

4 Capacidad predictiva de sistema de pronóstico climático CFSv2

Este capítulo contiene la evaluación tanto cuantitativa como cualitativa de la capacidad predictiva del modelo CFSv2 sobre Colombia, la cual se realiza a través de la comparación del comportamiento de las principales variables que definen la climatología del país, obtenidas del modelo, con la información de estas variables proveniente de datos satelitales y de reanálisis.

Dado que el modelo se corre cada 5 días, 4 veces al día, se tienen 28 diferentes pronósticos para cada uno de los meses. Teniendo en cuenta que las 4 corridas del día 7 únicamente se encuentran para los meses de enero y junio, debido a que para que se tenga un séptimo día de pronósticos se requiere que los pronósticos del mes comiencen el primero del mes y que además este tenga 31 días, lo cual solo ocurre en estos dos meses; los resultados de esta corrida se omiten en los análisis posteriores. De igual forma, se tiene que durante el sexto día de pronósticos se corren todos los horizontes excepto el 0, puesto que este corresponde al mes actual, del cual al momento de realizar el pronóstico en esta corrida ya han pasado más de 25 días.

En la Figura 4-1 se presentan los resultados de la correlación, el error cuadrático medio adimensional y la relación de desviaciones estándar entre los pronósticos de precipitación de todas las corridas del reforecast del CFSv2 y la precipitación del reanálisis CFSR en cada una de las regiones. En general, se observa que sobre la región Caribe se obtienen los mejores resultados en términos de los tres medidores presentados, seguidos por la serie sobre Colombia que tiene menores errores cuadráticos y la región Orinoquía que presenta correlaciones altas con el reanálisis. De igual forma, se identifica que la región Amazonas presenta los resultados más desfavorables, con correlaciones muy bajas y errores cuadráticos significativamente altos a partir de los 4 meses de horizonte de pronóstico y con una desviación estándar mucho menor a la observada en el reanálisis para todos los horizontes de pronóstico. La región Pacífico, presenta las menores correlaciones, con valores por debajo de 0.5 incluso en el horizonte de pronóstico 0 y presenta una desviación estándar mayor a la del reanálisis en todos los horizontes. Los resultados sobre la región Andina en cuanto a correlación no son tan desfavorables, pues se alcanzan correlaciones entre 0.65 y 0.8 en los primeros horizontes de pronóstico, las cuales decaen hasta valores cercanos a 0.4 a partir del

horizonte 4, sin embargo, la desviación estándar de los pronósticos de precipitación sobre esta región es significativamente mayor a la observada en el reanálisis.

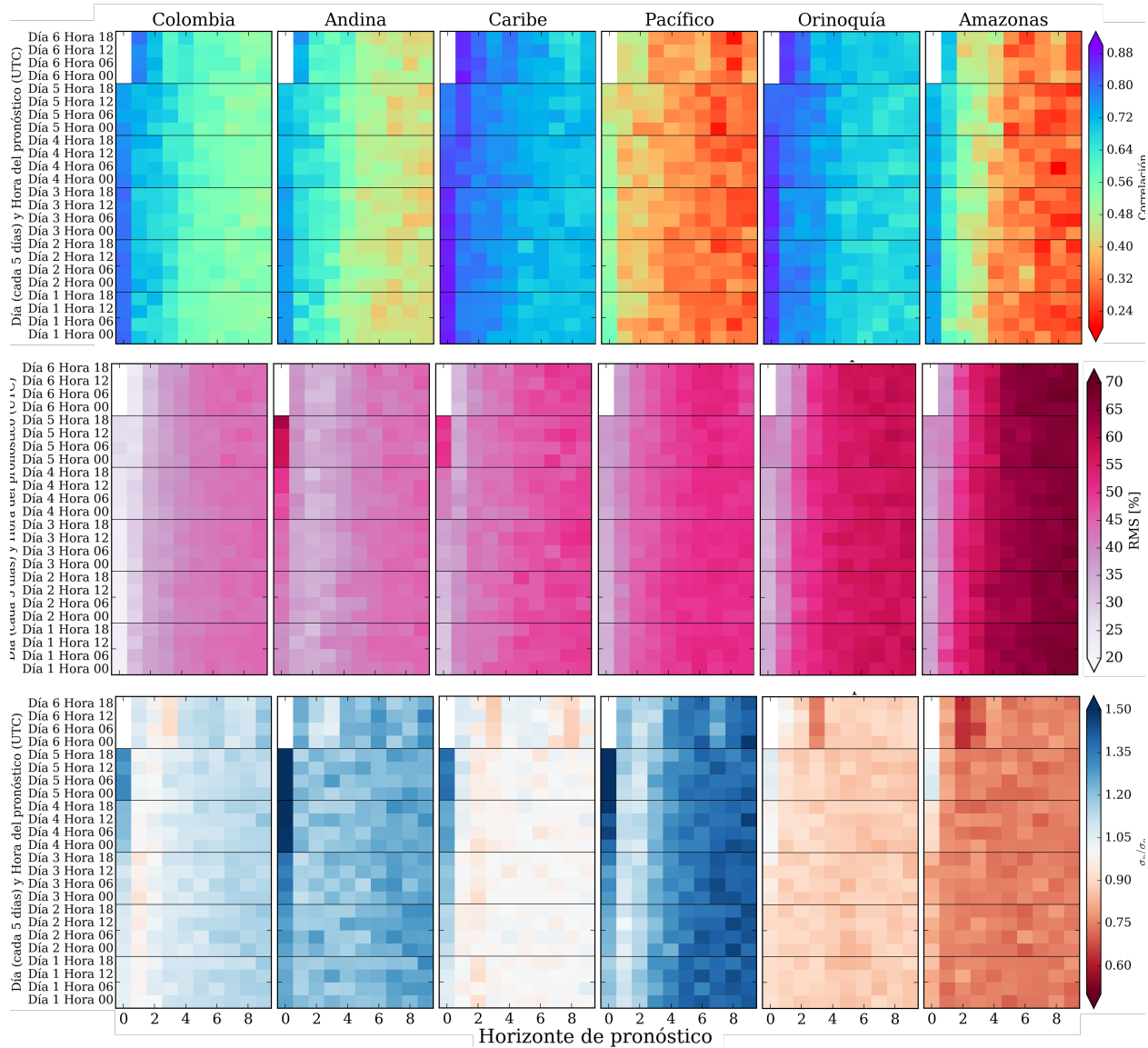


Figura 4-1: Correlación, error cuadrático medio adimensional y relación de desviaciones estándar entre los pronósticos de precipitación del CFSv2 y la precipitación del reanálisis CFSR.

De la Figura 4-1 es posible observar que no existen diferencias significativas entre los resultados de las diferentes corridas del modelo sobre las regiones analizadas, teniendo únicamente algunas diferencias en los pronósticos de horizonte 0 de las corridas realizadas el día 5, por lo que no parece que el modelo mejore sus resultados a medida que se tienen mayores datos disponibles para las condiciones iniciales. De acuerdo con esta similitud observada entre las

corridas, en este capítulo se presentan únicamente los resultados de la corrida del día 1 a la hora 00, los cuales se consideran representativos del comportamiento general observado en el modelo.

Otra forma de analizar los resultados sería construyendo un ensamble con cada una de las corridas, considerando cada una de estas como un miembro en el cual se modifican levemente las condiciones iniciales del modelo. Sin embargo, dado que se desea analizar cómo sería el comportamiento del modelo en el caso de que sea usado operacionalmente para pronóstico, se asume que la evaluación de cada corrida por separado es más conservador y representativo de los resultados que se obtendrían en el uso de los pronósticos en tiempo real del modelo, con los cuáles no resultaría práctico usar todas las corridas de cada mes. De igual forma, se ha escogido la corrida del día 1 a la hora 00, puesto que es la primera corrida que se obtiene del modelo cada mes y cuyos resultados se encuentran disponibles durante los 5 primeros días, por lo que en términos prácticos, el horizonte 0 de esta corrida, que implica el pronóstico del mismo mes, es directamente comparable con un pronóstico estadístico autorregresivo de horizonte 1, el cual necesita de la información del mes inmediatamente anterior para correrse y por ende se requieren en general de 5 a 7 días del mes siguiente para tener la información histórica actualizada.

4.1. Coherencia espacial y temporal de la precipitación

4.1.1. Comparación de patrones espaciales

En la Figura 4-2 se presenta la comparación de los mapas de ciclo anual de precipitación construidos a partir de los pronósticos de horizonte 0 y horizonte 9 con respecto a los datos del reanálisis CFSR y los datos satelitales del TRMM. Se observa que el patrón espacial de precipitación media trimestral del reanálisis es similar al observado con el TRMM, presentando el máximo de precipitación sobre la costa Pacífica, con acumulados mayores durante los trimestres de JJA y SON. Además, se tiene que el CFSR logra capturar la localización del máximo de precipitación sobre el océano y no sobre tierra, el cual es un problema que presentan otros reanálisis como el Era-Interim y es uno de las grandes limitaciones de modelos de circulación global y regional sobre el país (Angel et al., 2017). Con respecto al resto del país, el reanálisis tiende a subestimar la precipitación en el centro y sureste del país en JJA y sobrestimarla en el norte y oeste durante JJA y SON. Así mismo, se observan unos puntos de altas precipitaciones en el reanálisis que representan un comportamiento extraño que no corresponden con la variabilidad observada y que parecen coincidir con zonas con altos gradientes topográficos.

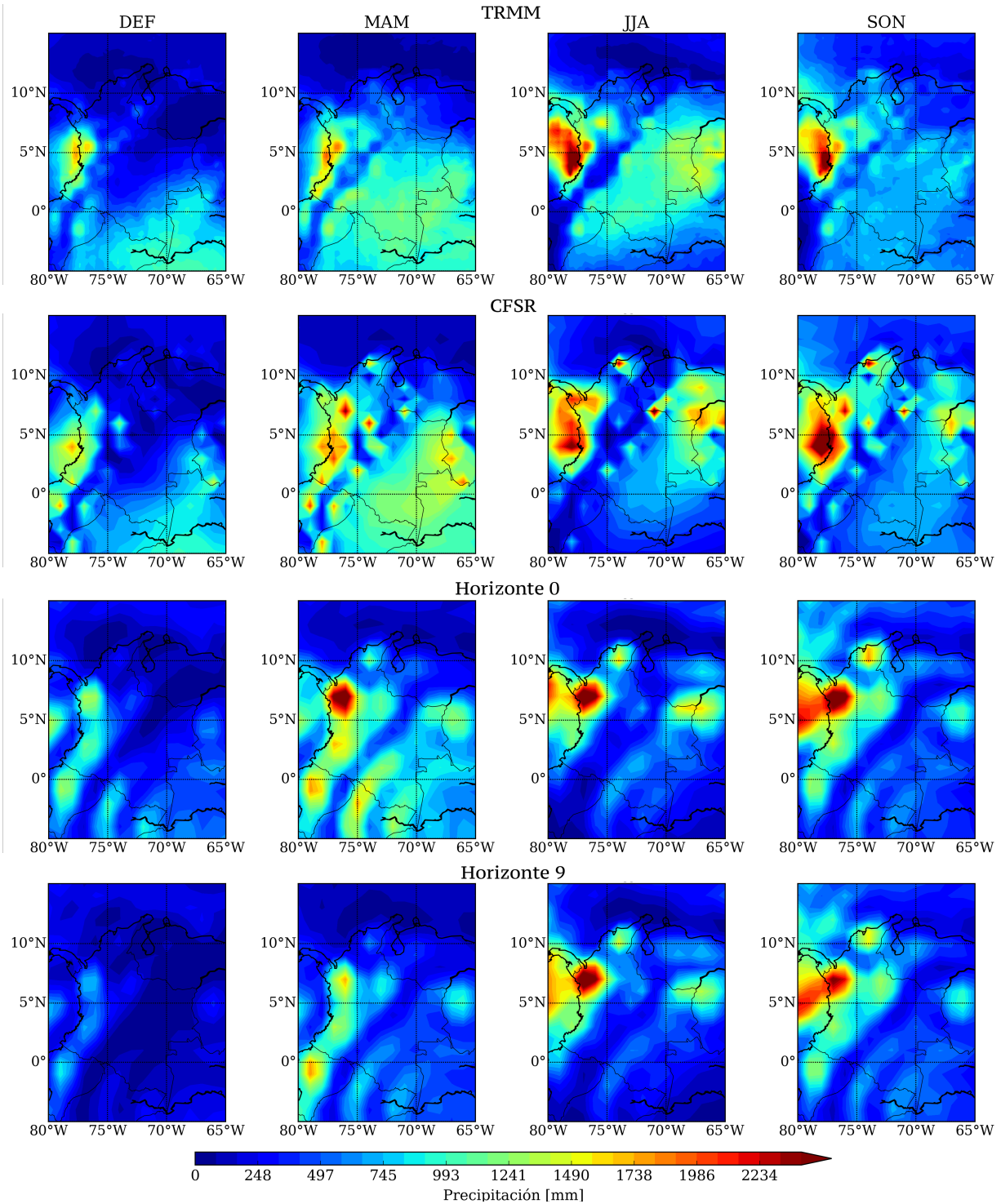


Figura 4-2: Precipitación media multianual en los trimestres de DEF, MAM, JJA y SON a partir de la información del satélite TRMM, el reanálisis CFSR y los pronósticos del modelo CFSv2 en los horizontes de 0 y 9 meses.

