



Universidad de la República

Facultad de Ingeniería

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental



Cuantificación de los efectos del cambio climático sobre el régimen medio y extremal del nivel de mar en la costa uruguaya

Tesis de Maestría en Ingeniería en Mecánica de los Fluidos Aplicada

Enero 2021

Michelle Jackson

Tutora: Dr. Ing. Mónica Fossati

Co-tutor: Dr. Ing. Sebastián Solari

RESUMEN

El cambio climático es un foco de estudio importante en la actualidad debido a las consecuencias ambientales, sociales, económicas y demás que el mismo está generando. Una de las importantes consecuencias es el cambio generado en la dinámica de aguas tanto oceánicas como continentales, y en particular, el aumento del nivel del mar. El objetivo principal de este trabajo de tesis es cuantificar los cambios en el nivel de mar a lo largo de la costa uruguaya, analizando también el origen de estos cambios. Con el fin de lograr dicho objetivo se hace uso de las proyecciones de vientos y presiones de los modelos climáticos globales correspondientes a la fase 5 del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP5, Coupled Model Intercomparison Project Phase 5).

A lo largo de la costa uruguaya las componentes meteorológicas y astronómicas tienen relevancia equivalente sobre el nivel de mar total, por lo cual para analizar los cambios en el mismo es necesario considerar posibles cambios en los forzantes atmosféricos. Por otra parte, las características del estuario del Río de la Plata, como sus grandes dimensiones y bajas profundidades, hacen que las interacciones no lineales que puedan surgir entre el aumento del nivel medio del mar y la marea astronómica y meteorológica pueden ser importantes. Debido a lo anterior, para lograr el objetivo se adopta un esquema de downscaling dinámico mediante modelos anidados, denominados en el trabajo de tesis modelo regional y modelo local, teniendo como punto de partida dos modelos hidrodinámicos de nivel de mar previamente implementados en el IMFIA ((Martínez et al. 2015; IMFIA, 2018a)). El modelo regional es la implementación en su versión 2D del modelo numérico MOHID a un dominio que comprende al Océano Atlántico Sur y es forzado por ondas de marea astronómica en bordes oceánicos, caudal medio de los ríos Paraná y Uruguay y por vientos y presiones en la superficie libre. El modelo local es la implementación en su versión 2D del modelo TELEMAC a un dominio que abarca el Río de la Plata y su Frente Marítimo y es forzado por vientos y presiones en la superficie libre, caudales medios de los ríos Paraná, Uruguay y Santa Lucía y la condición de borde del modelo regional en las fronteras abiertas.

Previo a forzar los modelos hidrodinámicos se evalúan 7 modelos atmosféricos basándose en la metodología desarrollada por Pérez et al. (2014): ACCESS1.0, CMCC-CM, CNRM-CM5, MIROC5, IPSL-CM5A-MR y HadGEM2-ES. La evaluación se basa en la clasificación de campos de presión de reanálisis (NCEP-CFSR) en 100 tipos de tiempo, también denominados como campos sinópticos de presión, calculando su probabilidad de ocurrencia a lo largo del período comprendido entre 1985-2005. Luego se comparan las probabilidades de ocurrencia de los tipos de tiempo para el reanálisis y para cada uno de los modelos atmosféricos globales. La evaluación indicó que el modelo MIROC5 es el que mejor representa las situaciones sinópticas de presión más probables y menos probables al igual que la variabilidad interanual de las probabilidades de ocurrencia.

Las simulaciones de nivel de mar se realizaron para tres horizontes temporales: histórico (1985-2005), corto plazo (2027-2045) y largo plazo (2082-2100); y para dos escenarios: RCP 4.5 y RCP 8.5. Al comparar los resultados del modelo local durante el período histórico forzado con vientos y presiones de los modelos atmosféricos globales con las del modelo local forzado con vientos de reanálisis se concluyó que la metodología de evaluación era acertada, obteniéndose que los

modelos que mejor representan la climatología de niveles en el dominio de estudio son MIROC5 y CMCC-CM.

Las simulaciones de los bloques futuros se realizaron imponiendo en ambos modelos el aumento del nivel medio del mar correspondiente a cada año. Al analizar el cambio en la media del nivel de mar total a lo largo de la costa se observó que el cambio es básicamente constante a lo largo de la misma y está principalmente dominado por el aumento en el nivel medio del mar. Por otra parte al analizar el cambio a lo largo de la costa en el cuantil 99% a largo plazo el mismo presentó un máximo en la zona interior del estuario y alrededor de Montevideo. Analizando el cambio en el cuantil 99% de la componente meteorológica se determinó que el cambio es muy pequeño a lo largo de la costa y no contribuye a la distribución espacial observada en el cambio del nivel de mar total. Por otra parte, los cambios en las amplitudes de las componentes M2 y O1 de la marea astronómica a lo largo de la costa muestran una distribución no constante a lo largo de la misma que además es muy similar para cualquiera de los forzantes atmosféricos, concluyéndose que solo dependen del escenario RCP y el horizonte temporal.

