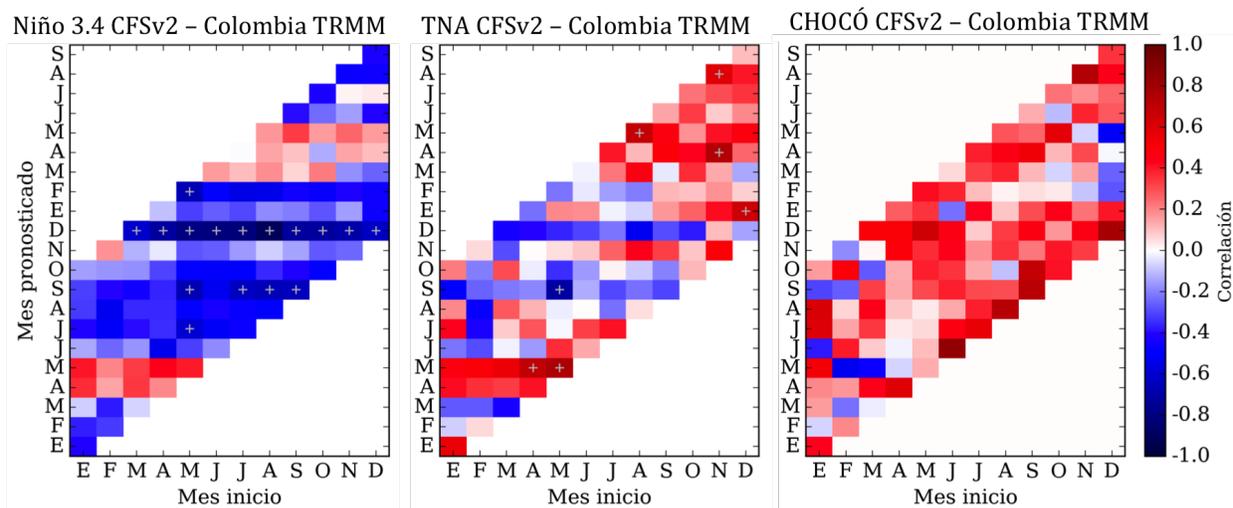
**Figura 5-8:** Correlación entre la precipitación estandarizada del TRMM y las series pronosticadas por el CFSv2 de precipitación de cada región y de los índices en los diferentes horizontes de pronóstico

En la Figura 5-8 se observa que para las regiones Caribe, Andina y Colombia, los pronósticos del CFSv2 de temperatura superficial del mar en el Pacífico y el Atlántico Tropical y de los chorros del Caribe y el Chocó presentan altas correlaciones con la precipitación observada del TRMM, las cuales principalmente con los índices del Pacífico central-este superan las alcanzadas por los pronósticos de precipitación del CFSv2, especialmente después del horizonte de pronóstico 0. Un comportamiento similar se observa con la región Pacífico, a pesar de que para esta región no se alcanzan correlaciones significativas con el Atlántico sino únicamente con el Océano Pacífico.

Por otro lado, para las regiones Orinoquía y Amazonas, se tiene una gran dificultad para encontrar predictores de utilidad, puesto que se observa que las correlaciones alcanzadas con los pronósticos de los índices presentados (y con todos los demás índices analizados) son muy bajas y solo para unos cuantos horizontes de pronóstico del índice logran ser estadísticamente significativas. De igual forma, se observa que sobre la región Amazonas, las correlaciones alcanzadas con los pronósticos de los índices del Atlántico tienen un signo opuesto al que se había encontrado en el análisis presentado en el Capítulo 3, lo cual limita la utilidad de estos predictores para esta región. De acuerdo con los resultados para estas dos regiones, no se espera que la inclusión de dichos índices permitan lograr una mejora en los pronóstico, sin embargo, combinaciones de estos se incluirán en los modelos híbridos para verificar si realmente pueden aportar información a los pronósticos de precipitación del CFSv2.

Se debe tener en cuenta que los índices analizados no son totalmente independientes entre sí, por lo que no tendría sentido incluirlos todos en los modelos e pronóstico, sino únicamente los que puedan aportar información adicional. Para la escogencia de los índices a incluir en los modelos de cada región, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad incluyendo para cada una de las regiones diferentes combinaciones de los índices e identificando la combinación que produce los mejores resultados en el modelo de pronóstico.

Por otro lado, se tiene que los diferentes fenómenos no generan una influencia sobre la precipitación de igual forma durante todos los meses del año, ni los patrones de circulación como los chorros de bajo nivel tienen la misma intensidad durante todo el año, por lo que el mes en el cuál se realizan los pronósticos y el mes a pronosticar podrían determinar los predictores a usar. En la Figura 5-9 se presentan las correlaciones entre la precipitación del TRMM y los pronósticos de los índices Niño 3.4, TNA y CHOCÓ en función del mes de inicio de los pronósticos de los índices y el horizonte o mes pronosticado.



**Figura 5-9:** Correlación entre la precipitación estandarizada del TRMM sobre Colombia y las series pronosticadas por el CFSv2 de los índices Niño 3.4, TNA y CHOCÓ en función del mes de inicio y el horizonte de pronóstico

La Figura 5-9 muestra una clara relación entre el mes pronosticado por el índice y las correlaciones que se pueden alcanzar con la precipitación. Se evidencia que para el índice Niño 3.4, la relación con la precipitación es mucho más fuerte cuando se consideran los pronósticos de diciembre y febrero del índice, sin importar en que mes inicie el pronóstico. De igual forma, las correlaciones son altas cuando se pronostican los meses de julio a octubre, mientras que para los meses de marzo, abril y mayo, que coinciden con la barrera de predictibilidad de la primavera, las correlaciones incluso cambian de signo, indicando una pérdida de la teleconexión conocida con el ENSO. Por otro lado, con el índice TNA se observa una mayor relación con la precipitación en los pronósticos del índice durante los meses de marzo y abril principalmente, mientras que con el índice del Chorro del Chocó la relación no es tan fuerte ni cambia significativamente dependiendo del mes pronosticado, aunque se alcanzan a observar correlaciones mayores en los pronósticos que comienzan de junio a noviembre, cuando el horizonte de pronóstico se extiende más que en los comienzos entre diciembre y mayo.

En la Tabla 5-1 se presenta la nomenclatura asignada a cada uno de los modelos híbridos desarrollados y la descripción de cada uno de estos. Se desarrollan modelos que incluyen únicamente los pronósticos del CFSv2 de los índices que mayor correlación presentan con la precipitación observada en cada región y modelos que incluyen además de los pronósticos de los índices, los pronósticos de precipitación del CFSv2 antes y después de los dos post-procesamientos propuestos. De igual forma, se tienen modelos en los cuáles los predictores son invariantes durante todo el periodo analizado y otros en los cuáles la elección de los predictores depende o del mes de inicio de los pronosticos o del mes que se desea pronosticar.