Con respecto a los pronósticos de horizonte 0 y 9 se observa que en general en el horizonte 0

se presentan mayores acumulados de precipitación principalmente en los trimestres de DEF y MAM. Los pronósticos no logran localizar adecuadamente el centro de altas precipitaciones sobre la costa Pacífica identificado en el TRMM, puesto que el modelo tiende a localizarlo totalmente en la parte continental, sobre el norte del departamento del Chocó y oeste de Antioquia y no sobre el océano como se observa en las bases de datos satelitales. Por otro lado, se tiene que mientras el modelo en los dos horizontes de pronóstico tiende a sobrestimar la precipitación hacia el centro-oeste y norte del país en los trimestres de MAM a SON, durante estos trimestres los pronósticos presentan menores acumulados de precipitación que los observados hacia el este y sur del país. En el trimestre de DEF parece haber una leve subestimación de la precipitación en todo el país, comportamiento que es aún más marcado en los pronósticos de horizonte 9, sin embargo, este trimestre en términos de variabilidad espacial parece ser el que representa mejor el modelo y el reanálisis, coincidiendo este el trimestre con el más seco en prácticamente todo el territorio colombiano.

En la Figura 4-3 se presentan los mapas de sesgo, relación de desviaciones estándar y correlación de anomalías de los pronósticos de precipitación a horizonte de 0 y 9 meses del modelo CFSv2 con respecto a los datos del reanálisis CFSR.

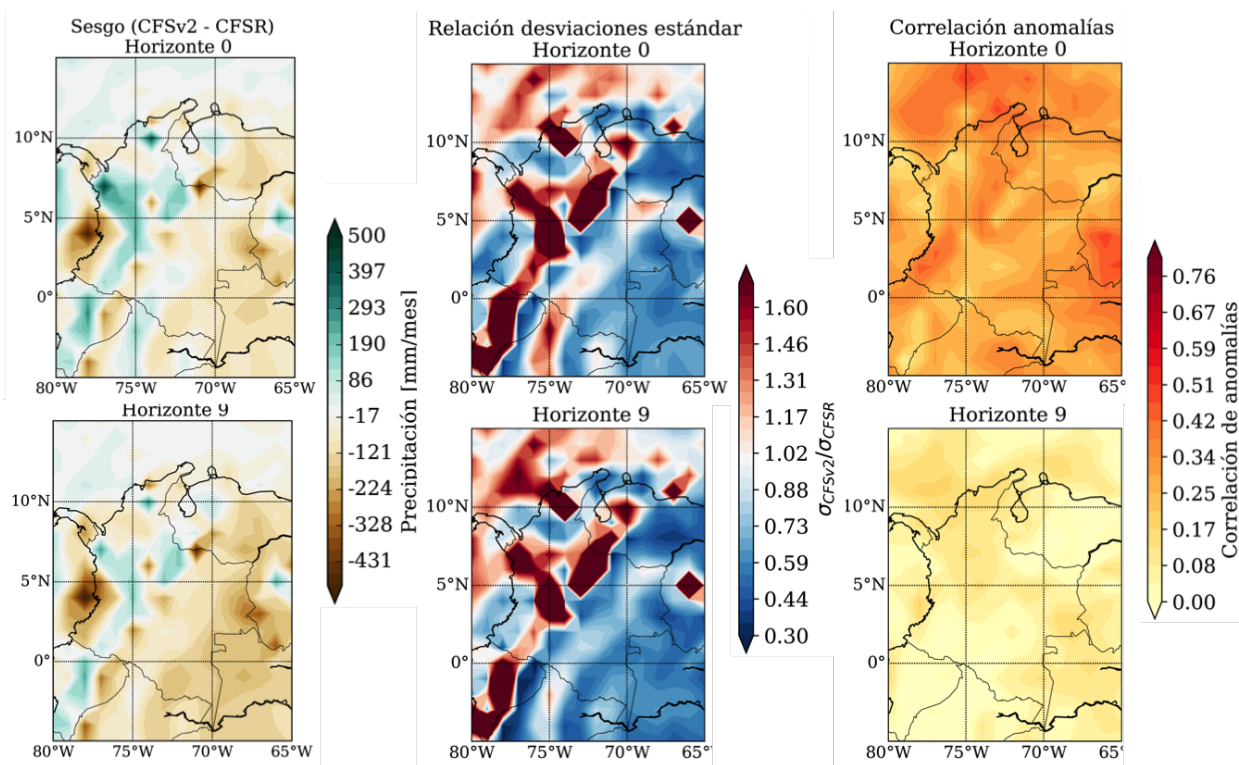


Figura 4-3: Sesgo, relación de desviaciones estándar y correlación de anomalías de los pronósticos de precipitación a horizonte de 0 y 9 meses del modelo CFSv2 con respecto al reanálisis CFSR.

En la Figura 4-3 se evidencia la influencia de la compleja topografía sobre el comportamiento del modelo, puesto que se observa en los mapas de sesgo y relación de desviaciones que el modelo tiende a subestimar la precipitación en términos de magnitudes y amplitud sobre la mayor parte del territorio Colombiano, con excepción de la zona atravesada por los tres ramales de la cordillera de los Andes y la sierra nevada de Santa Marta al norte del país, en las cuales se observa una sobrestimación con respecto a los valores del reanálisis. De igual forma, se tiene que las subestimaciones sobre el país tienden a aumentar a medida que se consideran horizontes de pronóstico mayores, mientras que para las zonas con sobrestimación se tiene una disminución de la misma con el aumento del horizonte.

En los mapas de correlación de las anomalías no es tan evidente la influencia de la topografía en el comportamiento del modelo. Se observa que esta métrica apenas alcanza valores de entre 0.3 y 0.4 en el horizonte de pronóstico 0, mientras que para el horizonte 9 los valores alcanzados son prácticamente 0 sobre todo el país.

4.1.2. Comparación de series integradas en las regiones climáticas de Colombia

En la Figuras 4-4 y 4-5 se observa el comportamiento del ciclo anual en los pronósticos de la precipitación a 0 y 9 meses de horizonte del modelo y de los datos del reanálisis CFSR y el satélite TRMM. En el horizonte 0 se observa que en general el modelo logra representar la bimodalidad o unimodalidad característica de las diferentes regiones del país, con algunos problemas en la representación de las magnitudes. La mejor representación de la variabilidad del ciclo anual en este horizonte de pronóstico se encuentra sobre la región Caribe, en la cual se logra una fase visualmente casi perfecta entre el modelo y los datos del reanálisis y el TRMM. En las regiones Andina y Pacífico y sobre Colombia se observa un desfase del modelo y el reanálisis con respecto a los datos del TRMM en la temporada seca de mitad de año, la cual tanto el CFSv2 como el CFSR la simulan uno o dos meses antes de su ocurrencia en el TRMM. Para las regiones Orinoquía y Amazonas, se observa que los mayores problemas se obtienen en la representación de la temporada húmeda, la cual tanto en el modelo como en el reanálisis tiene una duración menor a la que se observa en el TRMM.

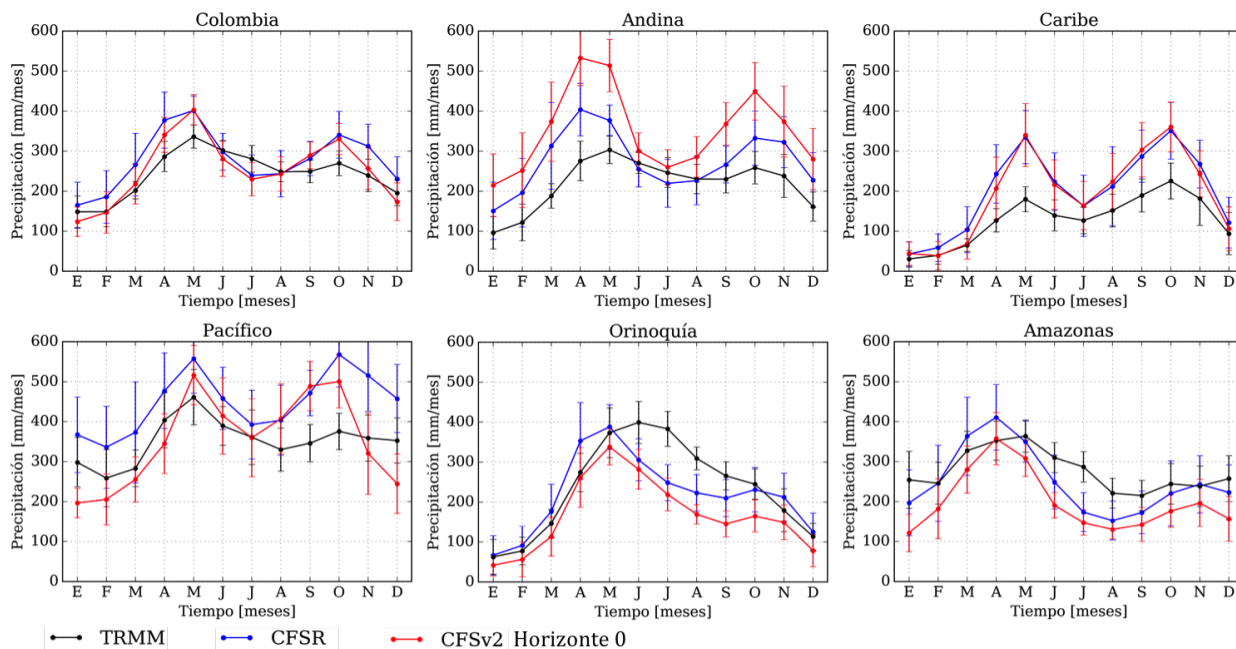


Figura 4-4: Comparación del ciclo anual de los pronósticos de precipitación a 0 meses de horizonte del modelo CFSv2 con los datos del CFSR y el TRMM. Las barras denotan la desviación estándar correspondiente a cada mes

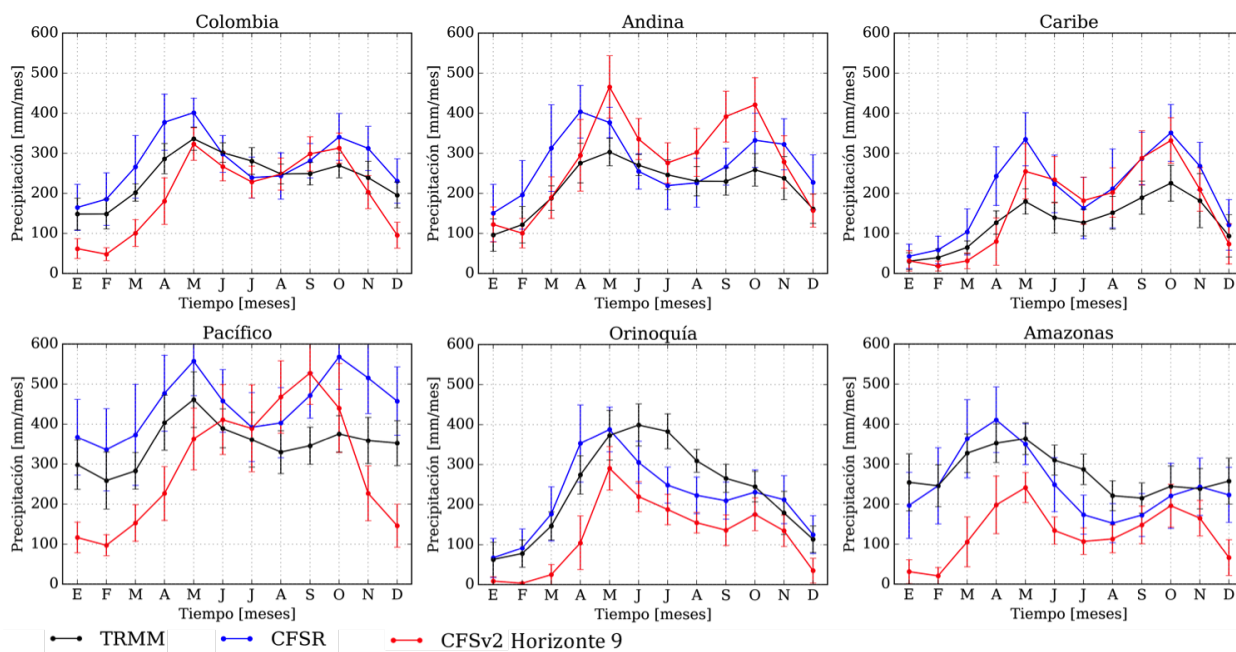


Figura 4-5: Igual que en la Figura 4-4 pero para horizonte de pronóstico de 9 meses.