Del trabajo realizado se concluye que la principal componente del cambio en el nivel de mar es el aumento del nivel medio del mar, siguiéndole el efecto que este aumento tiene sobre la marea astronómica. Lo anterior indica que la metodología de downscaling dinámico aplicada es la correcta y necesaria para poder determinar el cambio en el nivel de mar debido a que las interacciones entre la marea astronómica y el nivel medio del mar cobran especial relevancia en la zona de estudio. El cambio en la media de nivel de mar total a largo plazo y para el escenario más severo RCP 8.5 es de 61 cm, mientras que el aumento en el cuantil 99% a largo plazo para el escenario más severo RCP 8.5 alcanza los 74 cm en la zona costera desde Colonia hacia el interior del estuario y los 71 cm en la zona costera de Montevideo.

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores de tesis, Mónica Fossati y Sebastián Solari por guiarme y seguirme de cerca durante el tiempo necesario para la realización de este trabajo, ambos siempre con una disposición sumamente destacable. A Mónica también por apoyarme tanto en lo técnico como en lo personal desde que entre en el camino de la investigación.

A la Agencia Nacional de Investigación e Innovación por haberme otorgado una beca de posgrado y una beca de pasantía en el exterior que me permitió hacer cursos para esta maestría en la Universidad de Cantabria.

A la Comisión Académica de Posgrado por otorgarme una beca de finalización de posgrado.

Al IH-Cantabria por haberme brindado un espacio en su instituto durante un tiempo donde pude intercambiar de cerca con investigadores que me ayudaron en la realización de una parte de este trabajo de tesis y por el material técnico brindado, en particular a Melisa Menéndez y Paula Camus.

A Pablo Santoro por su infinita disposición y paciencia cada vez que necesité su ayuda u opinión durante este trabajo de tesis.

A todos mis compañeros y amigos del IMFIA, con quienes comparto el día a día y me han ayudado tanto en aspectos técnicos como personales en este camino. En especial a Santi, con quien comparto este camino académico hace ya varios años y fue siempre un gran apoyo.

Y por último y no menos importante, a mi familia: Mamá, Papá, Eli y la abuela Gloria. Por el apoyo incondicional siempre y en todo.

Muchas gracias!!

ÍNDICE

1	Introducción	7
2	Objetivo y Metodología general.....	9
3	El cambio climático: herramientas para su investigación y antecedentes	11
3.1	El CMIP5	11
3.1.1	Experimentos del CMIP5	12
3.1.2	Acceso a los resultados	13
3.2	Escenarios RCP	13
3.3	Antecedentes de estudios de CC relacionados a oleaje y nivel de mar	14
3.3.1	Aumento del nivel medio del mar.....	14
3.3.2	Estudios globales y regionales.....	16
3.3.3	Escala nacional	18
4	Modelos Atmosféricos Globales	21
4.1	Información disponible	21
4.2	Metodología de evaluación de los modelos atmosféricos globales	22
4.2.1	Clasificación de los tipos de tiempo	24
4.2.2	Evaluación de los modelos atmosféricos globales	29
4.3	Resultados	31
4.3.1	Resultados de la clasificación	31
4.3.2	Resultados de la evaluación de los modelos atmosféricos globales.....	36
4.4	Síntesis.....	39
5	Modelos hidrodinámicos.....	41
5.1	Ecuaciones gobernantes de los modelos hidrodinámicos	41
5.2	Condiciones de borde.....	42
5.3	Modelo regional	43
5.3.1	Dominio y batimetría	43
5.3.2	Condiciones de borde.....	44
5.3.3	Características de la configuración utilizada	45
5.3.4	Evaluación de la calidad del modelo para el período histórico.....	46
5.4	Modelo local.....	50
5.4.1	Dominio y batimetría	51
5.4.2	Condiciones de borde.....	52
5.4.3	Características de la configuración utilizada	52
5.4.4	Evaluación de la calidad del modelo para el período histórico.....	53

5.5	Proyecciones de aumento de nivel medio del mar regional (NMMR).....	56
5.6	Metodología de modelación	62
5.7	Síntesis.....	63
6	Resultados obtenidos y análisis	65
6.1	Modelo regional: período histórico	65
6.2	Modelo local: período histórico	76
6.3	Modelo local: períodos futuros.....	98
6.3.1	Significancia de los resultados obtenidos	99
6.3.2	Cambios en el <i>NMT</i>	100
6.3.3	Cambios en el <i>NMSR</i>	107
6.3.4	Cambios en la componente meteorológica	124
6.3.5	Cambios en la componente astronómica.....	126
6.4	Discusión	129
7	Conclusiones.....	133
8	Referencias bibliográficas	137

1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un foco de estudio importante en la actualidad debido a las consecuencias ambientales, sociales, económicas y demás que el mismo está generando. Una de las importantes consecuencias es el cambio generado en la dinámica de aguas tanto oceánicas como continentales. En particular, la gestión costera en todo el mundo se encuentra condicionada por los agentes marítimos, oleaje y nivel de mar, y conocer y poder cuantificar como estos se van a encontrar afectados es un tema que hace años la comunidad científica está abarcando e investigando. Este trabajo se enfoca en cuantificar los cambios generados en uno de los agentes marítimos afectados, el nivel de mar, en la costa uruguaya.