**Tabla 5-1:** Descripción de modelos híbridos desarrollados

<b>Modelo</b>	<b>Datos de entrada</b>	<b>Selección de predictores</b>
<b>MP MV &amp; PPT NP</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pronósticos índices CFSv2</li> <li>• Pronósticos de precipitación CFSv2 con ajuste no paramétrico de anomalías</li> </ul>	Dependiente del mes a pronosticar
<b>MI MV &amp; PPT NP</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pronósticos índices CFSv2</li> <li>• Pronósticos de precipitación CFSv2 con ajuste no paramétrico de anomalías</li> </ul>	Dependiente del mes de inicio del pronóstico
<b>MV &amp; PPT NP</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pronósticos índices CFSv2</li> <li>• Pronósticos de precipitación CFSv2 con ajuste no paramétrico de anomalías</li> </ul>	Invariante durante todo el periodo
<b>MV &amp; PPT Q-Q</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pronósticos índices CFSv2</li> <li>• Pronósticos de precipitación CFSv2 con ajuste cuantil a cuantil</li> </ul>	Invariante durante todo el periodo
<b>MV &amp; PPT CFSv2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pronósticos índices CFSv2</li> <li>• Pronósticos de precipitación CFSv2</li> </ul>	Invariante durante todo el periodo
<b>MP MV</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pronósticos índices CFSv2</li> </ul>	Dependiente del mes a pronosticar
<b>MI MV</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pronósticos índices CFSv2</li> </ul>	Dependiente del mes de inicio del pronóstico
<b>MV</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pronósticos índices CFSv2</li> </ul>	Invariante durante todo el periodo

En la siguiente sección se analizarán y discutirán con más detalle los resultados de los modelos desarrollados para cada una de las regiones del país, identificando las fortalezas y debilidades de cada uno de estos y comparandolos con los resultados obtenidos a partir únicamente de los pronósticos de precipitación del CFSv2, antes y después de las técnicas de post-procesamiento implementadas.

### **5.3. Evaluación de modelos desarrollados y ajustes implementados**

#### **5.3.1. Cálculo de parámetros de ajuste y error con las observaciones**

En esta sección se evalúan los resultados obtenidos a partir de cada uno de los modelos híbridos desarrollados y las técnicas de post-procesamiento aplicadas a los pronósticos de precipitación del CFSv2 sobre cada una de las regiones del país y se comparan con los resultados de modelos estadísticos de regresión lineal múltiple basados únicamente en información histórica.

En las Figuras 5-10 a 5-15 se presenta la evaluación de la capacidad predictiva de los modelos híbridos desarrollados, el modelo CFSv2 antes y después de las dos técnicas de

post-procesamiento implementadas y los modelos estadísticos desarrollados para el pronóstico de la precipitación en Colombia y cada una de las regiones del país. La evaluación de la capacidad predictiva se realiza a través del cálculo de la correlación de anomalías (ACC), el error relativo del sesgo medio (rMBE) y el skill score del error cuadrático medio (MSESS) con las observaciones del TRMM.

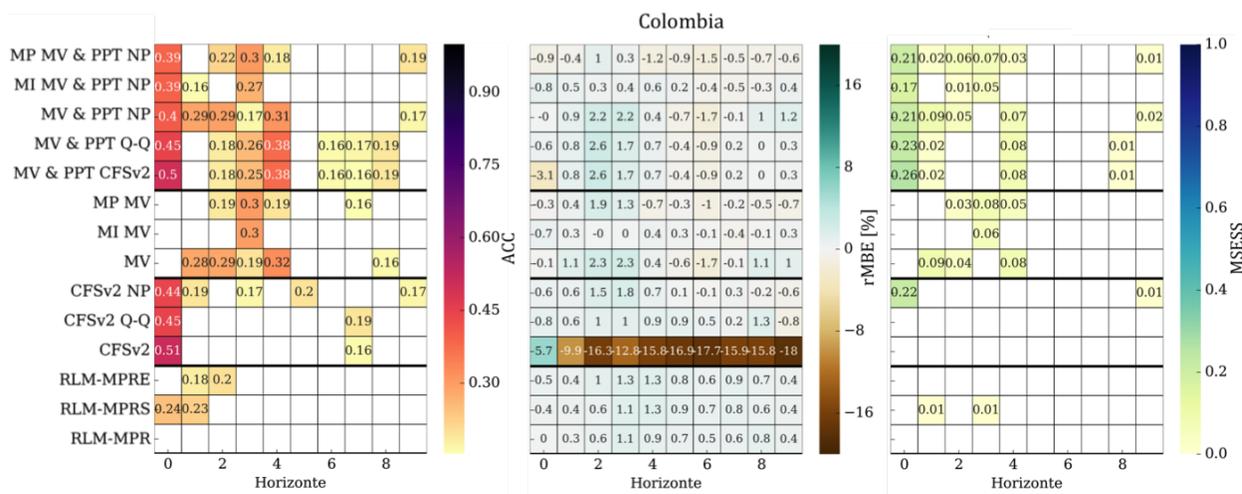


Figura 5-10: Correlación de anomalías (ACC), error relativo del sesgo medio (rMBE) y skill score del error cuadrático medio (MSESS) de los modelos de pronóstico de precipitación sobre Colombia en comparación con el TRMM