Para el horizonte de pronóstico de 9 meses, se observa en la Figura 4-5 que en la mayoría de las regiones se conserva el ciclo anual observado en los pronósticos de horizonte 0, con

variaciones en las magnitudes, que en casos como los de las regiones Caribe y Andina y en Colombia pueden presentarse meses con valores más cercanos a los observados en los datos del TRMM, mientras que en las regiones Orinoquía y Amazonas, las magnitudes de los pronósticos de horizonte 9 se alejan de lo observado en el TRMM con respecto a los pronósticos de horizonte 0. Para la región Pacífico, se presentan los mayores problemas en los pronósticos de precipitación de horizonte 9, pues se observa que se pierde el ciclo bimodal que se lograba representar en el horizonte de pronóstico 0 y la variabilidad del modelo para este horizonte ya no coincide con las observaciones del satélite TRMM e incluso se aleja significativamente de lo obtenido con el reanálisis CFSR. Los resultados del modelo para el horizonte de pronóstico 9 sobre la región Pacífico son coherentes con estudios anteriores que han mostrado que esta es una de las regiones del país que representan un reto más alto para los modelos climáticos globales y regionales, mostrando que incluso reanálisis como el Era-Interim no logran aún capturar la variabilidad anual observada en esta región (Angel et al., 2017).

En la Figura 4-6 se presenta la evolución de la correlación y el error cuadrático medio relativo (RMS) con el horizonte de pronóstico de las series de precipitación del modelo CFSv2 con respecto a los datos de precipitación del TRMM y del CFSR en cada una de las regiones del país.

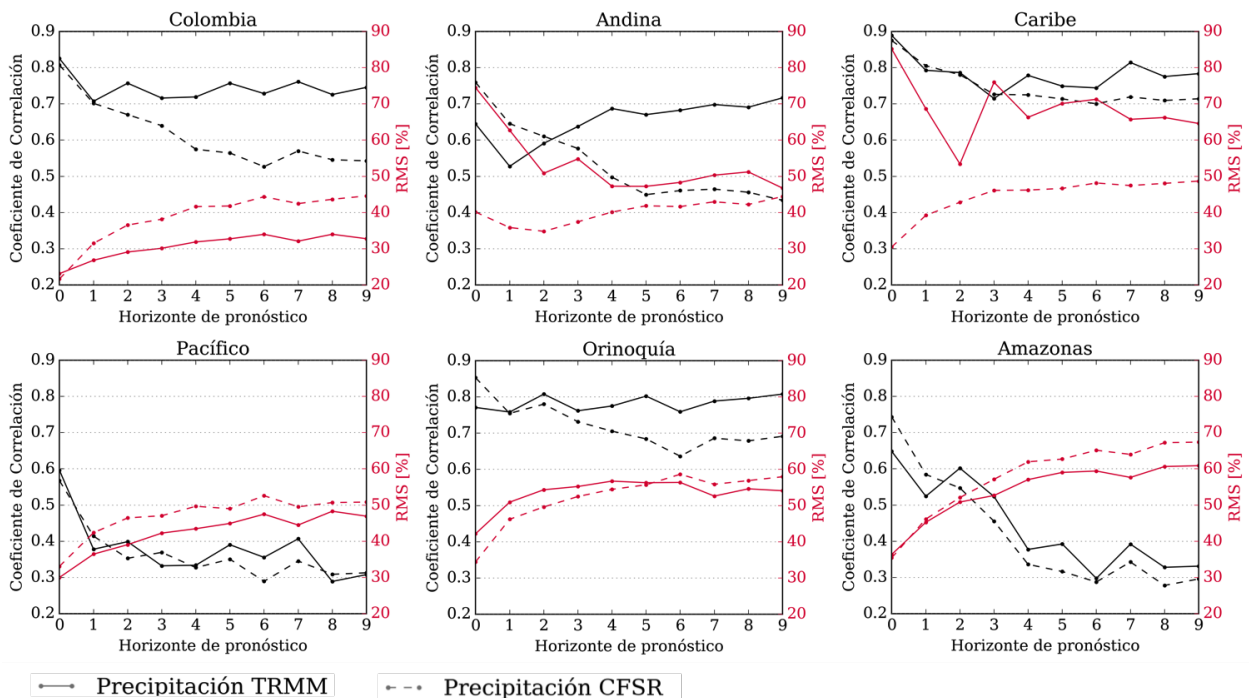


Figura 4-6: Evolución de la correlación y el RMS de los pronósticos de precipitación del modelo CFSv2 con los datos del TRMM y el CFSR.

En la Figura 4-6 se observa que la precipitación presenta correlaciones más altas con el TRMM que con el reanálisis en la mayoría de las regiones y principalmente a partir del horizonte de pronóstico de 2 meses, lo cual sin embargo, puede responder al menor periodo de registro que se tiene disponible para la comparación con el TRMM. Por otro lado, se tiene que las regiones Caribe y Orinoquía son las que presentan las mayores correlaciones con ambas bases de datos, mientras que para la región Pacífico las correlaciones son muy bajas, especialmente después del horizonte de pronóstico 1, al igual que la región Amazonas, en la cual la correlación decae significativamente a partir del cuarto mes de horizonte.

En cuanto al RMS, se observa que la serie para todo Colombia presenta los menores errores, los cuáles tienden a aumentar levemente con el horizonte de pronóstico, comportamiento que es común en casi todas las regiones, con excepción de la región Andina, la cual presenta un comportamiento opuesto, en el cual se reduce el RMS y se aumenta la correlación con el horizonte de pronóstico. Se observa que en especial en las regiones Andina, Caribe y en la serie de todo Colombia, los resultados con el TRMM son significativamente diferentes a los obtenidos con la información del CFSR, lo cual refleja, además de la diferencia de periodos en los cuales se realiza la evaluación, que existen diferencias importantes entre estas dos bases de datos, lo cual se había ya mencionado en los resultados anteriores.

Lo presentado en la Figura 4-6 y descrito anteriormente corresponde a mediciones de las series completas de precipitación, incluyendo el ciclo anual. Sin embargo, resulta de interés conocer la capacidad del modelo de pronosticar las anomalías de la precipitación con respecto al ciclo anual promedio, por lo que en la Figura 4-7 se presentan las correlaciones de las series estandarizadas con las diferentes bases de datos. Se observa que los resultados son considerablemente más bajos que para las series completas, alcanzando apenas valores cercanos a 0.5 en el horizonte de pronóstico 0 con el TRMM y disminuyendo considerablemente a medida que se aumenta el horizonte hasta valores alrededor de 0 en los demás meses.

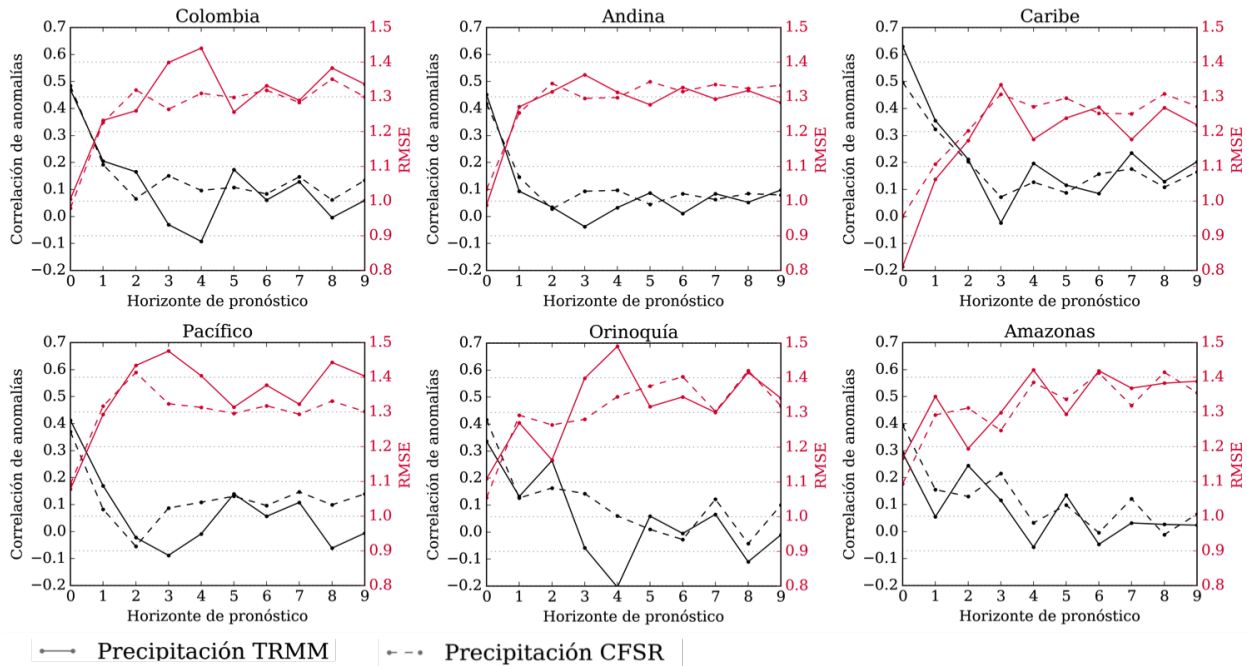


Figura 4-7: Evolución de la correlación de anomalías y el RMSE de las anomalías estandarizadas de los pronósticos de precipitación del modelo CFSv2 con los datos del TRMM y el CFSR.

El comportamiento de las anomalías con el horizonte de pronóstico es de igual forma más variable que el observado en las series completas, a pesar de que existe una tendencia a disminuir la capacidad predictiva a medida que se aumenta el horizonte de pronóstico. En la evaluación de las anomalías, la región Caribe es la que presenta las más altas correlaciones y los más bajos RMSE, mientras que las regiones Pacífico y Orinoquía tienen los resultados más desfavorables.

Las bajas correlaciones de anomalías que se obtienen a partir del horizonte de pronóstico de un mes sobre Colombia no son atípicas y coinciden con los valores encontrados en análisis globales del CFSv2 y otros modelos globales (Saha, 2014; Sooraj et al., 2012; Yuan et al., 2011; Wang et al., 2010).

4.1.3. Capacidad predictiva según el mes de pronóstico

La precisión y la incertidumbre que se tiene en los pronósticos climáticos depende no solo del horizonte de pronóstico que se está considerando, sino que también puede estar influenciado por el mes en el cual se están realizando los pronósticos.

En el caso del ENSO, esta característica es muy marcada y se conoce en la literatura como

la "Barrera de predecibilidad de la primavera del hemisferio norte", la cual consiste en una alta incertidumbre en los pronósticos que se realizan en los meses de marzo, abril y mayo principalmente debido al débil acoplamiento entre el océano y la atmósfera durante estos meses (Duan and Wei, 2013; Barnston et al., 2012). En la Figura 4-8 es posible observar este comportamiento en los pronósticos de temperatura superficial del mar de la zona Niño 3.4 realizados a partir del mes de marzo de 2017 y junio de 2017 por los diferentes modelos dinámicos y estadísticos considerados por el Instituto de Investigación Internacional para el Clima y la Sociedad (IRI por sus siglas en inglés). En la Figura se observa que existe una alta dispersión entre los pronósticos de los diferentes modelos realizados el mes de marzo, mientras que en el mes de junio, cuando apenas se ha superado la barrera, la dispersión disminuye considerablemente, lo que implica una menor incertidumbre en los pronósticos.