Una de las herramientas más utilizadas hoy en día para evaluar los cambios en los agentes marítimos debido al cambio climático son los modelos atmosféricos globales, desarrollados hace años por varias instituciones de investigación climática, cuya fase 5 es utilizada en este trabajo (CMIP5, Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) y presentados en el reporte número 5 del IPCC (IPCC, 2013). Estos modelos simulan para períodos históricos y bloques temporales futuros bajo diferentes escenarios de rutas representativas de concentración (Representative concentration pathways, RCP) el comportamiento de la atmosfera, en particular vientos y presiones a nivel de mar y a otras alturas de la atmósfera (Taylor et al. 2012). Para analizar efectos del cambio climático en los agentes marítimos a escala local o regional partiendo de los modelos globales, es necesario aplicar algún método de reducción de escala (Vousdouskas et al. 2017, Camus et al. 2017).

La costa uruguaya se extiende a lo largo de 600 km y abarca tanto al estuario del Río de la Plata como al Océano Atlántico y a lo largo de la misma las componentes meteorológicas y astronómicas de la marea tienen el mismo orden de magnitud, siendo ambas componentes importantes en el nivel de mar total a lo largo de la costa. Por otra parte, los cambios en los patrones regionales de viento y presiones sobre la superficie libre y en el nivel medio del mar debido al cambio climático pueden afectar al nivel de mar en la costa. Debido a las características del estuario, como sus grandes dimensiones y bajas profundidades, las interacciones no lineales que pueden surgir entre el aumento del nivel medio del mar y la marea meteorológica y astronómica no deberían ser despreciadas. Es por esto que en este trabajo de tesis se adopta un esquema de downscaling dinámico (reducción de escala) mediante modelos anidados, teniendo como punto de partida dos modelos hidrodinámicos previamente implementados, calibrados y validados por el grupo de trabajo del IMFIA (Martínez et al. 2015, IMFIA, 2018a). Ambos modelos se emplean en dos dimensiones, y trabajan resolviendo las ecuaciones fundamentales que rigen la mecánica de los fluidos a lo largo del tiempo (cantidad de movimiento y conservación de masa) en un dominio discretizado.

Para cuantificar los efectos del cambio climático en el nivel de mar los modelos hidrodinámicos son forzados con vientos y presiones provenientes de 7 modelos atmosféricos globales del CMIP5 durante 3 horizontes temporales; período histórico (1986-2005), corto plazo (2027-2045) y largo plazo (2082-2100); y dos escenarios futuros RCP 4.5 y RCP 8.5, introduciendo como condición de borde e inicial a cada año futuro el aumento en el nivel medio del mar correspondiente. Mientras que el RCP 4.5 representa un escenario moderado con concentraciones de gases de efecto invernadero que se estabilizan luego del 2100, el RCP 8.5 es

el escenario más pesimista donde además de ser altas, las concentraciones de gases de efecto invernadero no se estabilizan.

El presente documento se separa en 7 capítulos, incluyendo el presente capítulo de introducción. El capítulo 2 describe el objetivo y la metodología general adoptada para lograr dicho objetivo. El capítulo 3 presenta las herramientas utilizadas en este trabajo para llevar a cabo un estudio enfocado en el cambio climático y resume algunos antecedentes de estudios de cambio climático relacionados a oleaje y nivel de mar, enfocándose en las metodologías utilizadas por algunos centros de investigación y las formas de evaluar la utilización de los modelos atmosféricos globales del CMIP5. El capítulo 4 presenta los modelos atmosféricos globales pertenecientes al CMIP5 utilizados en este trabajo de tesis, y la evaluación realizada a los mismos para analizar su comportamiento en el Atlántico Sur. El capítulo 5 presenta los modelos hidrodinámicos utilizados en este trabajo de tesis, mostrando las configuraciones de partida de ambos modelos y la calidad de los mismos en el dominio de aplicación mediante la comparación de datos medidos con sus resultados. El capítulo 6 presenta los resultados de los modelos hidrodinámicos forzados con los vientos y presiones del CMIP5 evaluados en el capítulo 4. En este capítulo se realiza un control de los resultados de los modelos hidrodinámicos al ser forzados con los modelos atmosféricos globales. Luego se analizan los resultados de las proyecciones de nivel de mar obtenidas de forzar los modelos con proyecciones de vientos y presiones de los modelos atmosféricos globales. Finalmente, el capítulo 7 presenta las conclusiones de este trabajo de tesis.