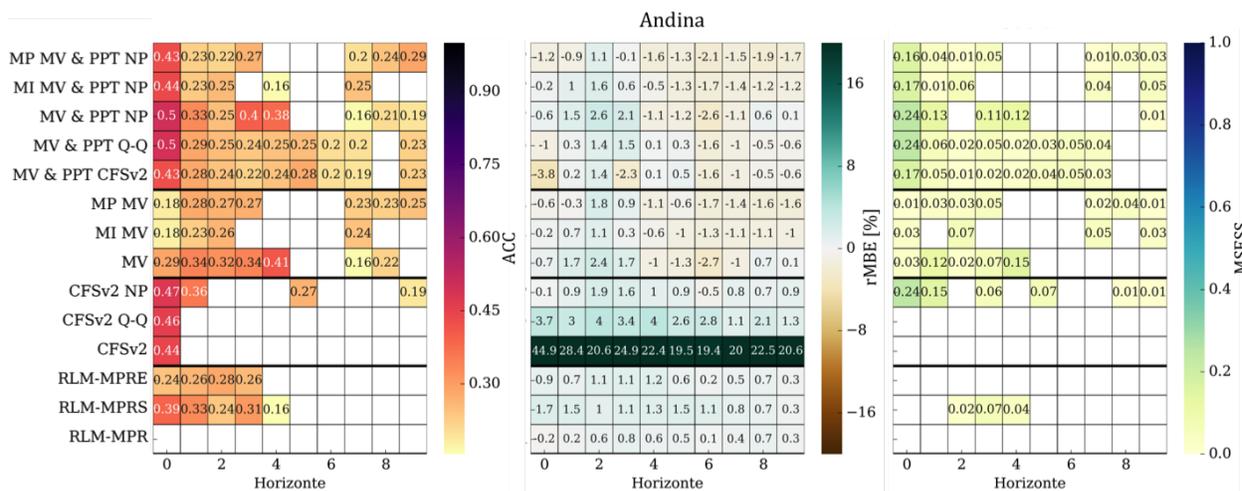
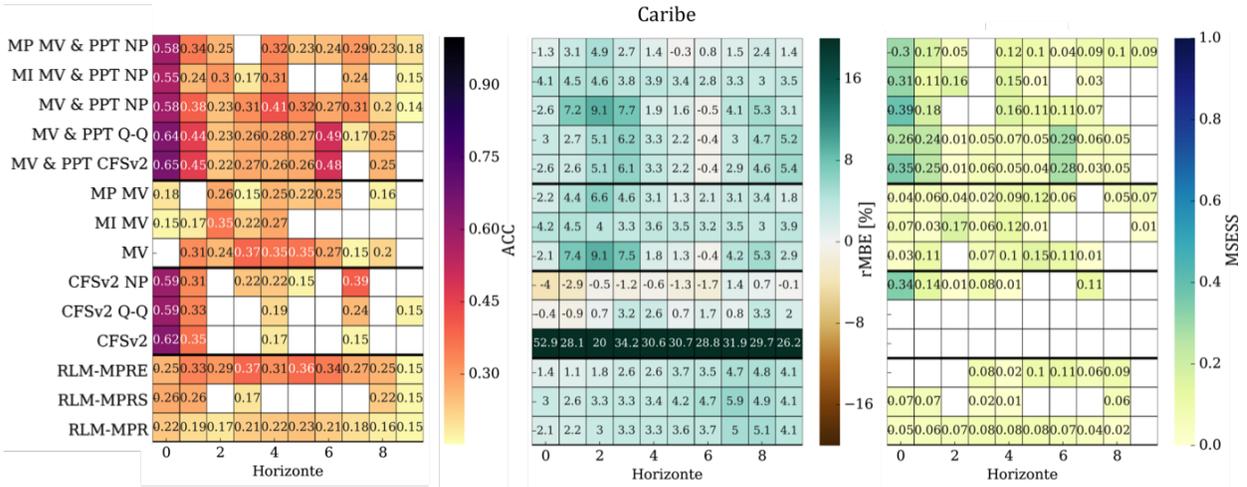
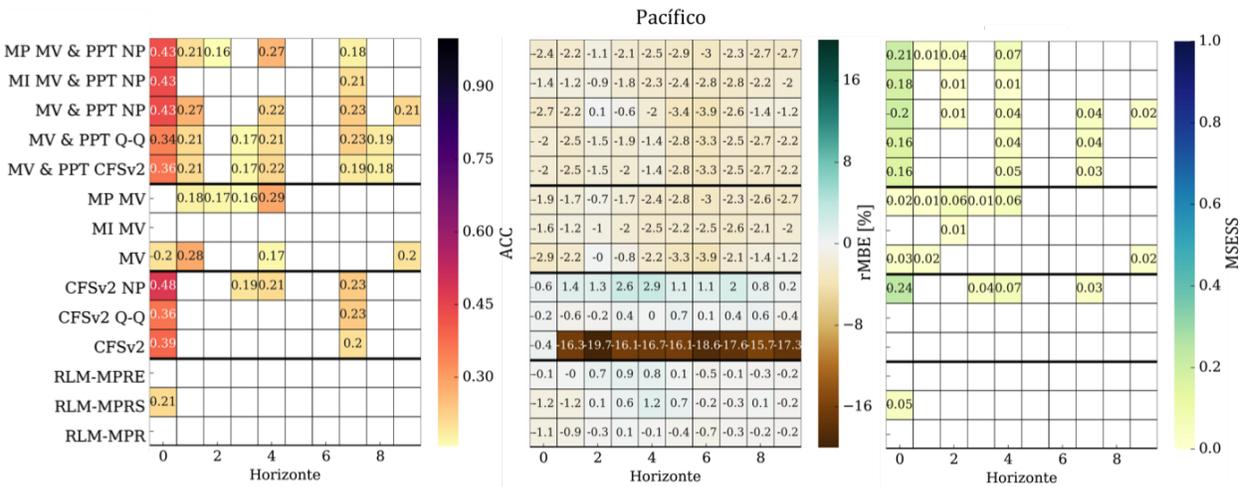


Figura 5-11: Correlación de anomalías (ACC), error relativo del sesgo medio (rMBE) y skill score del error cuadrático medio (MSESS) de los modelos de pronóstico de precipitación sobre la región Andina en comparación con el TRMM



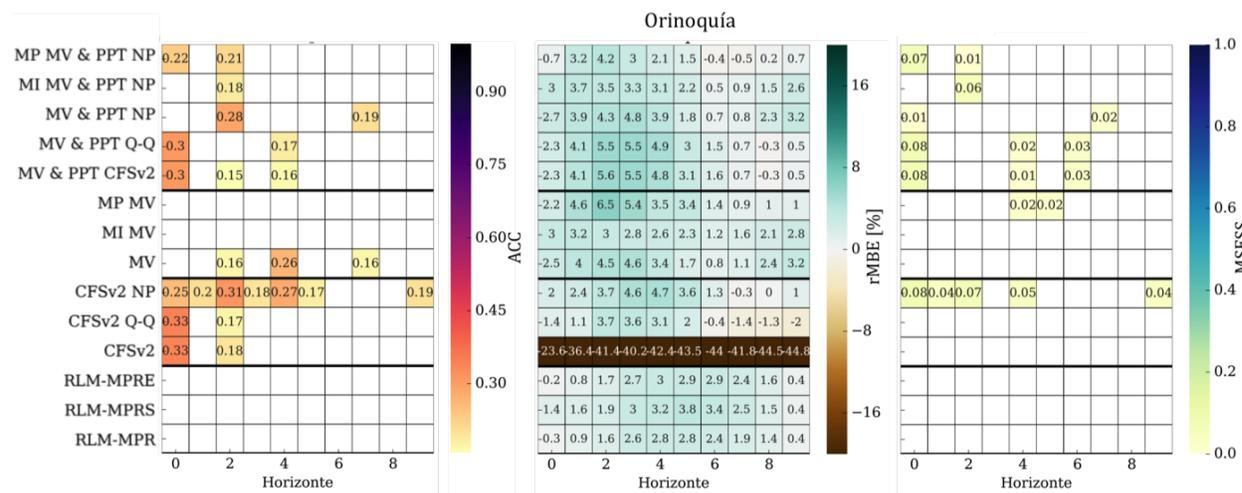
**Figura 5-12:** Correlación de anomalías (ACC), error relativo del sesgo medio (rMBE) y skill score del error cuadrático medio (MSESS) de los modelos de pronóstico de precipitación sobre la región Caribe en comparación con el TRMM