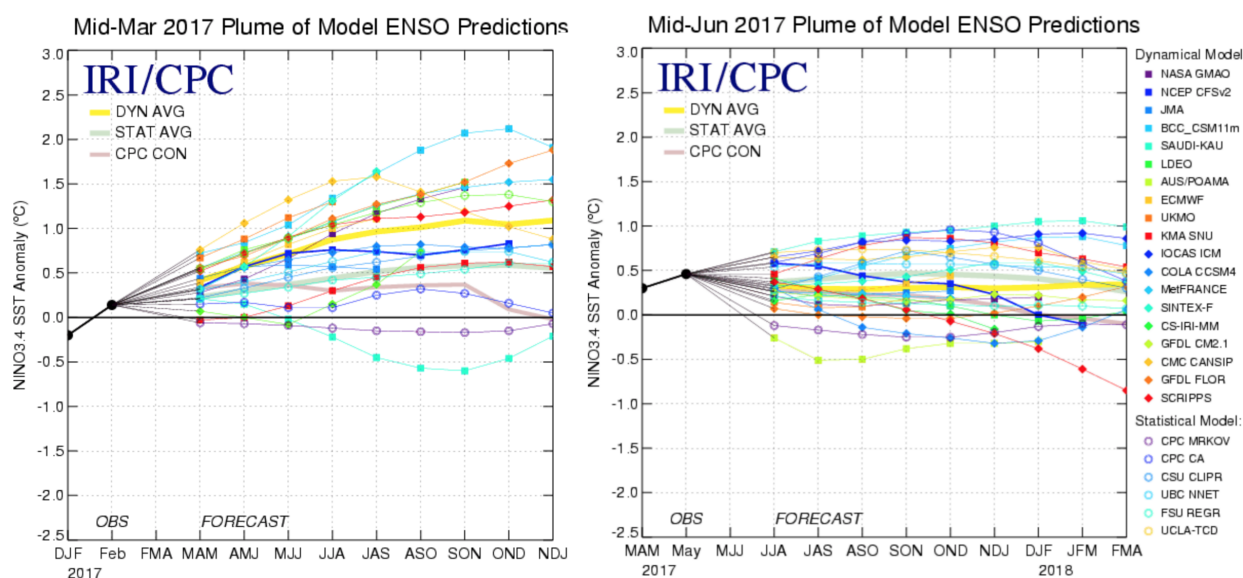


Figura 4-8: Pronósticos de la temperatura de la zona Niño 3.4 realizados en los meses de marzo de 2017 (izq) y junio de 2017 (der) (IRI, 2014)

En el caso de los pronósticos de precipitación del CFSv2, se desea conocer si existen algunos meses en los cuáles el modelo presente mayores dificultades para los pronósticos en los diferentes horizontes. En la Figura 4-9 se presentan las correlaciones entre la precipitación del modelo y las observaciones en función del mes de inicio y el mes pronosticado para cada una de las regiones de Colombia.

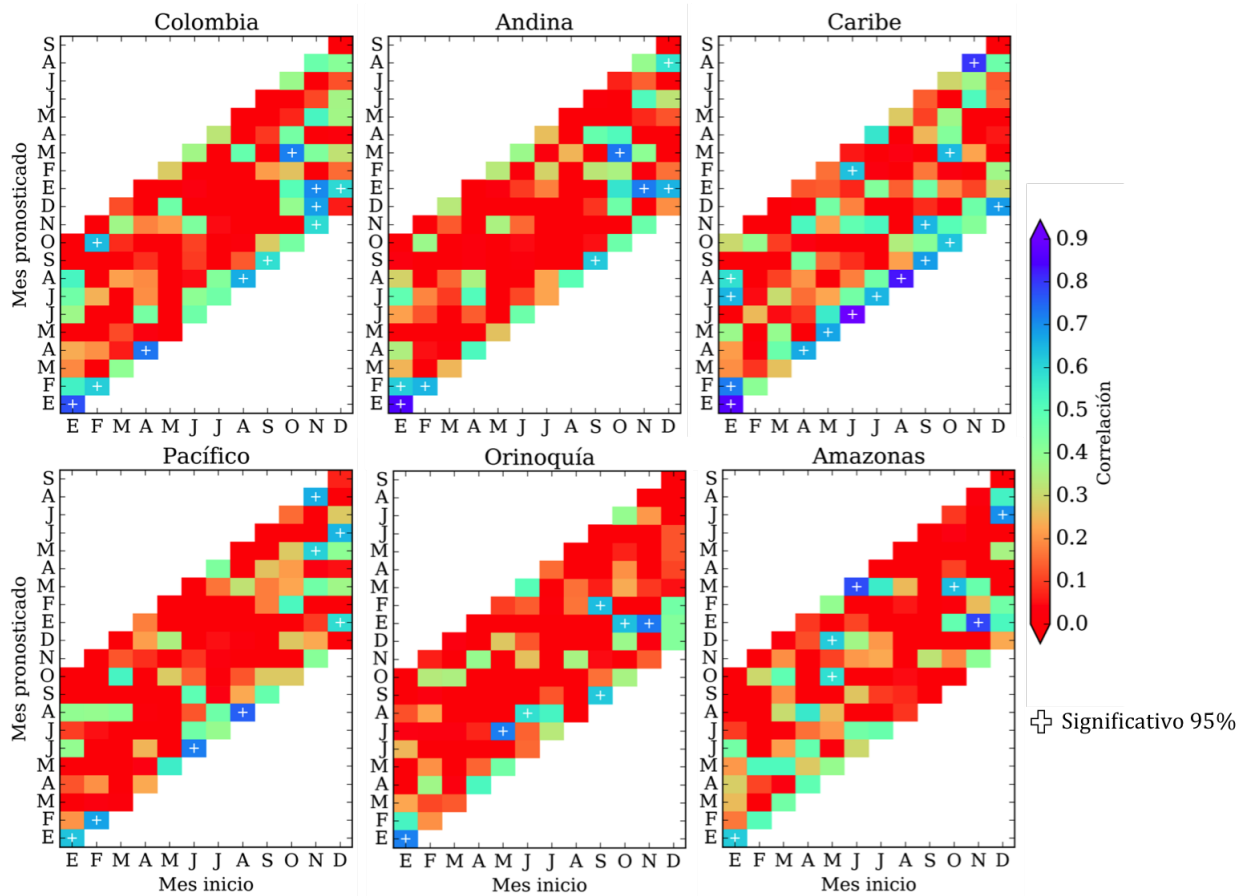


Figura 4-9: Correlación de la precipitación del CFSv2 con los datos del TRMM en función del mes de inicio y el horizonte de pronóstico

En la Figura 4-9 se observa un comportamiento muy variable en los meses con más altas correlaciones en los horizontes de pronóstico mayores a un mes, donde no se evidencia un patrón totalmente definido dependiendo del mes en el cual se realicen los pronósticos, a pesar de que los pronósticos que comienzan entre octubre y enero parecen alcanzar mayores correlaciones en los horizontes más altos que los pronósticos que comienzan en los demás meses. En cuanto a los pronósticos del mismo mes, se observa en general una caída en la capacidad predictiva en los meses de marzo y abril, la cual es más evidente en las regiones Pacífico, Orinoquía, Andina y Caribe, mientras que en este horizonte, la región Amazonas el trimestre de agosto a noviembre tiene correlaciones cercanas o menores que cero, lo cual para la serie de todo Colombia solo ocurre en el mes de mayo y en diciembre, mes en el cual la mayoría de series muestran una muy baja correlación con las observaciones, lo cual es extraño teniendo en cuenta que en este mes los pronósticos de los próximos meses tienen en general correlaciones más altas.

Los resultados obtenidos son coherentes con evaluaciones a escalas más grandes del CFSv2

como las presentadas por Saha (2014), que muestra que la capacidad de predicción de la precipitación del modelo es tan baja que en las correlaciones por meses solo se alcanzan valores significativos durante el primer mes de horizonte, aunque a escalas más altas (como sobre todo el hemisferio norte) si se evidencia claramente una mayor capacidad predictiva durante el trimestre de octubre a diciembre, mientras que sobre Colombia a pesar de que en algunas regiones se alcanza a notar una extensión del horizonte predecible durante estos meses, este comportamiento no es totalmente definido ni permite obtener conclusiones muy robustas sobre esta característica en la predicción de la precipitación en el país.

4.1.4. Análisis de Funciones Ortogonales Empíricas

El análisis de las Funciones Empíricas de la precipitación estandarizada proveniente del modelo y de las bases de datos de referencia permite tener una idea de cómo el modelo logra representar los modos de variabilidad observados de las anomalías de precipitación en el dominio considerado, en términos de la amplitud asociada a cada uno de estos modos y los patrones espaciales formados por los eigenvectores y la variabilidad temporal de los eigenvalores.

En la Figura 4-10 se presentan los resultados de la primera EOF y la evolución temporal de su componente principal asociado, para la precipitación estandarizada del TRMM, CFSR y pronósticos de horizonte 0 y 9 del CFSv2. Se observa que mientras con la precipitación del TRMM se obtiene una varianza explicada de apenas 17.74 % para la primera componente, el CFSR y el CFSv2 presentan varianzas significativamente mayores, con valores de 26.13 %, 25.76 % y 22.31 % respectivamente para el reanálisis y los horizontes de pronóstico 0 y 9.

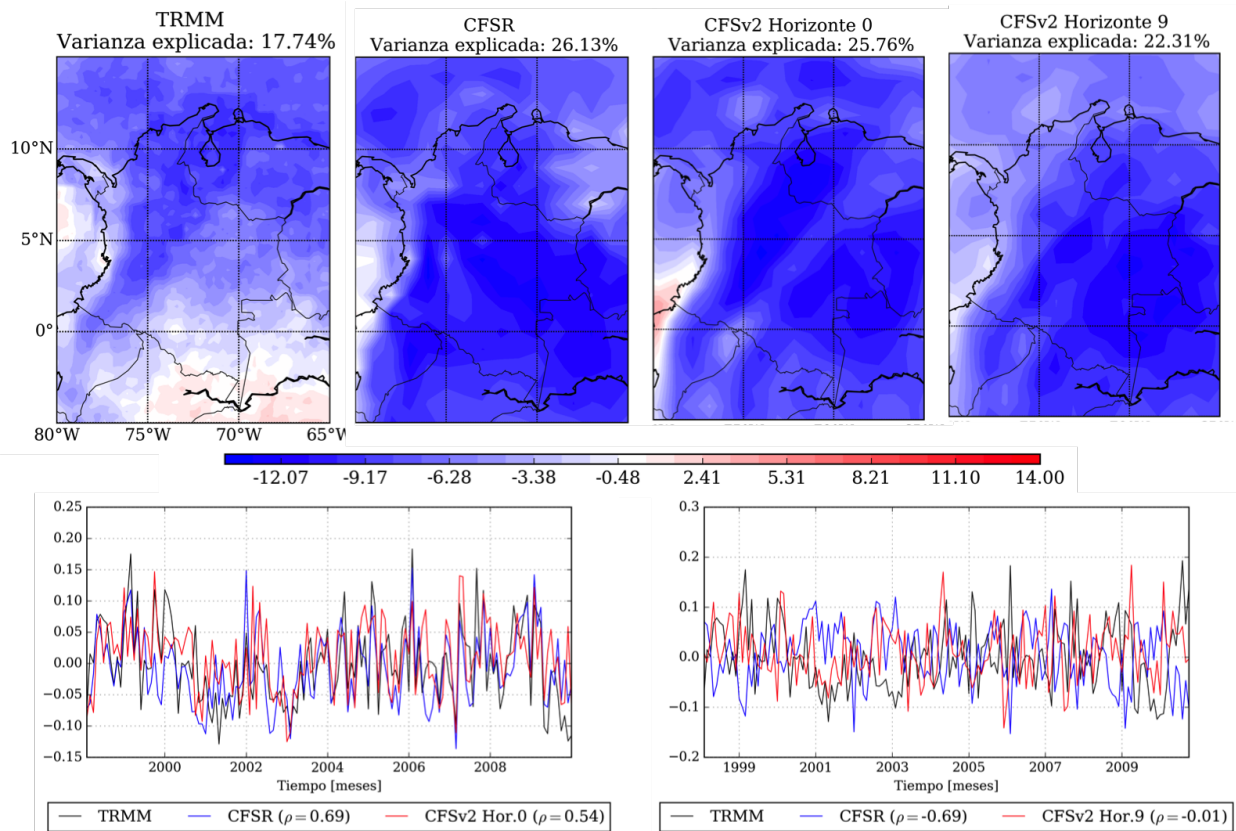


Figura 4-10: Resultados de la primera Función Ortogonal Empírica de los pronósticos de precipitación de horizonte 0 del modelo CFSv2 en comparación con los datos del TRMM y el CFSR.

De igual forma, la Figura 4-10 muestra que tanto en el reanálisis como en el modelo, toma más importancia el este y sur del país en la primera EOF, mientras que en las observaciones del TRMM se resaltan principalmente las regiones Andina y Caribe. En cuanto a la evolución temporal de la componente, se observa que para el horizonte 0 se tiene una relativamente buena coherencia temporal con el TRMM, con correlación de 0.54, mientras que en el horizonte 9 la coherencia se pierde totalmente con una correlación de 0.