2 OBJETIVO Y METODOLOGÍA GENERAL

El objetivo de este trabajo de tesis es cuantificar los efectos esperables del cambio climático sobre el régimen medio y el extremal del nivel de mar en la costa uruguaya. Para alcanzar dicho objetivo se hace uso de las proyecciones de vientos y presiones de los modelos atmosféricos globales del CMIP5 (Coupled Intercomparison Project Phase 5) presentados en el quinto reporte del IPCC (IPCC, 2013).

Para obtener los resultados de las proyecciones de nivel de mar a la escala deseada existen dos metodologías, el downscaling estadístico y el downscaling dinámico (también denominados como reducción de escala estadística o dinámica). La primera relaciona de forma empírica variables de circulación atmosférica a gran escala con variables locales o regionales de interés, de forma que se obtienen distribuciones estadísticas de las variables de interés como resultado. Por otra parte, el downscaling dinámico consiste en la aplicación de modelos matemáticos anidados, que resuelven las ecuaciones fundamentales de la mecánica de los fluidos a lo largo del tiempo, obteniéndose de esta forma como resultado una serie temporal de las variables deseadas.

En este trabajo se determina adoptar una metodología de downscaling dinámico generado a través de un sistema de modelos hidrodinámicos anidados, previamente calibrados y validados en el IMFIA (IMFIA, 2018a), forzados por caudales afluentes, vientos y presiones en superficie y ondas de marea en sus fronteras abiertas. Con el fin de determinar el clima de nivel de mar futuro los modelos se fuerzan con proyecciones de vientos y presiones obtenidos del CMIP5. Los resultados se obtienen para tres bloques temporales; histórico, corto plazo (2027-2045) y largo plazo (2082-2100); y dos escenarios de rutas representativas de concentración: RCP 4.5 y RCP 8.5.

La metodología general puede separarse en dos grandes partes principales: evaluación de los modelos atmosféricos globales en el Océano Atlántico Sur y downscaling dinámico de nivel de mar en la costa uruguaya.

La necesidad de una evaluación de los modelos atmosféricos globales (también denominados GCM) surge debido a los antecedentes insuficientes respecto al comportamiento de los modelos correspondientes al CMIP5 en el dominio de interés. La metodología general para la evaluación se basa en una clasificación de lo que se denomina tipos de tiempo. A partir de campos de presión de reanálisis (considerándolos como los más cercanos a los datos medidos) se realiza una clasificación de patrones sinópticos de presión en un dominio determinado. Luego la capacidad de los modelos se evalúa analizando cómo estos reproducen las probabilidades de ocurrencia de dichos patrones sinópticos. Se calculan determinados estadísticos a partir de las probabilidades de ocurrencia de los patrones obtenidas para el reanálisis y para cada modelo atmosférico evaluado.

Respecto al downscaling dinámico, la metodología general consiste en forzar los modelos previamente calibrados y validados en el IMFIA con vientos y presiones obtenidos de los modelos atmosféricos globales previamente evaluados, durante tres bloques temporales: histórico, corto plazo y largo plazo. Es importante en esta instancia hacer énfasis en la diferencia entre lo que es el nivel medio del mar y el resto de las componentes que integran el nivel de mar

total. El primero es de escala espacial global o regional y su cambio a lo largo del tiempo viene dado por fenómenos como el derretimiento de hielos, dinámicas oceánicas de gran escala, etc. El resto de las componentes del nivel de mar total son de escalas espaciales menores y tienen origen en el forzante atmosférico y el astronómico, también denominadas como componente meteorológica y componente astronómica. La determinación del aumento del nivel medio del mar escapa del alcance de este trabajo de tesis, sin embargo, sí se busca determinar el cambio en las dinámicas de las ondas de marea producto del cambio en el nivel medio del mar. Afortunadamente, existen varios estudios donde determinan este aumento a escala regional en un dominio global (IPCC, 2013) cuyos resultados son de libre acceso, lo cual hace posible incluirlo en las modelaciones hidrodinámicas empleadas en este trabajo. De esta forma, para los bloques temporales futuros se impone como condición inicial y de borde en los modelos el aumento de nivel de mar regional correspondiente a cada año simulado. A pesar de que también se cuenta con los intervalos de confianza de las proyecciones de cambio del nivel medio del mar, debido a que solo se simula un caso para cada escenario RCP y modelo GCM, se determina imponer los valores medios proyectados.