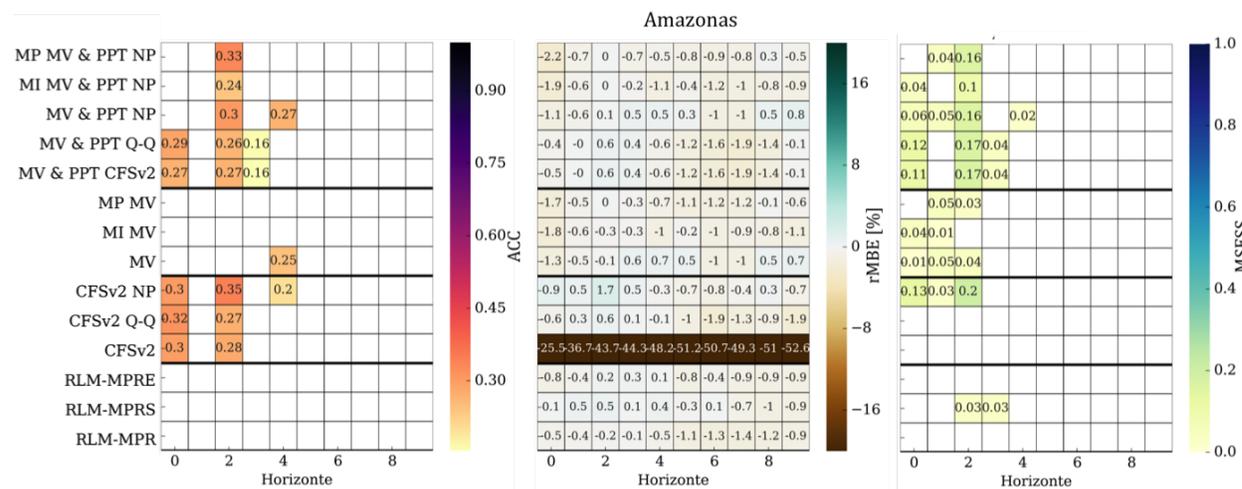
**Figura 5-13:** Correlación de anomalías (ACC), error relativo del sesgo medio (rMBE) y skill score del error cuadrático medio (MSESS) de los modelos de pronóstico de precipitación sobre la región Pacífico en comparación con el TRMM

En las regiones Andina (Figura 5-11), Caribe (Figura 5-12), Pacífico (Figura 5-13) y la serie de todo Colombia (Figura 5-10) se observa que se puede obtener un mayor aumento de la capacidad predictiva con los modelos híbridos en comparación con la precipitación pronosticada del CFSv2. Esto, debido a la alta relación que presentan los índices utilizados con la precipitación observada en estas regiones, las cuáles para la mayoría de los horizontes de pronóstico (exceptuando el 0) superaba las correlaciones de anomalías entre la precipitación observada y pronosticada por el CFSv2.

La región Pacífico, a pesar de tener una alta relación con el ENSO, presenta una más baja predictibilidad, lo que podría responder a los procesos locales que se encuentran relacionados con la precipitación en esta región, como la formación de Sistemas Convectivos de Mesoescala (MCS), que estudios previos han encontrado que sobre esta región podrían explicar más del 50 % de la lluvia, lo cual limita su predictibilidad debido a la baja capacidad que tienen los modelos dinámicos de pronóstico para simular este tipo de procesos (Jaramillo et al., 2017).



**Figura 5-14:** Correlación de anomalías (ACC), error relativo del sesgo medio (rMBE) y skill score del error cuadrático medio (MSESS) de los modelos de pronóstico de precipitación sobre la región Orinoquia en comparación con el TRMM



**Figura 5-15:** Correlación de anomalías (ACC), error relativo del sesgo medio (rMBE) y skill score del error cuadrático medio (MSESS) de los modelos de pronóstico de precipitación sobre la región Amazonas en comparación con el TRMM

Sobre las regiones Orinoquía y Amazonas la mejora con la implementación de los modelos híbridos es muy baja o nula, lo cual responde principalmente a la débil relación que presentan estas dos regiones con fenómenos macroclimáticos, por lo que la inclusión de los pronósticos de los índices no contribuye a mejorar los pronósticos de precipitación. Este comportamiento se identifica igualmente en los modelos estadísticos, los cuales al incluir la historia de precipitación y de índices macroclimáticos, no proporcionan información de valor o no representan ninguna mejora con respecto a la climatología, debido a la baja memoria que tiene la precipitación en estas regiones y a la baja asociación con fenómenos macroclimáticos, tal como se había encontrado en el Capítulo 3.

Las Figuras 5-10 a 5-15 muestran que el ajuste cuantil a cuantil, como era de esperarse, solo corrige el sesgo observado, mientras que con el ajuste no paramétrico de las anomalías se puede obtener una leve mejora de los pronósticos del CFSv2 sobre todas las regiones. La mayor capacidad de pronóstico del CFSv2 luego del ajuste no paramétrico de anomalías se refleja también en los modelos híbridos, teniendo que los que incluyen esta precipitación post-procesada presentan en general mejores resultados que los que se implementan con la precipitación cruda del modelo o luego del ajuste cuantil a cuantil.

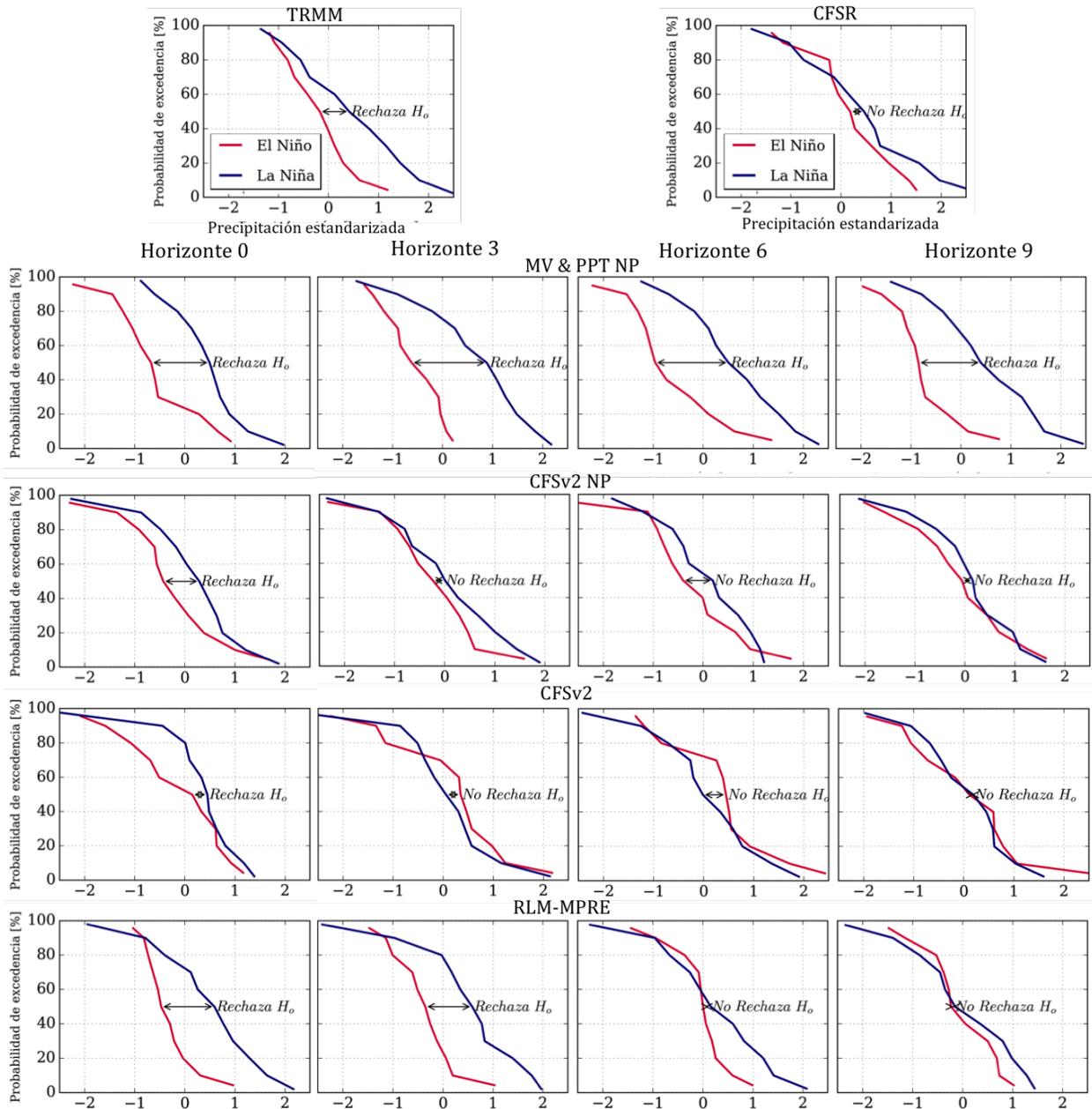
Los modelos multivariados que solo incluyen pronósticos de los índices presentan en general resultados más pobres que aquellos que incluyen también los pronósticos de precipitación, incluso antes de los post-procesamientos, lo que implica que a pesar de que la precipitación pronosticada por el CFSv2 presenta un ajuste tan pobre con las observaciones, contiene información de valor que al ser incluida en los modelos de regresión permite obtener una mejora de los pronósticos en comparación con los modelos que no incluyen esta variable.