En la Figura 4-11 se presenta la segunda EOF y segunda componente principal. En este caso se observa que la varianza explicada por el reanálisis y el modelo son más cercanas a lo obtenido con el TRMM. Por otro lado, los patrones espaciales del reanálisis coinciden relativamente bien con las observaciones, reflejando el dipolo entre el norte y el resto del país. Sin embargo, en el modelo se observa que las regiones Andina y Pacífico toman el mismo signo de la región Caribe, lo cual no coincide con lo obtenido a partir del TRMM.

En cuanto a la evolución temporal de la componente, se observa que para la segunda componente la correlación del modelo con el TRMM no decae tan rápidamente como en la primera

componente, teniendo que en el horizonte 0 la correlación alcanzada es de 0.41 y en el horizonte 9 de 0.23.

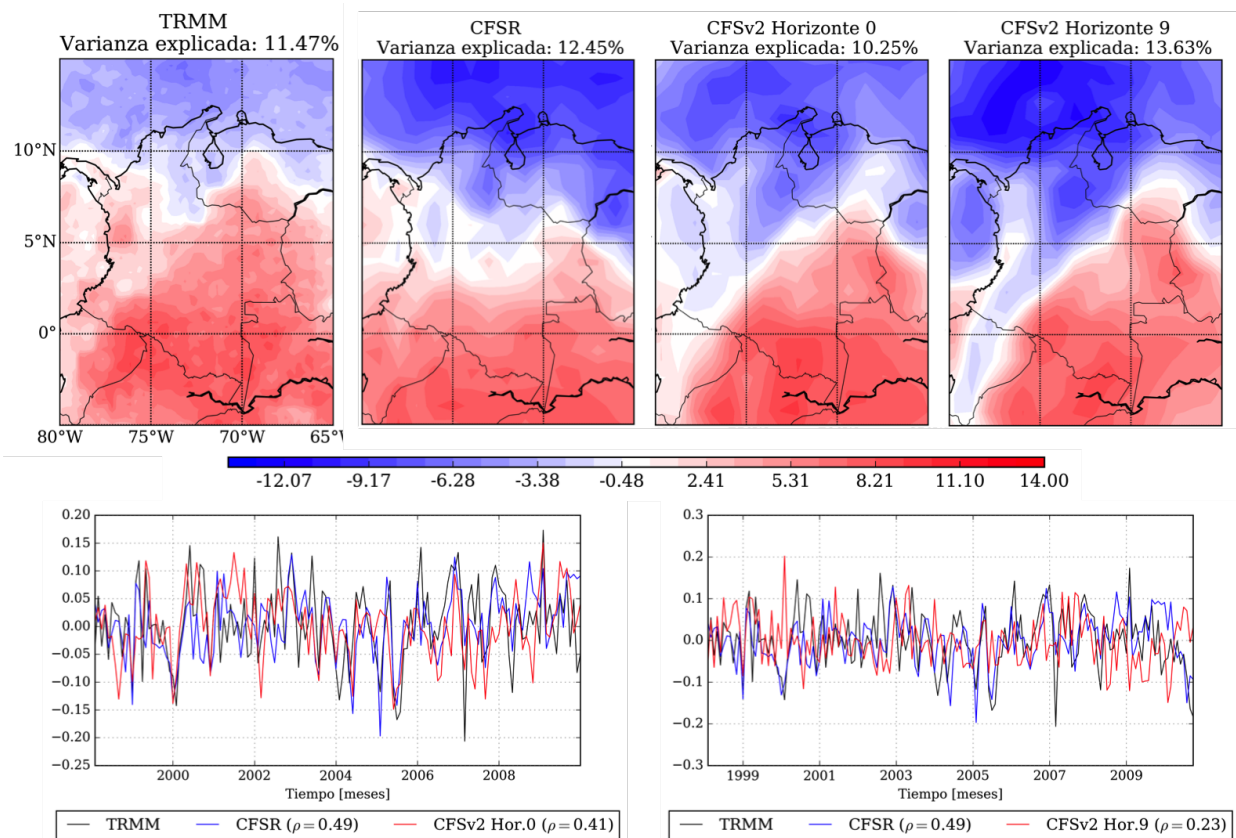


Figura 4-11: Resultados de la segunda Función Ortogonal Empírica de los pronósticos de precipitación de horizonte 0 del modelo CFSv2 en comparación con los datos del TRMM y el CFSR.

4.2. Fenómenos macroclimáticos y su relación con la precipitación

4.2.1. Temperatura superficial del mar

En la Figura 4-12 se presenta la capacidad del modelo CFSv2 de representar las magnitudes y la variabilidad de la temperatura superficial del mar en la banda tropical, a partir de los mapas de sesgo, correlación y correlación de anomalías de los pronósticos de horizonte 0 y 9 meses con respecto a los datos del reanálisis CFSR.

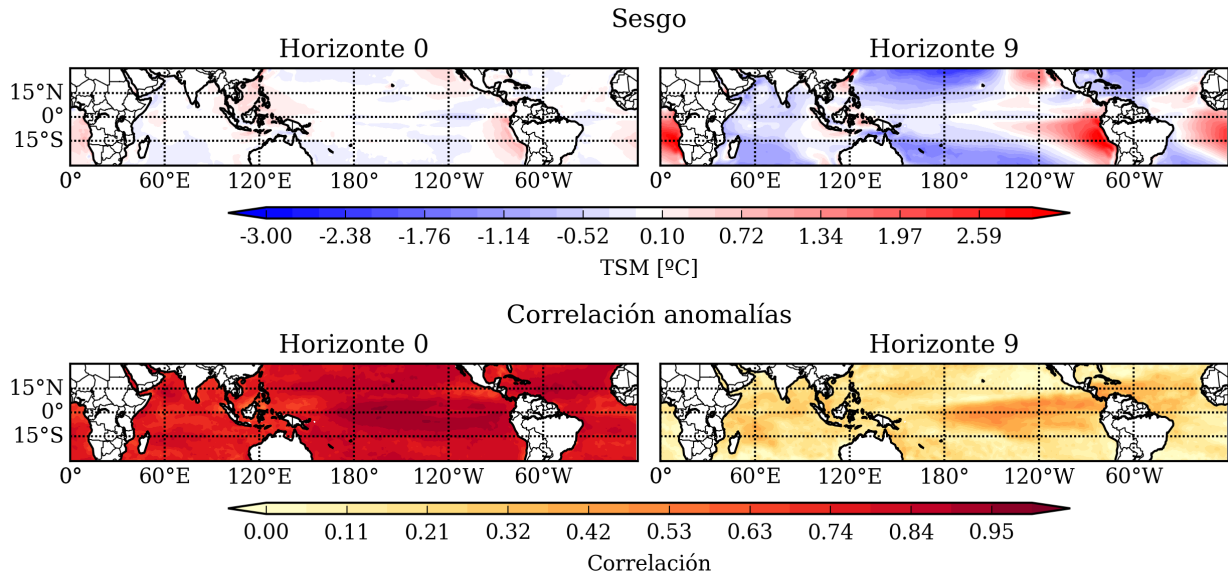


Figura 4-12: Sesgo y correlación de anomalías de los pronósticos de temperatura superficial del mar a horizonte de 0 y 9 meses del modelo CFSv2 con respecto al reanálisis CFSR.

En la Figura 4-12 se observa que en el horizonte de pronóstico de 0 meses se presentan zonas con sesgos positivos y negativos en los tres océanos, los cuales no alcanzan valores superiores a $0,5^{\circ}C$, obteniendo las mayores diferencias en el Océano Pacífico cerca a la costa Peruana. En el horizonte de pronóstico 9 se observa un aumento significativo de los sesgos, los cuales son positivos y cercanos a $3^{\circ}C$ sobre la costa peruana en el Océano Pacífico y en el Océano Atlántico entre 0° y $30^{\circ}S$, cerca a la costa africana. En el Pacífico centro-oeste entre $15^{\circ}N$ y $30^{\circ}N$ y entre $15^{\circ}S$ y $30^{\circ}S$ se observan sesgos negativos alrededor de $2^{\circ}C$, mientras que hacia el trópico en este océano se observan los menores sesgos, al igual que en el Océano Índico, donde los sesgos son principalmente negativos y máximos hacia el sur, con valores de hasta $1^{\circ}C$.

Las correlación de anomalías, muestra para el horizonte de pronóstico de 0 meses, valores entre 0.6 y 0.9, siendo máxima sobre el ecuador en el centro-este del Pacífico, que coincide con la zona de desarrollo del ENSO, y sobre el norte del Atlántico Tropical. Para el horizonte de pronóstico de 9 meses, la capacidad predictiva de la temperatura superficial del mar se ve significativamente reducida sobre todo el océano. Sin embargo, se observa que se conserva el patrón de mayores correlaciones sobre el Pacífico Tropical central-este, el Mar Caribe y el Atlántico Tropical cercano a Suramérica, las cuales representan algunas de las zonas de mayor influencia sobre el comportamiento del clima en Colombia, lo cual representa una buena oportunidad para los pronósticos.

Además de los patrones espaciales de capacidad predictiva de la SST del modelo, resulta de

interés evaluar las zonas específicas de donde se obtienen los índices que guardan una mayor relación con la climatología Colombiana. En la Figura 4-13 se presenta la evolución de la correlación y el RMSE de las anomalías estandarizadas de temperatura superficial del mar en diferentes regiones de los océanos Pacífico y Atlántico Tropical.

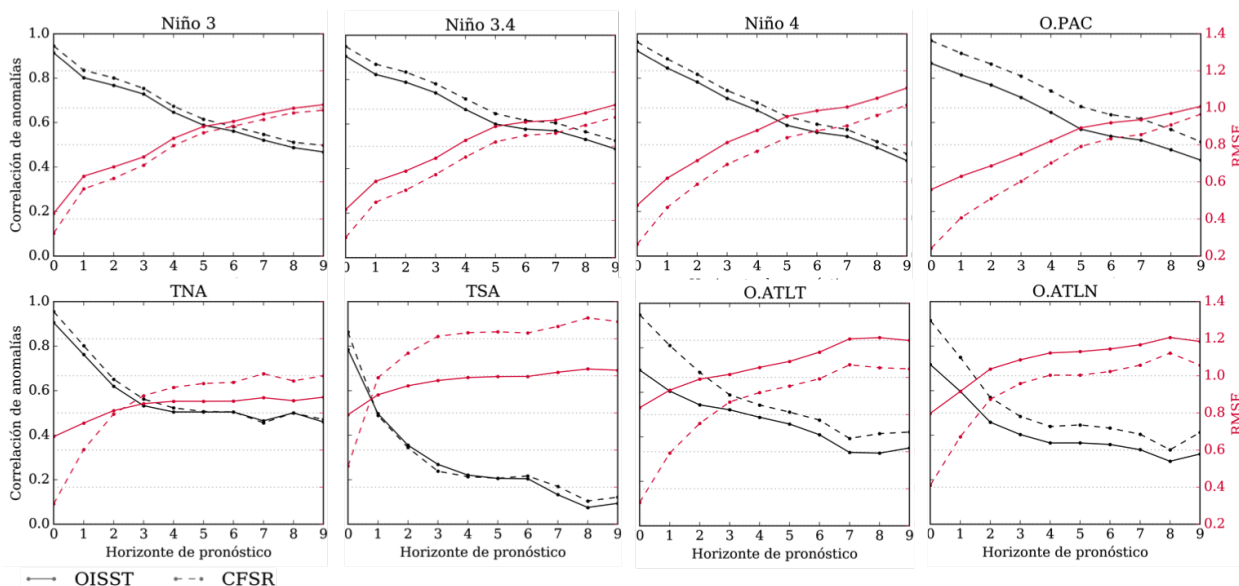


Figura 4-13: Evolución de la correlación y el RMSE de las anomalías estandarizadas de los pronósticos de temperatura superficial del mar del modelo CFSv2 con los datos del OISST y el CFSR.

En la Figura 4-13 se observa que para el caso de la temperatura superficial del mar es muy clara la tendencia a disminuir la capacidad predictiva, en términos de variabilidad y amplitud de las anomalías pronosticadas, a medida que se aumenta el horizonte. De igual forma, se observa que las correlaciones de anomalías alcanzadas toman valores mucho más altos que las obtenidas para la precipitación en Colombia, puesto que en el caso de esta variable se obtienen correlaciones significativamente altas incluso en el horizonte de pronóstico máximo.