Para evaluar si los modelos hidrodinámicos representan correctamente las climatologías de nivel en el dominio de estudio al ser forzados con los modelos atmosféricos globales se utiliza el bloque histórico simulado, utilizando como referencia los resultados de los modelos hidrodinámicos forzados con vientos de reanálisis del CFSR. La evaluación se hace mediante la comparación de cuantiles en diversas estaciones del dominio y de campos espaciales de nivel asociados a cuantiles altos y bajos. El análisis de las proyecciones se realiza separando las componentes del nivel de mar en diferentes escalas espaciales y temporales: nivel de mar total, nivel de mar sin el aumento de nivel medio regional impuesto, marea meteorológica y marea astronómica. En esta instancia se comparan campos de nivel asociados a cuantiles para analizar posibles patrones espaciales de cambio en un dominio que abarca la costa uruguaya y también se analiza el cambio en nodos distribuidos a lo largo de la costa de forma de analizar posibles patrones de distribución de cambio a lo largo de la misma.

3 EL CAMBIO CLIMÁTICO: HERRAMIENTAS PARA SU INVESTIGACIÓN Y ANTECEDENTES

El cambio climático es hoy en día un tópico abarcado por muchas comunidades científicas especializados en diferentes áreas que conforman el ciclo climático, debido a las importantes consecuencias que está generando, entre ellas el aumento del nivel del mar. En el marco de la gran cantidad de estudios existentes al respecto y el afán de las diferentes comunidades científicas de explorar los efectos del cambio climático en su área de especialización, es que se desarrollan los Reportes del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés). El mismo podría considerarse una herramienta de asesoramiento para todo lo que abarca la ciencia relacionada al cambio climático. En particular, plantea políticas generadas a partir de estudios científicos relacionados al mismo, en ciertos aspectos estandarizados, que abarcan los riesgos potenciales que este puede generar, así como opciones de mitigación y adaptación.

A grandes rasgos el IPCC pone a disposición en sus reportes el estado del arte en lo que respecta al conocimiento científico, técnico y socio-económico del cambio climático, sus impactos, riesgos futuros y opciones para reducir la tasa a la cual el mismo está afectando los diferentes ámbitos. Esta información se publica en conjunto en lo que se denominan reportes de evaluación (Assesment Reports, AR) aunque entre la publicación de cada uno de estos reportes de evaluación, el IPCC también publica reportes especiales enfocados en tópicos entendidos como relevantes por los miembros del panel, como puede ser el último reporte de El Océano y la Criósfera en un Clima Cambiante (SROCC), publicado en Setiembre de 2019 (IPCC, 2019).

En particular, los reportes de evaluación se encargan de identificar el consenso entre los diferentes tópicos abarcados por la comunidad científica, y en qué aspectos es necesario profundizar la investigación. Además, los reportes son revisados en varias etapas, proceso que abarca varios años, lo que garantiza transparencia y objetividad.

Actualmente, el último reporte de evaluación disponible es el quinto reporte, publicado en el año 2013 (IPCC AR5, 2013) y se planea publicar el sexto reporte en el año 2022. Este trabajo de tesis utiliza principalmente los avances publicados en el IPCC AR5 en lo que respecta a los escenarios futuros de emisión de gases de efecto invernadero, las proyecciones climáticas correspondientes al CMIP5 y proyecciones de nivel medio del mar.

3.1 El CMIP5

En la actualidad los modelos climáticos son la principal herramienta disponible para investigar la respuesta al cambio climático de diversas variables que forman parte del sistema climático. En este estudio se utilizan modelos climáticos generados en el marco de la Fase 5 del Proyecto de inter-comparación de modelos acoplados (CMIP5 por sus siglas en inglés) (Taylor et al, 2012) del WRCP (World Climate Research Programme), los cuales se presentan en el quinto reporte del IPCC. El CMIP comenzó en 1995, auspiciado por el WGCM (World Group on Coupled Modelling) y el primer intercambio en referencia a la fase 5 del proyecto se realizó en el año 2008 y participaron, además del WGCM, 20 grupos de modelación climática, el IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme's) y el proyecto AIMES (Anaysis, Integration and Modeling of the Earth System).

El proyecto se basa en la coordinación de diferentes experimentos de modelación desarrollados en todo el mundo. Lo anterior implica fijar condiciones para los forzantes, variables modeladas, variables de salida, entre otros y además que toda la información se encuentre disponible y centralizada para su utilización. En particular, desde su creación la idea fue promover un acceso libre al estado del arte de los resultados de diferentes modelaciones climáticas, resaltando la importancia de comparar y analizar los resultados, de forma de entregar información de buena calidad y así permitir el avance en la investigación de la variabilidad y el cambio climático.