### 5.3.2. Valor agregado de los modelos híbridos

Para evaluar el valor agregado que podría tener el uso de los modelos híbridos en comparación con el CFSv2 y los modelos estadísticos para aplicaciones reales que dependen de la disponibilidad del recurso hídrico, como la operación de largo plazo de embalses para generación de energía eléctrica o la planificación de cultivos a gran escala, se realiza inicialmente una comparación de la capacidad de algunos de los modelos para reflejar en sus pronósticos la ocurrencia de alguna de las dos fases del ENSO, teniendo en cuenta que es el fenómeno macroclimático que más afecta la disponibilidad hídrica del país.

La evaluación se realiza para la región Andina debido a su estrecha relación con el ENSO y a que allí se encuentra concentrada la mayor parte de la población del país, además de las principales centrales para generación de energía hidroeléctrica que hacen parte del Sistema Interconectado Nacional (SIN) (XM, 2018), por lo que representa una de las regiones de

mayor interés práctico. En la Figura 5-16 se presentan las distribuciones de probabilidades de excedencia de las anomalías de precipitación en la región Andina del TRMM, CFSR y los pronósticos a horizontes de 0, 3, 6 y 9 de los modelos MV & PPT NP, CFSv2 NP, CFSv2 y RLM-MPRE, separando los periodos que han correspondido con ambas fases del ENSO.



**Figura 5-16:** Distribución de probabilidades de excedencia de las anomalías estandarizadas de precipitación sobre la región Andina del TRMM, CFSR y los pronósticos de horizonte 0, 3, 6 y 9 de los modelos MV & PPT NP, CFSv2 NP, CFSv2 y RLM-MPRE durante eventos de La Niña y El Niño.

En las gráficas de la Figura 5-16 se observa como el modelo estadístico RLM-MPRE genera pronósticos de anomalías de precipitación que durante el periodo de análisis, tuvieron la capacidad de distinguir entre ambas fases del ENSO en los horizontes de pronóstico de 0 y 3 meses, mientras que para los horizontes de 6 y 9 meses, no es posible rechazar la hipótesis de que ambas distribuciones son iguales con un nivel de significancia del 95 %. Por su parte, los pronósticos del CFSv2 y el CFSv2 luego del ajuste no paramétrico de anomalías, solo tuvieron la capacidad de distinguir entre ambas fases del ENSO en el horizonte 0, mientras que para los demás horizontes no se tienen diferencias significativas entre ambas distribuciones; incluso, se observa que el CFSR mismo no distingue ambas fases del ENSO en sus datos de anomalías de precipitación durante el periodo analizado. Por otro lado, el modelo híbrido MV & PPT NP logra presentar incluso en sus pronósticos de 9 meses de horizonte diferencias significativas en las anomalías de precipitación durante los eventos de La Niña o El Niño, coincidiendo con las observaciones del TRMM en que durante La Niña las probabilidades de excedencia para un mismo valor de precipitación son mayores que las alcanzadas durante un evento El Niño.

El hecho de que en los pronósticos de anomalías de precipitación para los próximos 10 meses se pueda diferenciar entre ambas fases del ENSO representa una gran utilidad de dichos pronósticos para la planificación del recurso hídrico con casi un año de anticipación y refleja que estos pronósticos por si solos pueden ser fuente de información suficiente para la toma de decisiones a largo plazo, reduciendo la necesidad que se tiene actualmente de considerar los pronósticos del estado del ENSO para contrastarlos con los resultados provenientes de modelos de predicción del recurso hídrico usualmente estadísticos, puesto que los modelos híbridos desarrollados ya tendrían incluida esta información al menos proveniente del modelo CFSv2, facilitando la toma de decisiones y dando una mayor confiabilidad a las predicciones realizadas.

## 6 Conclusiones

La caracterización de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en Colombia permite delimitar cinco regiones con condiciones climáticas similares, las cuales coinciden con las regiones naturales; Andina, Caribe, Pacífico, Orinoquía y Amazonas. Los análisis a escala anual muestran que las regiones Andina, Caribe y Pacífico presentan un régimen bimodal, caracterizado por picos de precipitación en los meses de marzo a mayo y de septiembre a noviembre, mientras que las regiones Orinoquía y Amazonas presentan una sola temporada lluviosa al año, la cual va de abril a agosto en la región Orinoquía y de marzo a junio en la región Amazonas.

En cuanto a la variabilidad interanual, se encuentra que las anomalías de precipitación en las regiones Pacífico, Caribe y Andina guardan una alta relación con el ENSO, mientras que las dos últimas responden igualmente al gradiente de temperaturas del mar del Atlántico Tropical. Las relaciones encontradas de la precipitación en la región Amazonas con los índices macroclimáticos analizados son relativamente débiles, exceptuando el norte del Atlántico Tropical, con el cual se encuentra una asociación estadísticamente significativa y opuesta a la que presenta el resto del país. La región Orinoquía presenta una muy baja variabilidad en la banda interanual y no refleja relaciones significativas con prácticamente ninguno de los índices ni variables macroclimáticas analizadas.