La Figura 4-13 muestra que la capacidad de pronóstico del modelo es significativamente más alta sobre el Pacífico Tropical que sobre el Atlántico Tropical. Sobre las zonas evaluadas en el océano Atlántico, se observa que el modelo logra pronosticar con mayor precisión las anomalías de temperatura superficial del mar sobre las zonas ubicadas al norte del ecuador, como es el caso de la TNA, O.ATLT y O.ATLN, mientras que para el índice TSA se observan los valores más bajos de correlación de anomalías. Dicho comportamiento coincide con lo observado en la Figura 4-12 donde se identificaba que el Atlántico Tropical Norte alcanzaba valores similares al Pacífico Tropical, mientras que el Atlántico Tropical Sur presentaba correlaciones más bajas.

La alta capacidad de pronóstico estacional de los modelos dinámicos sobre el Pacífico Tropical ya ha sido estudiada y discutida por diferentes autores, tales como Jin and Kinter III (2009), Kim et al. (2012), Saha (2014), que han encontrado que tanto el CFSv2 como otros modelos climáticos tienen una mayor capacidad para predecir la temperatura superficial del mar sobre esta región a escalas estacionales e interanuales dada la alta varianza que presenta esta región en estas bandas.

En la Figura 4-14 se presentan las matrices de correlación según el mes de inicio y el mes pronosticado de temperatura superficial del mar en cada una de las zonas de interés de los océanos Atlántico y Pacífico del CFSv2 y los valores observados con el satélite OISST.

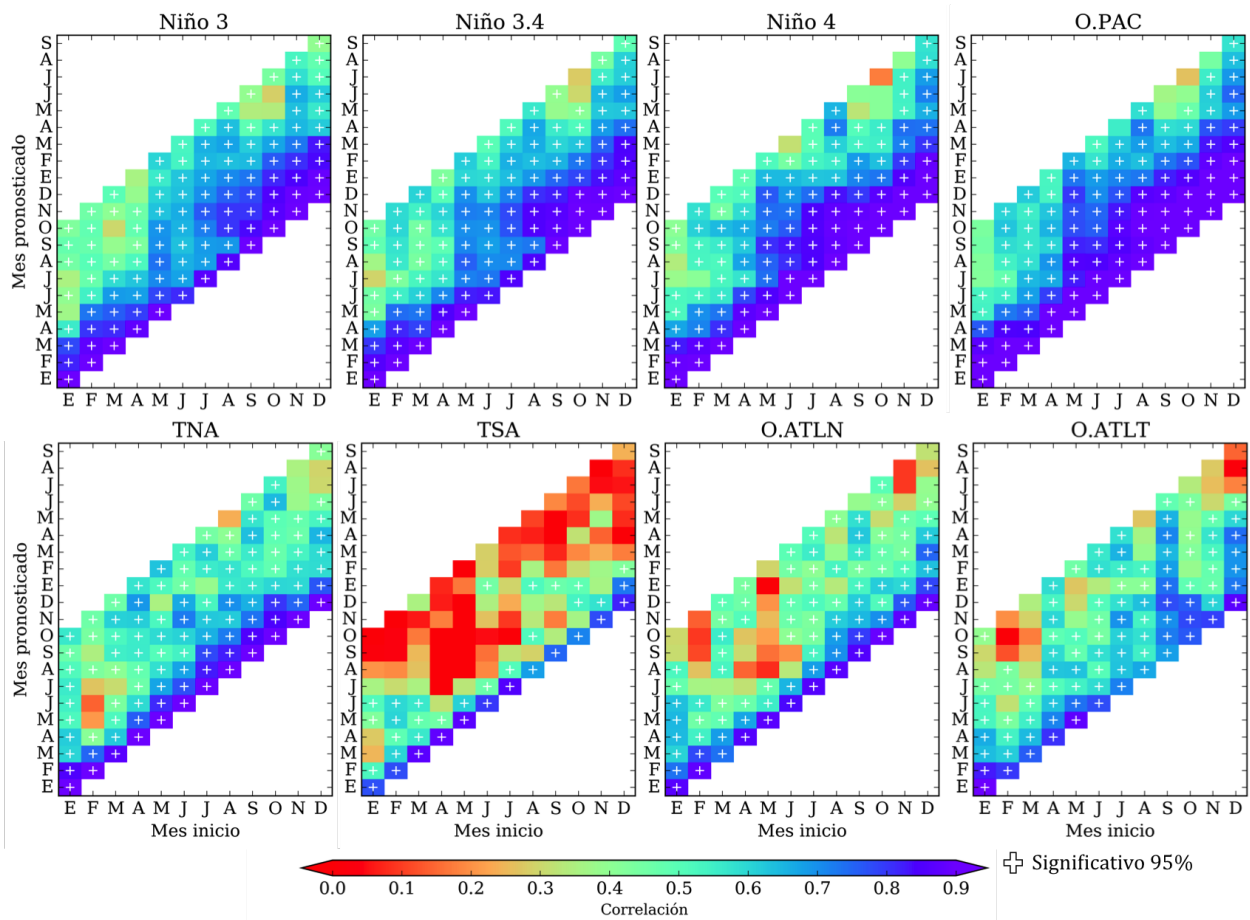


Figura 4-14: Correlación de los pronósticos de SST en diferentes regiones de los océanos Pacífico y Atlántico del CFSv2 con los datos observados en función del mes de inicio y el horizonte de pronóstico.

En la Figura 4-14 se observa que para el Océano Pacífico, se obtiene un patrón de correlacio-

nes muy similar en todas las regiones analizadas, el cual se caracteriza por un aumento de la capacidad predictiva para horizontes mayores a partir del mes de agosto-septiembre, alcanzando los valores máximos en noviembre-diciembre y con las correlaciones más bajas durante el trimestre de marzo a mayo, en el cual se obtienen los valores más altos hasta los 2 meses de horizonte, a partir del cual las correlaciones comienzan a decaer. Este comportamiento es coherente con lo encontrado por Saha (2014) para la región Niño 3.4 y puede ser explicado por el fenómeno conocido como la barrera de predictibilidad de la primavera del hemisferio sur, el cual describe la dificultad para predecir las condiciones oceánicas y atmosféricas sobre el Pacífico tropical durante el trimestre de marzo a mayo, dado el bajo grado de acoplamiento que presentan ambos componentes del sistema durante estos meses (Duan and Wei, 2013).

En el Océano Atlántico se confirma la mayor capacidad del modelo para pronosticar la SST hacia el norte del ecuador, obteniendo para la región TSA las menores correlaciones por meses, las cuales en la mayoría de los meses sólo alcanzan valores estadísticamente significativos en el horizonte de pronóstico 0 o hasta 1 o 2 meses, mientras que en las zonas al norte del ecuador hay meses con correlaciones significativas incluso en los 9 meses de horizonte. Se observa que en general se obtienen mayores correlaciones en los horizontes de pronóstico mayores durante los meses de julio a enero, sin embargo, para este océano el comportamiento no es tan evidente como para el Pacífico.

Una vez se determina la capacidad del modelo de pronosticar la temperatura superficial del mar, se busca conocer si el modelo logra simular la teleconexión observada entre la temperatura superficial del mar y la precipitación en las diferentes regiones del país. En la Figura **4-15** se presentan las correlaciones entre la precipitación integrada sobre Colombia y la temperatura superficial del mar para un rezago de 0 meses. Las correlaciones se presentan entre los pronósticos de horizonte 0 y 9 de ambas variables en el modelo, entre los datos de ambas variables del reanálisis CFSR y se comparan con las correlaciones entre los datos de temperatura superficial del mar de la NOAA (OISST) y la precipitación del TRMM, los cuales se consideran las observaciones.

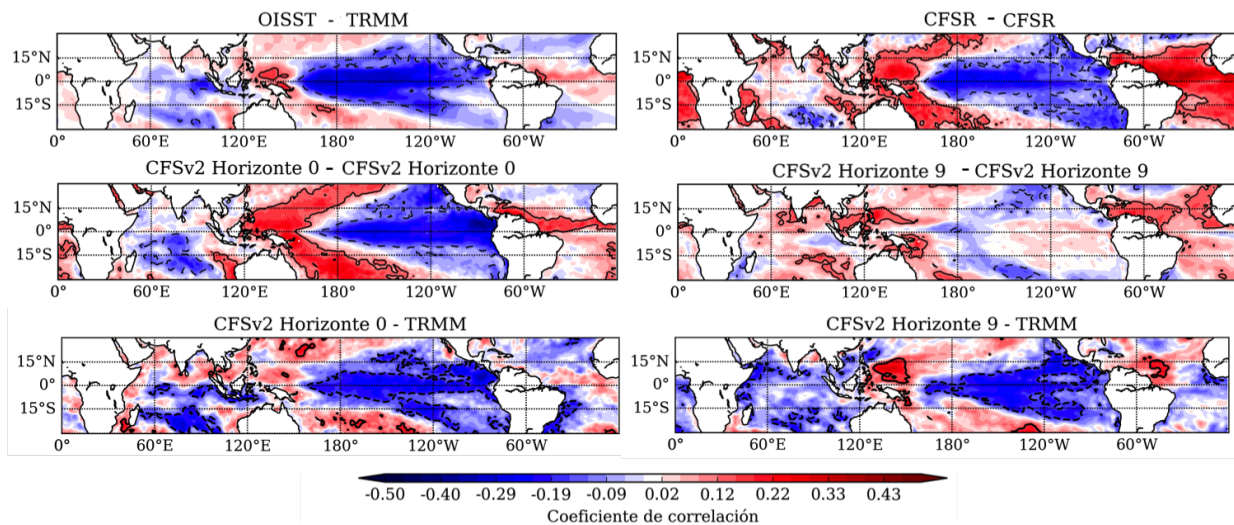


Figura 4-15: Correlación de la precipitación en Colombia con la temperatura superficial del mar con datos satelitales, datos del reanálisis CFSR y pronósticos de horizonte 0 y 9 meses del modelo CFSv2.

Se observa que en la correlación de los pronósticos de SST con los pronósticos de precipitación de horizonte 0 se logra simular aceptablemente el patrón de correlaciones negativas observadas con el Océano Pacífico Tropical, encontrándose las mayores correlaciones al este del océano y no en el centro como ocurre con los datos observados, al igual que el modelo tiende a sobrestimar las correlaciones positivas en forma de herradura sobre el oeste del Pacífico, así como sobrestima levemente las correlaciones con el Atlántico Tropical. Para los pronósticos de horizonte 9, el patrón de correlaciones se pierde completamente sobre el Océano Pacífico pero se conservan las correlaciones significativas con el Atlántico Tropical.

Si se analizan los pronósticos de temperatura del mar con la precipitación observada del TRMM sobre Colombia, se observa que el patrón en el horizonte 0 tiende a presentar más similitud con el obtenido a partir de datos satelitales, localizando las mayores correlaciones más hacia el centro del océano y con magnitudes similares hacia el oeste del Pacífico y en el Atlántico. Para este caso, en el horizonte de pronóstico de 9 meses no se pierde el patrón de correlaciones sino que sigue presentando un muy buen ajuste con las observaciones, lo que implica que mientras los pronósticos de precipitación pierden rápidamente la teleconexión con los océanos, los pronósticos de SST conservan la relación con la precipitación observada incluso en el horizonte de pronóstico máximo, por lo que en el modelo es la precipitación la que se está generando el desacoplamiento a horizontes de pronósticos mayores.

Uno de los principales problemas es que incluso el reanálisis no logra representar totalmente la relación observada entre los datos satelitales de precipitación y temperatura superficial del mar, puesto que igual como se observa con los pronósticos de horizonte 0, en el Pacífico

se presenta una sobrestimación de las correlaciones positivas con el oeste del Océano. Por otro lado, los mayores problemas del reanálisis se dan en las correlaciones con el Atlántico, la cual es sobrestimada fuertemente en esta base de datos, siendo en este océano mejor representada la relación con la precipitación en Colombia por el modelo CFS que por los datos del reanálisis CFSR.

4.2.2. Capacidad de pronóstico de precipitación e intensidad del ENSO

Diversos trabajos han encontrado que existe una relación entre la capacidad de pronóstico de modelos globales de pronóstico estacional y la fase del ENSO activa en el momento de realizar los pronósticos, asociando eventos intensos del ENSO con una leve mejora en los pronósticos climáticos sobre diferentes regiones del planeta (Jin and Kinter III, 2009; Kim et al., 2012; Tian et al., 2014; Pepler et al., 2015; Sohn et al., 2016). En la Figura 4-16 se presentan las correlaciones de las anomalías de precipitación de los pronósticos del CFSv2 con los datos del CFSR de acuerdo al año en el cual se inician los pronósticos y el valor absoluto de los valores medio del ONI durante cada uno de los años, indicando el color azul fenómenos declarados de La Niña y el rojo fenómenos de El Niño, mientras que la intensidad de los colores se asocia a la intensidad de cada uno de los fenómenos. Los años se toman desde junio de cada año a mayo del año siguiente, para que coincidan con el periodo general de desarrollo del fenómeno (NOAA, 2016b). El valor de las correlaciones para cada año corresponden al valor medio de las correlaciones de anomalías para todos los horizontes de pronóstico.