Las actividades del CMIP son llevadas a cabo por el WGCM, que representa a los grupos modeladores y tiene como objetivo el de controlar el desarrollo y la revisión de los modelos acoplados. Como parte del proceso, este grupo recibió importante información de entrada de parte de usuarios potenciales de los resultados de las modelaciones, algunos de ellos no integrantes específicamente de la comunidad de investigación climática. Los experimentos comprendidos en el CMIP5 fueron propuestos, discutidos y priorizados por modeladores climáticos en conjunto con otros científicos enfocados en el estudio climático al igual que con gente de la comunidad de estudios biogeoquímicos (Taylor et al, 2012).

Debido a los recursos limitados, las modelaciones no logran satisfacer completamente a todos los grupos interesados, aunque el CMIP lleva a cabo talleres de trabajo y reuniones de forma que distintas comunidades de investigación de diversas áreas puedan expresar sus intereses y en lo posible incluirlo en los experimentos. El proyecto comprende simulaciones de más de 50 modelos climáticos desarrollados por más de 20 grupos modeladores de todo el mundo, y es importante notar que dichas modelaciones no buscan ser exclusivas ni exhaustivas, existiendo grupos que desarrollan nuevos experimentos en base a los del CMIP5, o los extienden, por fuera del proyecto (Taylor et al, 2012).

3.1.1 Experimentos del CMIP5

La estrategia del CMIP5 incluye dos tipos de experimentos de modelación de cambio climático: el de largo plazo que implica escalas de centenares de años y el de corto plazo que implica escalas de 10 a 30 años. Ambos tipos de experimentos se pueden realizar usando Modelos globales Atmosfera-Océano (AOGCMs). Estos responden a concentraciones específicas de varios constituyentes atmosféricos que varían con el tiempo como por ejemplo los gases de efecto invernadero, e incluyen una representación interactiva de la atmosfera, el océano, la tierra y los hielos oceánicos. Para el caso de largo plazo algunos de los AOGCMs están acoplados con componentes biogeoquímicos que toman en cuenta el flujo de carbón entre el océano, la atmosfera y los reservorios de carbono de la biosfera terrestre, cerrando de esta forma el ciclo del carbón en el modelo. Estos últimos se denominan Earth System Models (ESMs). Dentro de lo que es el proyecto, los grupos modeladores pueden elegir modelar a corto o largo plazo, con AOGCMs o con ESMs o hacer varias combinaciones de ambos (Taylor et al, 2012).

Las simulaciones caracterizan numerosas variables climáticas de interés como son presión, vientos y temperatura entre otras, en superficie y en otros niveles de la atmósfera. Es muy importante resaltar que los modelos simulan la evolución del sistema y todas las simulaciones resultan en realizaciones diferentes igual de probables y similares desde un punto de vista climático. Debido a lo anterior los resultados no son comparables instante a instante, pero si en términos de la climatología de las diferentes variables simuladas. Las proyecciones de cambio

climático de los modelos correspondientes al CMIP5 consideran los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero consistentes con los RCPs descritos en la sección siguiente (Moss et al 2010).

De forma de evitar que las señales de cambio más relevantes de las variables se vean afectadas por variabilidad no forzada (comúnmente denominada como ruido), inevitables en cualquier simulación climática, el proyecto introduce lo que se denomina ensambles. Los miembros de un mismo ensamble son el mismo experimento simulado con condiciones idénticas, pero que difieren en sus condiciones iniciales. De esta forma, las diferentes condiciones iniciales de cada miembro del ensamble de un mismo experimento producen diferentes trayectorias climáticas, aunque todas igual de probables (Taylor et al 2012). El nombre de ensamble también suele utilizarse dentro del ámbito de estudios de cambio climático cuando se promedian variables obtenidas de diferentes modelos.

En este estudio se utilizan resultados de modelos AOGCMs, a los cuales se denominará en lo que sigue de este trabajo como modelos atmosféricos globales o modelos GCM. Existen 42 modelos de este tipo correspondientes a la quinta fase del proyecto. Como ya fue comentado no todos los modelos contienen todos los experimentos propuestos por el proyecto. En este caso, los modelos que permiten el libre uso de sus resultados, entre estos incluidas las variables necesarias para este estudio son solamente 7. Estos resultados utilizados y los modelos que los generan se describen en la sección 5.

3.1.2 Acceso a los resultados

Cada instituto modelador reestructura la información de salida de los modelos a un formato estandarizado para facilitar su utilización a los usuarios. Actualmente dicha información se almacena en bases de datos distribuidas en centros de modelación o centros de datos cercanos al lugar donde la información fue producida. Todos los nodos se encuentran vinculados y toda la información se encuentra disponible de forma gratuita a través de internet. Todo el sistema a través del cual se encuentra disponible la información es mantenido por el ESGF (Earth System Grid Federation). Finalmente, para acceder a resultados del CMIP5 el usuario debe registrarse en la web del ESGF¹ indicando cómo va a ser utilizada la información. Algunos de los grupos modeladores prestan su información para uso sin restricciones mientras que otros pueden exigir que la información sea utilizada con fines de investigación (no comerciales) o fines educativos.