Los resultados de los análisis de asociación no lineal de la precipitación con fenómenos macroclimáticos, muestran que durante el periodo de estudio es más evidente la relación de las anomalías positivas de precipitación con condiciones anómalas en los océanos Pacífico y Atlántico, mientras que durante los periodos de anomalías negativas de precipitación en el país, la relación se encuentra principalmente con el Océano Pacífico. La teleconexión del Océano Pacífico con la precipitación en Colombia se explica por la alteración que generan las anomalías de temperatura superficial del mar en la celda de Walker, intensificando la convección sobre el norte de Suramérica durante la fase fría y reversando la circulación durante la fase cálida, generando un centro convección sobre el centro del océano y subsidencia de aire sobre el norte de Suramérica. Con respecto al Atlántico, las anomalías positivas de temperatura superficial del mar al norte del ecuador tienden a aumentar la convección sobre esta región, que se extiende hacia el norte de Suramérica.

En cuanto a la capacidad de pronóstico del modelo CFSv2, la evaluación de los datos del

reforecast permite identificar que a pesar de que existen sesgos considerables en los pronósticos de precipitación sobre el país, los patrones medios espaciales de distribución de la lluvia y su variabilidad a escala mensual es relativamente bien representada. Con respecto a la capacidad de pronosticar las anomalías de precipitación, se obtiene que el modelo alcanza resultados considerablemente buenos en el horizonte 0, pero su habilidad decae rápidamente para horizontes de pronóstico mayores. La capacidad del modelo para pronosticar anomalías de precipitación es mayor sobre las regiones Caribe, Andina y Colombia, mientras que sobre el Pacífico, Orinoquía y Amazonas los resultados obtenidos son más desfavorables.

El CFSv2 tiene una alta capacidad para simular las anomalías de temperatura superficial del mar en la banda Tropical, especialmente sobre las zonas Niño en el Océano Pacífico, donde alcanza valores significativos de correlación de anomalías con las observaciones incluso en el noveno mes de horizonte. En el Océano Atlántico Tropical la capacidad de pronóstico del modelo es mayor al norte del ecuador que al sur, donde los resultados son considerablemente más desfavorables. En los pronósticos de temperatura superficial del mar en las zonas Niño se logra identificar la barrera de predictibilidad de la primavera, la cual se manifiesta en una extensión del horizonte predecible después de que se pasa el mes de mayo. De igual forma, se tiene que el modelo captura la teleconexión existente entre la precipitación y la temperatura del mar en los pronósticos de ambas variables en el horizonte 0 y se conserva incluso hasta el último mes de horizonte al correlacionar los pronósticos de temperatura con la precipitación observada, mientras que con la precipitación pronosticada la relación se pierde rápidamente a partir del horizonte 1, evidenciando que la pérdida del acoplamiento entre ambas variables ocurre debido a la pobre simulación de las anomalías de precipitación en horizontes de pronóstico diferentes al 0.

Variables de circulación regional como la velocidad del viento zonal a 925 hPa en las zonas de ocurrencia del Chorro del Chocó y Chorro del Caribe, los flujos de humedad provenientes de las cuencas Amazonas y Orinoco y la velocidad del viento en las tres direcciones sobre el país, que se encuentra en los análisis que pueden estar asociadas con la precipitación en algunas regiones de Colombia, no son adecuadamente pronosticadas por el CFSv2 luego del primer mes de horizonte, lo cual limita considerablemente la utilidad de los pronósticos de estas variables como predictores de la precipitación en el país.

Las técnicas de post-procesamiento implementadas a los pronósticos de precipitación del CFSv2 muestran que si bien con el ajuste cuantil a cuantil se logran corregir los sesgos, esta metodología no afecta la variabilidad ni la capacidad de predicción de las anomalías de precipitación. En contraste, con la técnica de ajuste no paramétrico de las anomalías de precipitación, se logra obtener una corrección de las anomalías que permite aumentar levemente la capacidad predictiva para algunos horizontes de pronóstico en todas las regiones. De igual forma, esta última técnica, permite obtener no solo un valor exacto pronosticado para cada

mes, sino un rango de valores, lo cual representa una oportunidad para la construcción de pronósticos probabilísticos y la asignación de bandas de confiabilidad a los mismos.

Los resultados obtenidos a partir de los modelos híbridos desarrollados, muestran que la inclusión de los pronósticos de índices macroclimáticos y variables de circulación permite aumentar la capacidad predictiva de los pronósticos de precipitación del CFSv2 sobre las regiones Andina, Caribe, Pacífico y Colombia que son las que presentaban una mayor relación con la variabilidad climática a escala global y regional. De igual forma, a pesar de que los pronósticos de las anomalías precipitación del CFSv2 presentan un ajuste muy bajo con la precipitación observada, estos pronósticos proporcionan información de valor para los modelos híbridos, puesto que se obtiene que los modelos que consideran esta variable en conjunto con los pronósticos de los índices climáticos alcanzan una capacidad predictiva mayor que los que solo consideran los índices.

Para las regiones Amazonas y Orinoquía, que presentaban una relación muy débil con los predictores analizados, los resultados de los modelos híbridos son más desfavorables que los obtenidos del modelo CFSv2 luego del ajuste no paramétrico de las anomalías. Se considera que en estas regiones es poco lo que se puede mejorar en capacidad predictiva de anomalías dada la alta dependencia que se ha encontrado con procesos más locales que no logran ser captados por modelos de pronóstico global y son igualmente difíciles de simular a partir de modelos estadísticos. Para la región Orinoquía, debido a la dominancia del ciclo anual y la poca variabilidad interanual que refleja, la caracterización de la climatología observada se considera que puede resultar de utilidad en la toma de decisiones relacionadas con la planeación del recurso hídrico. Sin embargo, ambas regiones continúan representando un reto muy grande en el conocimiento de la dinámica e interacciones del sistema que dominan su variabilidad climática.

# Bibliografía

- Angel, M., Mejia, J., Chang, H.-I., Ochoa, C., and Castro, C. (2017). Annual and diurnal bimodal precipitation distributions as simulated by wrf-based cordex central america. Presented at 2017 AGU Fall Meeting, New Orleans, LA, 11-15 Dec.
- Arango, C., Dorado, J., Guzmán, D., and Ruíz, J. F. (2012). Variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada al ciclo El Niño, La Niña- Oscilación del Sur (ENSO). Technical report, Subdirección de Meteorología-IDEAM.
- Arias, P. A., Martínez, J. A., and Vieira, S. C. (2015). Moisture sources to the 2010–2012 anomalous wet season in northern south america. *Climate dynamics*, 45(9-10):2861–2884.
- Badr, H. S., Zaitchik, B. F., and Guikema, S. D. (2014). Application of statistical models to the prediction of seasonal rainfall anomalies over the sahel. *Journal of Applied meteorology and climatology*, 53(3):614–636.
- Barnston, A. G., Tippett, M. K., L’Heureux, M. L., Li, S., and DeWitt, D. G. (2012). Skill of real-time seasonal enso model predictions during 2002–11: Is our capability increasing? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(5):631–651.
- Bayr, T., Dommenges, D., Martin, T., and Power, S. B. (2014). The eastward shift of the walker circulation in response to global warming and its relationship to enso variability. *Climate dynamics*, 43(9-10):2747–2763.
- Bermudez, D. (2012). *Modelamiento Bayesiano de caudal y precipitación aplicando modelos dinámicos y procesos de Poisson no homogéneos*. PhD thesis, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Bogotá.
- Bohm, G. and Zech, G. (2010). *Introduction to statistics and data analysis for physicists*, volume 1. DESY Hamburg.
- Carmona, A. and Poveda, G. (2012). Aplicación de la transformada de Hilbert-Huang en la detección de modos de variabilidad hidroclimática en Colombia. *Dyna*, 79(175):72–80.
- Cook, K. H. and Vizy, E. K. (2010). Hydrodynamics of the caribbean low-level jet and its relationship to precipitation. *Journal of Climate*, 23(6):1477–1494.