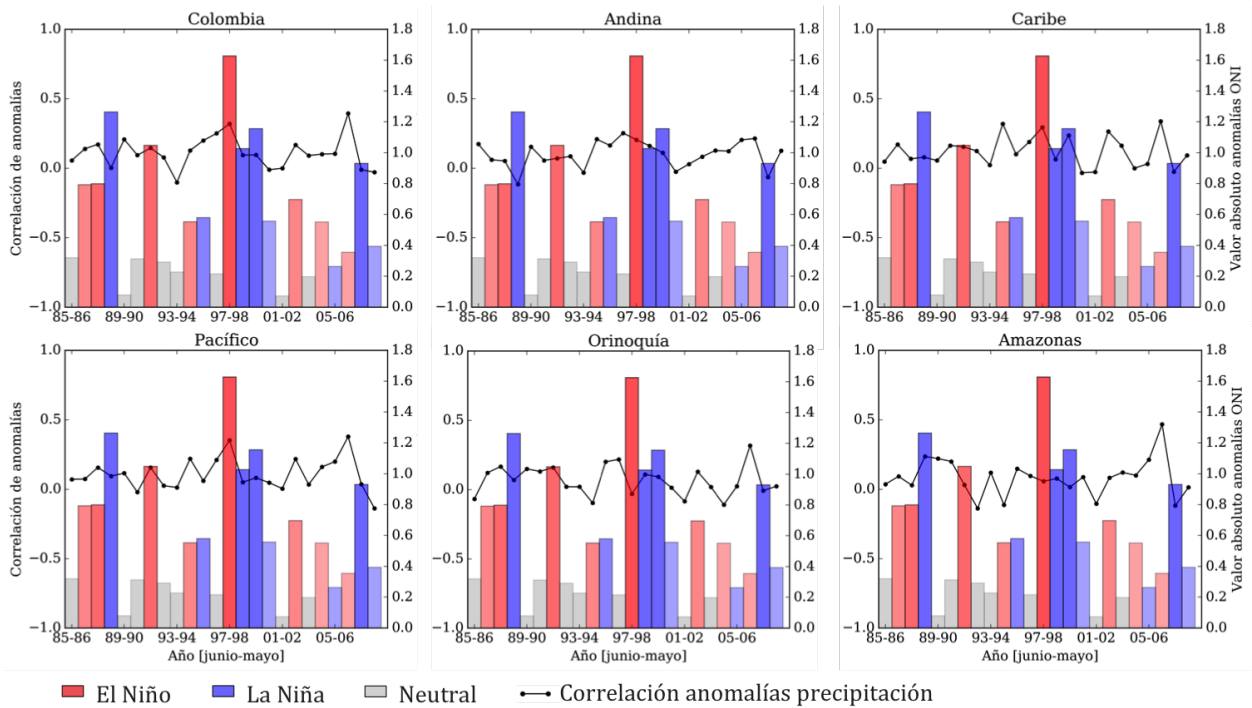


Figura 4-16: Correlación media de anomalías de los pronósticos de precipitación del CFSv2 en todos los horizontes con los datos del CFSR de acuerdo al año (junio año 0 a mayo año 1) en el cual se inician los pronósticos e intensidad del ENSO en cada año.

En la Figura 4-16 se observa un comportamiento muy variable de la capacidad de pronóstico de la precipitación de acuerdo al año (junio a mayo), que no permite obtener conclusiones robustas acerca de una posible relación con la fase e intensidad del ENSO durante cada año, a pesar de que en algunos años se observa coherencia, no es posible asegurar que realmente sea significativa dicha relación o sea efecto del azar. De igual forma, el hecho de que en cada año se correlacionen únicamente los 12 valores de cada mes no permite obtener resultados con alta significancia estadística.

En la Figura 4-17 se presentan las correlaciones de anomalías entre la precipitación pronosticada en cada horizonte y los datos del CFSR, separando los resultados de acuerdo a la fase activa del ENSO en el momento de inicio de los pronósticos. Allí es posible observar una relación un poco más clara, caracterizada por correlaciones levemente más bajas de los pronósticos iniciados durante en condiciones neutrales que aquellos que se realizan cuando se encuentra activa alguna fase del ENSO. Dicha relación es más evidente en regiones como la Caribe y Pacífico y en Colombia, cuyas anomalías de precipitación se encontró que guardan una fuerte relación con el ENSO, sin embargo, se encuentra un comportamiento similar en Orinoquía, la cual presentaba la relación más débil con el fenómeno y por el contrario con la región Andina se encuentra el comportamiento más variable, que no permite obtener

conclusiones robustas de esta región.

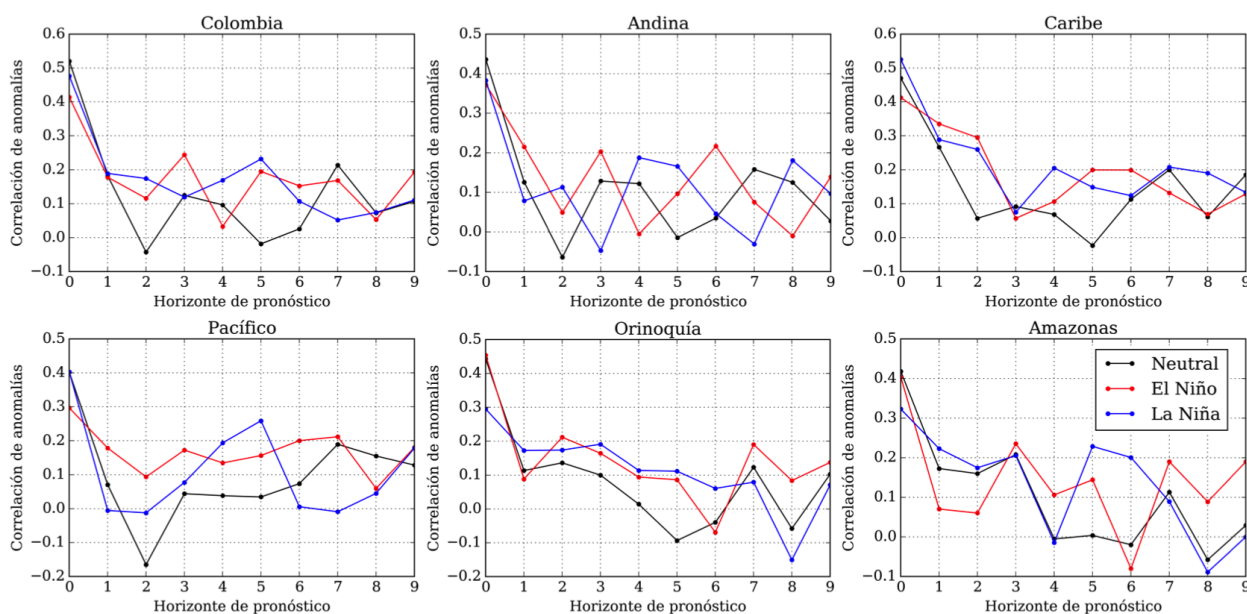


Figura 4-17: Correlación de anomalías de los pronósticos de precipitación del CFSv2 con los datos del TRMM dependiendo de la fase del ENSO presente en el momento de inicio de los pronósticos.

4.3. Variables de circulación regional

Dada la relación encontrada en el Capítulo 3 entre la precipitación en el país y patrones de circulación regional, se desea estudiar la capacidad del modelo para pronosticar este tipo de variables. En la Figura 4-18 se presentan correlaciones entre los pronósticos del CFSv2 y los datos del CFSR de diferentes índices relacionados con la circulación regional. En cuanto a las corrientes en chorro de bajo nivel, se calcula el índice del Chorro del Chocó (CHOCÓ) como las anomalías del viento zonal a 925 hPa sobre la región de $5^{\circ}S-7,5^{\circ}N$, $80^{\circ}W$ (Poveda and Mesa, 2000) y el índice del Chorro del Caribe (CLLJ) como las anomalías del viento zonal a 925 hPa sobre la zona $12,5^{\circ}N-17,5^{\circ}N$, $80^{\circ}W - 70^{\circ}W$ (Wang et al., 2007). Con respecto a los flujos de humedad, estos corresponden al flujo de humedad integrado en la vertical (VIMF) (Arias et al., 2015) promedio sobre las cuencas del Orinoco y el norte del Amazonas. Finalmente se analizan las anomalías de los vientos en las tres direcciones sobre Colombia, omega a 500 hPa y el viento horizontal (U y V) a 800 hPa.

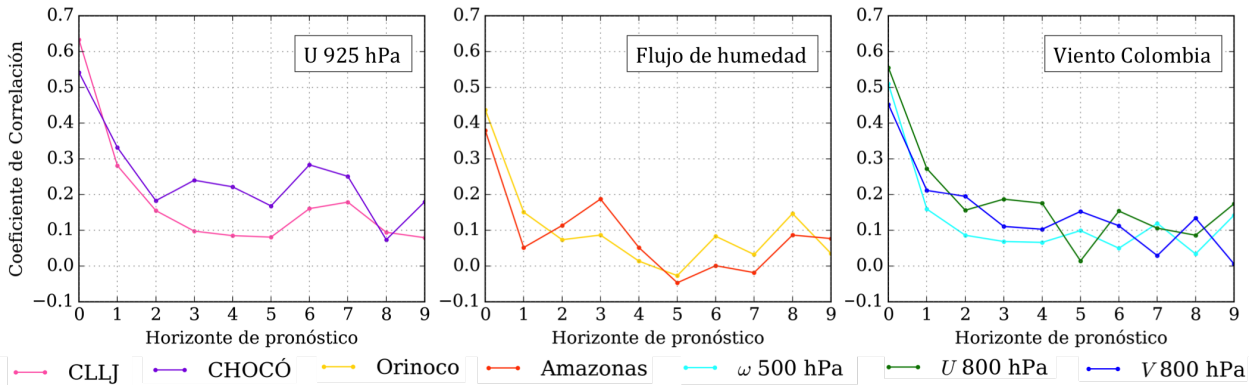


Figura 4-18: Evolución de la correlación de anomalías de los pronósticos del modelo CFSv2 con el CFSR de los índices de los chorros del caribe (CLLJ) y el Chocó, los flujos de humedad de las cuencas Orinoco y Amazonas, la velocidad del viento vertical (ω) a 500 hPa y velocidad zonal y meridional a 800 hPa sobre Colombia.

La Figura 4-18 muestra valores significativamente bajos en las correlaciones de anomalías de los pronósticos de las variables analizadas con los datos del CFSR a partir del mes 1 de horizonte, reflejando un comportamiento similar al obtenido con la precipitación, siendo los resultados de estas variables levemente mejores que los alcanzados con la precipitación en la mayoría de las regiones. Se observan resultados un poco mejores en los índices del chorro Chocó principalmente y en el del CLLJ y los vientos en las 3 direcciones sobre Colombia, que los alcanzados con los flujos de humedad proveniente de ambas cuencas, lo cual puede estar principalmente asociado a la humedad específica que hace parte de este índice y refleja los problemas que tiene el modelo para la simulación de procesos húmedos.

Los resultados de la capacidad de pronóstico de estas variables limitan su utilidad como predictores de la precipitación en Colombia dado que sus resultados son considerablemente más bajos que los obtenidos para los índices relacionados con la temperatura superficial del mar. Sin embargo, dada la relación con la lluvia, se considera que aún a pesar de las limitaciones en su predictibilidad, podrían agregar algo de información adicional a los pronósticos de precipitación, por lo que no se deben descartar totalmente.

4.4. Posibles procesos físicos asociados a la predictibilidad de la precipitación

Los resultados de los análisis presentados en las secciones anteriores muestran que el CFSv2 tiene una muy baja capacidad para predecir las anomalías de precipitación observadas en Colombia, por lo que esta sección se pretende analizar los procesos físicos que pueden estar

asociados con la baja capacidad predictiva del CFSv2 para pronosticar la precipitación. Dichos procesos normalmente ocurren a escalas menores a la mensual, por lo que el análisis de los pronósticos del modelo a esta resolución difícilmente podría permitir obtener una idea de la explicación física que justifica la rápida pérdida de la predictibilidad de la precipitación sobre la región de estudio.

En la Figura 4-19 se presenta la correlación entre los pronósticos de horizontes de 12, 24 y 72 horas de las variables de velocidad zonal y meridional del viento del GFS con los datos del FNL para los pronósticos realizados durante el mes de noviembre de 2016.