3.2 Escenarios RCP

Las proyecciones de cambio climático suelen necesitar información acerca de las emisiones o concentraciones de los gases de efecto invernadero, aerosoles y otros componentes que afectan el sistema climático. Muchas veces, esta información se expresa a través de la generación de escenarios futuros que pueden depender del desarrollo de las actividades humanas, emisiones antropogénicas de gases, emisiones volcánicas, entre otros.

En particular, el quinto reporte del IPCC (IPCC, 2013) define 4 escenarios que se denominan Rutas de Concentración Representativas (RCP por sus siglas en inglés). Las mismas están identificadas por el forzante radiativo aproximado al año 2100 en comparación con el de 1750;

¹ <https://esgf-node.llnl.gov/search/esgf-llnl/>

2.6 Wm⁻² para el RCP2.6; 4.5 Wm⁻² para el RCP4.5; 6.0 Wm⁻² para el RCP6.0 y 8.5 Wm⁻² para el RCP 8.5. El forzante radiativo, según Moss et al. (2010), es el cambio en la diferencia entre la entrada y salida de la radiación a la atmósfera, el cual depende de la concentración de los gases constituyentes de la atmósfera, como puede ser el dióxido de carbono. El escenario RCP 2.6 implica un escenario de mitigación, donde el forzante radiativo llega a un máximo previo al año 2100 y se reduce, los escenarios RCP 4.5 y RCP 6.0 se estabilizan luego del año 2100 pero el forzante radiativo no supera 4.5 Wm⁻² ni 6.0 Wm⁻² respectivamente y para RCP 8.5 el forzante radiativo supera 8.5 Wm⁻² al año 2100 y sigue subiendo. Por más detalles respecto a los RCP ver Moss et al. (2010).

3.3 Antecedentes de estudios de CC relacionados a oleaje y nivel de mar

En la presente sección se presenta información relevante respecto a algunos estudios anteriores relacionados al cambio en oleaje y nivel de mar debido al cambio climático. Primero se describen brevemente los fenómenos que intervienen en el aumento del nivel medio del mar según lo desarrollado en el IPCC (IPCC, 2013). Luego, se presentan algunos estudios que utilizan modelos atmosféricos globales (pertenecientes al CMIP5 y al CMIP3) para proyectar cambios en variables marítimas en dominios globales y regionales. En esta instancia la revisión se enfoca en la metodología que los diferentes centros de investigación utilizan para proyectar cambios en los agentes marítimos mediante uso de los modelos atmosféricos globales. A pesar de que el presente trabajo de tesis consta de cuantificar efectos de cambio en el nivel de mar también se analizan estudios enfocados en cambios en el oleaje por dos razones: existen más estudios de estos últimos y la metodología utilizada en estos suele ser aplicable cuando la variable a analizar es el nivel de mar. Por último, se presentan resultados existentes de cambio principalmente en nivel de mar debido al cambio climático para la costa uruguaya.

3.3.1 Aumento del nivel medio del mar

El nivel de mar está compuesto por variables que comprenden diferentes escalas temporales y espaciales y por lo tanto el cambio en cada una de ellas suelen tener diferente origen. De esta forma, estudiar el cambio en el nivel de mar total implica analizar cómo cada una de esas componentes es afectada. En esta sección se describe de dónde provienen y a qué fenómenos se debe el aumento del nivel de mar a escala regional, lo cual se denomina Nivel Medio del Mar Regional (NMMR) según lo que se presenta en el capítulo 13 del IPCC (IPCC, 2013).

En un principio, es importante resaltar que los cambios en el nivel medio del mar de una región pueden diferir notoriamente del cambio en el nivel medio del mar global. Lo anterior puede deberse a los procesos dinámicos del océano, cambios en la batimetría o cambios gravitatorios debido a la redistribución de las masas de agua en el sistema climático, entre otros. A modo de ejemplo, según el reporte del IPCC (IPCC, 2013) el rango probable de la proyección de aumento en el nivel medio del mar global para el periodo 2081-2100 en relación al periodo 1985-2005, para el escenario RCP 8.5 es de 0.45 m a 0.82 m con un valor medio de 0.63 m. Sin embargo, la proyección del aumento de nivel medio del mar considerando las mismas condiciones, presenta valores medios que van desde 0.58 m a 0.61 m a lo largo de la costa uruguaya, y alcanzan los 0,78 m hacia la zona central del Océano Atlántico Sur.