- Córdoba, S., Palomino, R., Castro, Y., Gámiz, S. R., and Jesús Esteban, M. (2009). Mecanismos causales de la variabilidad de la precipitación en Colombia. pages 301–310.
- Córdoba-Machado, S., Palomino-Lemus, R., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y., Jesús, M., and Parra, E. (2015). Assessing the impact of El Niño Modoki on seasonal precipitation in Colombia. *Global and Planetary Change*, 124:41–61.
- Dee, Dick, et al. (2016a). The climate data guide: Era-interim.
- Dee, Dick, Fasullo, et al. (2016b). The climate data guide: Atmospheric reanalysis: Overview comparison tables. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/atmospheric-reanalysis-overview-comparison-tables> [accessed:2016-01-20],.
- Dinku, T., Ruiz, F., Connor, S. J., and Ceccato, P. (2010). Validation and Intercomparison of Satellite Rainfall Estimates over Colombia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(5):1004–1014.
- Duan, W. and Wei, C. (2013). The spring predictability barrier for ENSO predictions and its possible mechanism: results from a fully coupled model. *International Journal of Climatology*, 33(5):1280–1292.
- Enfield, D. B. (1996). Relationships of interamerican rainfall to tropical Atlantic and Pacific SST variability. *Geophysical Research Letters*, 23(23):3305.
- Estupiñán Castellanos, A. R. (2016). Estudio de la variabilidad espacio temporal de la precipitación en Colombia.
- Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., and Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4):180–195.
- Gil, M. M., Quiceno, N., and Poveda, G. (1998). *Efecto del ENSO y la NAO sobre el ciclo anual de la hidrología de Colombia: Análisis de correlación Reanálisis de NCEP/NCAR y modelos de pronóstico*. PhD thesis, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Gong, X., Wang, Q., and Liu, Y. (2015). Interannual variability of the Hadley circulation associated with tropical Pacific SST anomaly. *Journal of Ocean University of China*, 14(4):596–603.
- Grimm, A. M. (2011). Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(4):537–554.
- Grimm, A. M. and Tedeschi, R. G. (2009). ENSO and extreme rainfall events in South America. *Journal of Climate*, 22(7):1589–1609.

- Grossmann, I. and Klotzbach, P. J. (2009). A review of north atlantic modes of natural variability and their driving mechanisms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D24).
- Hannachi, A., Jolliffe, I., and Stephenson, D. (2007). Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review. *International journal of climatology*, 27(9):1119–1152.
- Hurtado, A. F. (2009). Estimacion De Los Campos Mensuales Historicos De Precipitación En El Territorio Colombiano. *Diciembre*, page 119.
- IDEAM (2014). Catálogo de estaciones. <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion> [accessed:2016-06-15].
- IRI (2014). Iri enso forecast. <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/current/> [accessed:2017-08-03].
- Jaramillo, L., Poveda, G., and Mejía, J. F. (2017). Mesoscale convective systems and other precipitation features over the tropical americas and surrounding seas as seen by trmm. *International Journal of Climatology*, 37(S1):380–397.
- Jin, E. K. and Kinter III, J. L. (2009). Characteristics of tropical pacific sst predictability in coupled gcm forecasts using the ncep cfs. *Climate dynamics*, 32(5):675–691.
- Jolliffe, I. T. and Stephenson, D. B. (2003). *Forecast verification: a practitioners guide in atmospheric science*. John Wiley and Sons.
- Kalnay, E. (2003). *Atmospheric modeling, data assimilation and predictability*. Cambridge university press.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., et al. (1996). The ncep/ncar 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American meteorological Society*, 77(3):437–471.
- Kang, I.-S., Lee, J.-Y., and Park, C.-K. (2004). Potential predictability of summer mean precipitation in a dynamical seasonal prediction system with systematic error correction. *Journal of climate*, 17(4):834–844.
- Kim, H.-M., Kang, I.-S., Wang, B., and Lee, J.-Y. (2008). Interannual variations of the boreal summer intraseasonal variability predicted by ten atmosphere–ocean coupled models. *Climate dynamics*, 30(5):485–496.
- Kim, H.-M., Webster, P. J., and Curry, J. A. (2012). Seasonal prediction skill of ecmwf system 4 and ncep cfsv2 retrospective forecast for the northern hemisphere winter. *Climate Dynamics*, 39(12):2957–2973.

- Krishnamurti, T. (1971). Tropical east-west circulations during the northern summer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28(8):1342–1347.
- Lorenz, E. N. (1956). Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction.
- Lorenz, E. N. (1963). Section of planetary sciences: The predictability of hydrodynamic flow. *Transactions of the New York Academy of Sciences*, 25(4 Series II):409–432.
- Mantua, N. J. and Hare, S. R. (2002). The pacific decadal oscillation. *Journal of oceanography*, 58(1):35–44.
- Marshall, J., Kushnir, Y., Battisti, D., Chang, P., Czaja, A., Dickson, R., Hurrell, J., McCARTNEY, M., Saravanan, R., and Visbeck, M. (2001). North atlantic climate variability: phenomena, impacts and mechanisms. *International Journal of Climatology*, 21(15):1863–1898.
- NASA (2016). Trmm tropical rainfall measuring mission. <https://trmm.gsfc.nasa.gov> [accessed:2016-02-13].
- Newman, M., Alexander, M. A., Ault, T. R., Cobb, K. M., Deser, C., Di Lorenzo, E., Mantua, N. J., Miller, A. J., Minobe, S., Nakamura, H., et al. (2016). The pacific decadal oscillation, revisited. *Journal of Climate*, 29(12):4399–4427.
- NOAA (2016a). Climate indices: Monthly atmospheric and ocean time series. <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/> [accessed:2016-01-20].
- NOAA (2016b). Cold and warm episodes by season. <http://origin.cpc.ncep.noaa.gov> [accessed:2016-01-20].
- NOAA (2016c). Noaa optimum interpolation (oi) sea surface temperature (sst) v2. <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.html>[accessed:2016-01-20].
- NOAA (2018). The global forecast system (gfs). <http://www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/doc.php> [accessed:2018-01-15].
- Nobre, P. and Srukla, J. (1996). Variations of Sea Surface Temperature, Wind Stress, and Rainfall over the Tropical Atlantic and South America. 9(10):2464–2479.
- North, G. R., Bell, T. L., Cahalan, R. F., and Moeng, F. J. (1982). Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Monthly Weather Review*, 110(7):699–706.
- Peixoto, J. P. and Oort, A. H. (1992). *Physics of climate*. New York, NY (United States); American Institute of Physics.