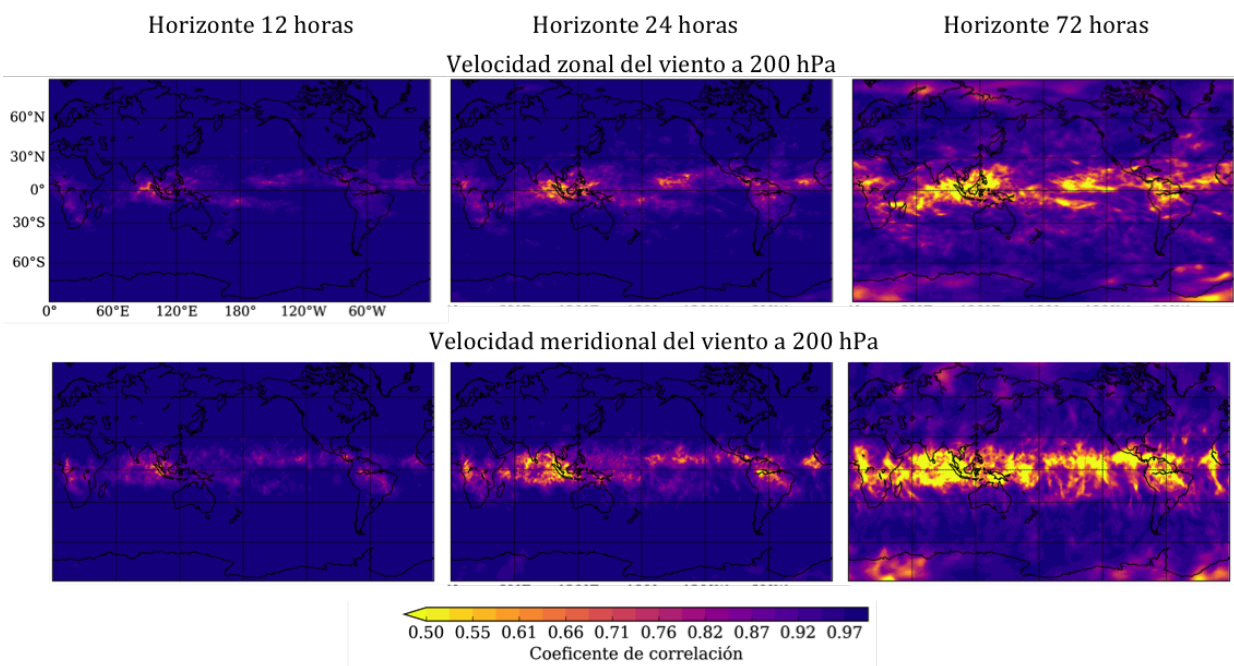


Figura 4-19: Correlación de los pronósticos de horizontes de noviembre de 2016 de 12, 24 y 72 horas de velocidad del viento zonal y meridional a 200 hPa del GFS con el FNL.

La Figura 4-19 muestra que incluso para el horizonte de 12 horas, los pronósticos de velocidad del viento horizontal del modelo comienzan a presentar correlaciones más bajas sobre la banda trópic, tendencia que se intensifica rápidamente al aumentar a horizontes de 24 y 72 horas. En una inspección inicial, las zonas de más rápida degradación de la capacidad predictiva del modelo parecen coincidir con las bandas de mayor convección, como la localización de la ZCIT. En la Figura 4-20 se comparan las gráficas de la Figura 4-19 con el acumulado de precipitación del mes de noviembre a partir de la información del TRMM, donde se evidencia que en efecto, sobre los núcleos de mayor precipitación, la capacidad predictiva de la velocidad del viento es significativamente más baja.

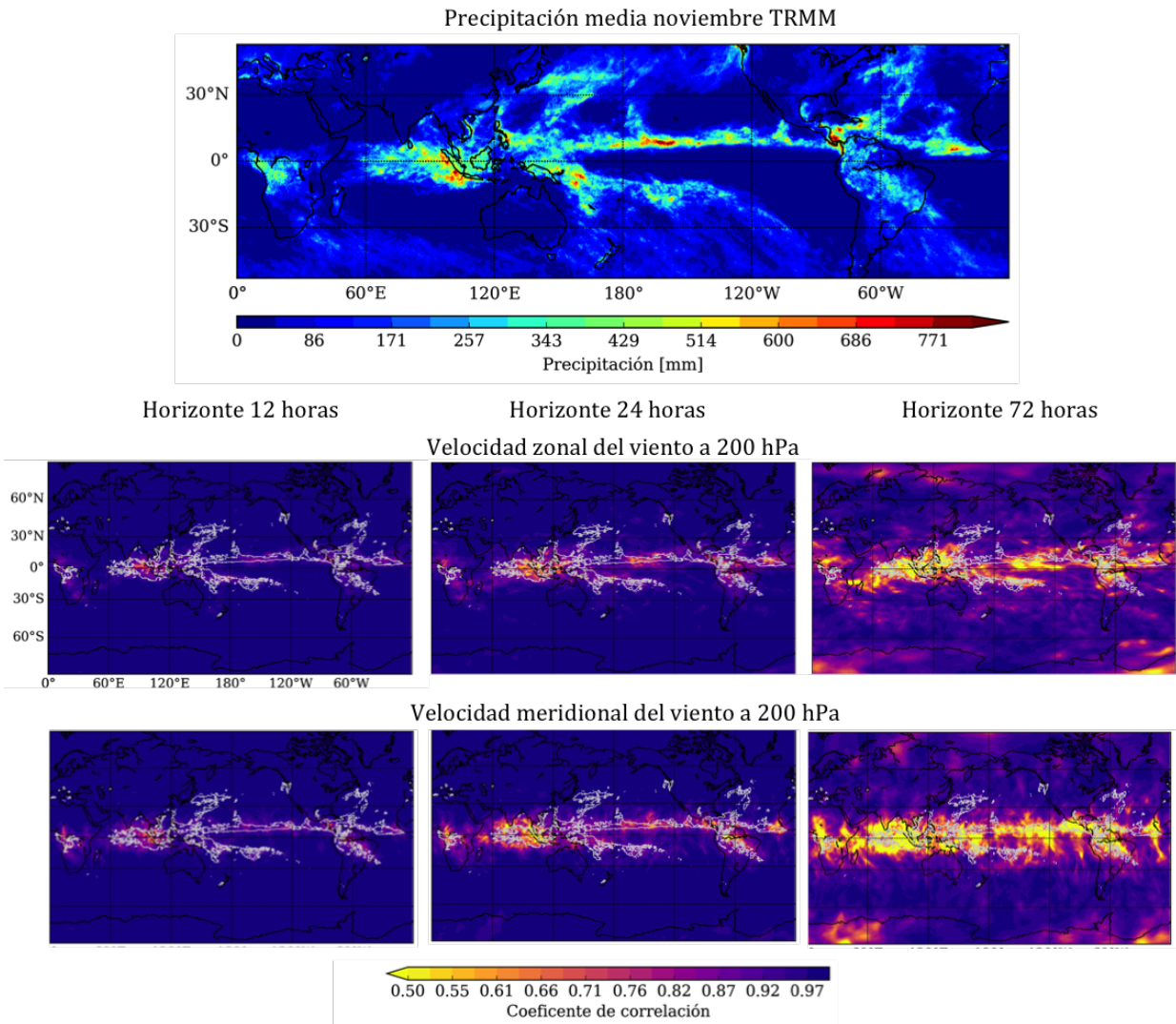


Figura 4-20: Mapa de precipitación promedio del TRMM en noviembre de 2016 y correlación de los pronósticos de horizontes de 12, 24 y 72 horas de velocidad del viento zonal y meridional a 200 hPa del GFS con el FNL.

Los resultados de la Figura 4-19 muestran como la predictibilidad a escala meteorológica sobre el trópico tiende a ser menor a la que se alcanza en los extratropicos. Este comportamiento se debe principalmente a que en el trópico, la variabilidad sinóptica es mucho más baja y las inestabilidades que se generan no son de origen baroclínico sino principalmente barotópico y convectivo (Warner, 2010; Kalnay, 2003), dificultando la predicción y afectando la precisión de las condiciones iniciales que pueden dar origen a una gran y rápida dispersión de los pronósticos debido a la alta sensibilidad del sistema climático a perturbaciones infinitesimales de las condiciones iniciales (Lorenz, 1963). De igual forma, sobre el trópico los balances que gobiernan la dinámica son diferentes y no cumplen las teorías cuasi-geostróficas

que se tienen para el flujo en los extratropicos, que facilitan el entendimiento de los movimientos a gran escala en estas zonas (Reichler and Roads, 2005).

Por otro lado, el hecho de que sobre las zonas asociadas a una mayor precipitación, se observe una capacidad predictiva menor, puede responder a que sobre las zonas más secas los campos de masa y viento presentan un comportamiento más suave que puede ser más fácil de predecir que los que se presentan sobre ambientes convectivos y zonas de convección profunda, en los cuales la liberación de calor latente es una de las fuentes dominantes de energía, el cual es un proceso que es altamente complejo de modelar por los sistemas numéricos de pronóstico (Reichler and Roads, 2005). Sumado a esto, estas zonas están igualmente sujetas a mayores errores en las estimaciones de las condiciones iniciales, debido a la constante alteración y distorsión de los campos de viento y masa (Warner, 2010).

A escala estacional, generalmente no se habla de problemas en las condiciones iniciales, sino que se tienen más en cuenta las condiciones de borde y el forzamiento generado por la temperatura superficial del mar (Reichler and Roads, 2005). Sin embargo, los pronósticos de valores medios a escalas mensuales son finalmente resultados de diferentes eventos que ocurren a escalas temporales más cortas, por lo que por ejemplo una anomalía mensual de precipitación podría estar asociada a la suma de diferentes eventos más intensos, con mayores acumulados de precipitación de lo normal, o a un aumento en la frecuencia de los eventos de lluvia durante ese mes, los cuales si no son pronosticados adecuadamente, van a afectar el desempeño de los modelos de pronóstico a escala mensual que heredan dichos problemas (Kalnay, 2003), reflejando de esta forma la dependencia directa de la predictibilidad en diferentes escalas temporales.

Además de los errores en las condiciones iniciales, se tienen errores en el modelo, las cuales son el resultado de parametrizaciones que no logran representar con buena precisión procesos físicos de los cuales no se conocen o no es posible resolver las ecuaciones que los gobiernan. Los procesos húmedos, son los más parametrizados dentro del modelo, lo que aumenta considerablemente su incertidumbre y predictibilidad (Kalnay, 2003). Adicionalmente, los procesos asociados a la convección en el trópico son altamente variables y complejos, lo cual genera incertidumbre también en sus observaciones y en el comportamiento esperado.

A escala estacional, se cuentan con otras fuentes de predictibilidad, como la temperatura superficial del mar y el fenómeno ENSO, que representan los principales forzadores de la variabilidad climática a estas escalas, especialmente sobre el trópico, aumentando la predictibilidad a escalas mensuales sobre esta zona. Esta fuente de predictibilidad, asociada a las variaciones más lentas de las condiciones de borde, se conoce normalmente con el nombre de "predictibilidad de segundo orden", mientras que la anteriormente descrita asociada a las condiciones iniciales se conoce como "predictibilidad de primer orden" (Kalnay, 2003). Sin

embargo, tal como se encontró en los análisis presentados en las secciones anteriores, esta predictibilidad proveniente del ENSO, a pesar de que se refleja en los pronósticos de temperatura superficial del mar, no logra extender la capacidad de pronóstico de la precipitación en el modelo, incluso en regiones altamente asociadas con la ocurrencia de este fenómeno. Lo anterior, refleja que en el caso de la precipitación e incluso otras variables atmosféricas, los problemas heredados de las condiciones iniciales y los que se tienen por las parametrizaciones del modelo logran superar la predictibilidad potencial que puede proveer el ENSO.

Es importante aclarar que dado que se analizan únicamente los datos del GFS para un mes, los resultados obtenidos no pretenden proporcionar conclusiones robustas acerca de la predictibilidad meteorológica, simplemente brindar algunas posibles explicaciones físicas a la baja predictibilidad de la precipitación encontrada en los análisis presentados en este capítulo. De igual forma, los datos del FNL utilizados como base de comparación para los pronósticos, provienen igualmente de resultados del mismo modelo con mayor asimilación de datos, los cuáles son más escasos en la banda tropical y sobre el océano y limitan de igual forma las conclusiones que se puedan obtener a partir de los resultados presentados. Sin embargo, el análisis es útil para el planteamiento de posibles hipótesis que podrán ser verificadas a partir de estudios más enfocados en este tema.