- Pepler, A. S., Díaz, L. B., Prodhomme, C., Doblas-Reyes, F. J., and Kumar, A. (2015). The ability of a multi-model seasonal forecasting ensemble to forecast the frequency of warm, cold and wet extremes. *Weather and climate extremes*, 9:68–77.
- Poveda, G. (2004). La Hidroclimatología de Colombia: Una Síntesis desde la Escala Inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 28(107):201–222.
- Poveda, G., Álvarez, D. M., and Rueda, O. a. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, 36(11-12):2233–2249.
- Poveda, G., Bedoya, M., Vallejo-Bernal, S. M., Olarte, A., Urrea, V., et al. (2017). Validation of trmm data with in-situ measurements over colombia at diurnal, seasonal, annual and interannual time scales.
- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M. M., Quiceno, N., and Mantilla, R. (2001). Seasonality in ENSO related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index (NDVI) in Colombia. *Water Resources Research*, 37(8):2169–2178.
- Poveda, G. and Mesa, O. (1999). La corriente de chorro superficial del oeste (“del chocó”) y otras dos corrientes de chorro en colombia: climatología y variabilidad durante las fases del enso”. *Revista Académica Colombiana de Ciencia*, 23(89):517–528.
- Poveda, G. and Mesa, O. (2002). Influencia de ENSO, oscilación Madden-Julian, ondas del Este, huracanes y fases de la Luna en el ciclo diurno de la precipitación en los Andes Tropicales de Colombia. *Meteorología Colombiana*, 5:3–12.
- Poveda, G., Mesa, O., Salazar, L. F., Arias, P. A., Moreno, H. A., Vieira, S. C., Agudelo, P. A., Toro, V. G., and Alvarez, J. F. (2005). The Diurnal Cycle of Precipitation in the Tropical Andes of Colombia. *Monthly Weather Review*, 133(1):228–240.
- Poveda, G. and Mesa, O. J. (2000). On the existence of lloro (the rainiest locality on earth): Enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low-level jet. *Geophysical research letters*, 27(11):1675–1678.
- Poveda, G., Velez, J., and Mesa, O. (2002). Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorología Colombiana*, pages 121–130.
- Poveda, G., Waylen, P. R., and Pulwarty, R. S. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(1):3–27.

- Puertas, O. and Carvajal, Y. (2008). Incidencia de El Niño-Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, (23):104–118.
- Qin, Y., Wang, P., Guan, Z., and Yue, Y. (2006). Comparison of the hadley cells calculated from two reanalysis data sets. *Chinese Science Bulletin*, 51(14):1741–1746.
- Rangel-Ch, J. O. and Aguilar, M. (1995). Una aproximación sobre la diversidad climática en las regiones naturales de Colombia. *Colombia Diversidad biótica I. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá*, pages 25–76.
- Reichler, T. and Roads, J. O. (2005). Long-range predictability in the tropics. part i: monthly averages. *Journal of climate*, 18(5):619–633.
- Ricardo A. Smith, Jaime Ignacio Vélez, Juan David Velásquez, Adrián Ceballos, Paula Lizet Correa, Catalina Góez, Olver Olfrey Hernández, Luis Fernando Salazar, and Elizabeth Catalina Zapata (2004). Modelos de predicción de caudales mensuales para el sector eléctrico colombiano. pages 91–102.
- Saha, S. (2014). The ncep climate forecast system version 2. *Journal of Climate*, 27.
- Saha, S. et al. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8):1015–1057.
- Sánchez, J. and Poveda, G. (2006). Predicción de caudales medios mensuales en ríos de Antioquia. *XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, pages 164–173.
- Sohn, S.-J., Tam, C.-Y., and Jeong, H.-I. (2016). How do the strength and type of ENSO affect SST predictability in coupled models. *Scientific reports*, 6:33790.
- Sooraj, K., Annamalai, H., Kumar, A., and Wang, H. (2012). A comprehensive assessment of CFS seasonal forecasts over the tropics. *Weather and Forecasting*, 27(1):3–27.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. (2013). Climate change 2013: the physical science basis. Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5). *New York*.
- Tanaka, H., Ishizaki, N., and Kitoh, A. (2004). Trend and interannual variability of Walker, monsoon and Hadley circulations defined by velocity potential in the upper troposphere. *Tellus A*, 56(3):250–269.
- Tian, D., Martinez, C. J., and Graham, W. D. (2014). Seasonal prediction of regional reference evapotranspiration based on climate forecast system version 2. *Journal of Hydrometeorology*, 15(3):1166–1188.

- Toshie Kayano, M., Valéria Andreoli, R., and Ferreira de Souza, R. A. (2011). Evolving anomalous SST patterns leading to ENSO extremes: relations between the tropical Pacific and Atlantic Oceans and the influence on the South American rainfall. *International Journal of Climatology*, 31(8):1119–1134.
- Vanegas Ramos, M. Á. (2011). Implementación de modelos locales en el espacio de fase para el pronóstico de variables hidrometeorológicas a partir de series de tiempo. page 398.
- Wang, C. (2004). Enso, atlantic climate variability, and the walker and hadley circulations. In *The Hadley circulation: present, past and future*, pages 173–202. Springer.
- Wang, C. (2007). Variability of the caribbean low-level jet and its relations to climate. *Climate dynamics*, 29(4):411–422.
- Wang, C., Deser, C., Yu, J.-Y., DiNezio, P., and Clement, A. (2012). El nino and southern oscillation (enso): a review. *Coral reefs of the Eastern Pacific*, 8:3–19.
- Wang, C., Lee, S.-k., and Enfield, D. B. (2007). Impact of the atlantic warm pool on the summer climate of the western hemisphere. *Journal of Climate*, 20(20):5021–5040.
- Wang, C. and Picaut, J. (2004). Understanding enso physics? a review. *Earth's Climate*, pages 21–48.
- Wang, W., Chen, M., and Kumar, A. (2010). An assessment of the cfs real-time seasonal forecasts. *Weather and forecasting*, 25(3):950–969.
- Warner, T. T. (2010). *Numerical weather and climate prediction*. Cambridge University Press.
- Wilks, D. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences*, volume 100.
- XM (2018). Mercado de energíacolombiano. <http://www.xm.com.co/Paginas/Mercado-de-energia/descripcion-del-sistema-electrico-colombiano.aspx> [accesed:2018-01-20].
- Yu, B. and Zwiers, F. W. (2010). Changes in equatorial atmospheric zonal circulations in recent decades. *Geophysical Research Letters*, 37(5).
- Yuan, X., Wood, E. F., Luo, L., and Pan, M. (2011). A first look at climate forecast system version 2 (cfsv2) for hydrological seasonal prediction. *Geophysical research letters*, 38(13).
- Zheng, Fei Zhu, J. (2010). Spring predictability barrier of ENSO events from the perspective of an ensemble prediction system. *Global and Planetary Change*, 72(3):108–117.
- Zuluaga, M. and Poveda, G. (2004). Diagnóstico de sistemas convectivos de mesoescala sobre Colombia y el océano Pacífico Oriental durante 1998-2002. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 11:145–160.