Los procesos que afectan al nivel de mar incluyen tanto al océano como a la atmósfera, los hielos terrestres y el ciclo hidrológico (Figura 1). Desde el punto de vista del océano, los cambios en las

corrientes, la densidad y el nivel de mar están estrechamente relacionados, de forma que cambios en un punto del océano impactan en localidades alejadas del origen de dichos cambios. Los cambios en temperatura y salinidad también producen cambios en el nivel de mar, produciendo cambios en el volumen global de agua en los océanos a partir del proceso de expansión térmica, al igual que la variabilidad espacial en la presión atmosférica. Por otra parte, el intercambio entre agua y hielo en la tierra también aporta al cambio, a través de procesos que hacen que el nivel de mar en todo el globo cambie rápidamente y otros que generan cambios que pueden llegar a demorar años en propagarse (como puede ser la introducción en el océano de agua subterránea proveniente de la tierra, lo cual genera cambios en la salinidad y temperatura del océano, generando estos cambios en las corrientes y niveles locales). El intercambio de agua entre la tierra y el océano también resulta en patrones de cambio de nivel de mar denominados “huellas de nivel de mar” (sea level fingerprints), debidos a cambios en el campo gravitatorio y el movimiento vertical del fondo del océano asociado a efectos viscoelásticos de la deformación de la tierra.

Existen otros procesos que también afectan al cambio en el nivel medio del mar y no están asociados al cambio climático contemporáneo. En particular, la transferencia de masa desde el hielo terrestre al océano durante la última desglaciación contribuye significativamente al cambio de nivel de mar actual debido a la continua deformación viscoelástica de la tierra y los correspondientes cambios en el fondo oceánico y la gravedad. A dichos cambios se les denomina ajuste isostático glacial (GIA). Por último, existen procesos antropogénicos que influyen en el cambio en el nivel medio del mar, afectando el volumen de agua almacenada en la tierra, subterránea o superficial, o modificando las características de la superficie terrestre lo cual lleva a un cambio en escurrimientos y evapotranspiración, lo cual también modifica el ciclo hidrológico y este a su vez el nivel medio del mar. El análisis de procesos que contribuyen al cambio en el nivel medio del mar no es exhaustivo, existen otros procesos que escapan del análisis del IPCC AR5 como pueden ser efectos debido al movimiento tectónico, transporte de sedimentos en los océanos, entre otros.

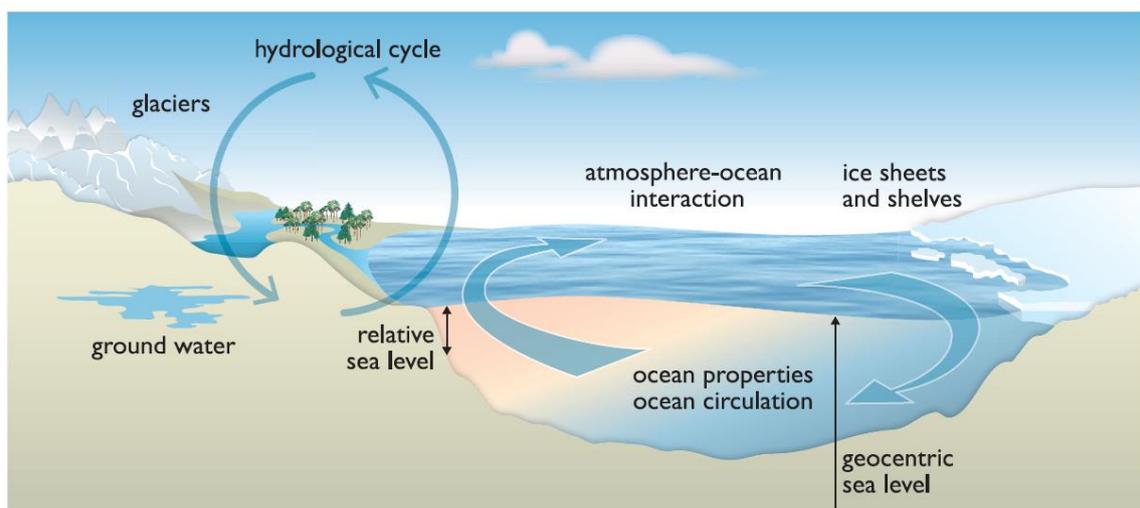


Figura 1- Procesos sensibles al cambio climático que pueden afectar al cambio global y regional del nivel de mar, considerados en el capítulo 13 del IPCC AR5 (IPCC, 2013). Extraído de IPCC, AR5.

Los procesos descritos contribuyen al cambio en el nivel medio del mar de diferentes formas y con distintos grados de relevancia. Los principales contribuyentes al cambio contemporáneo del nivel de mar son la expansión térmica del océano y la transferencia de agua almacenada en los hielos terrestres al océano (Church et al, 2011). Además, la influencia de cada contribución se calcula mediante diferentes metodologías. Mientras que algunas de las contribuciones se determinan utilizando variables obtenidas de modelos atmosféricos globales del CMIP5 y el CMIP3, otras contribuciones se calculan a través de diferentes aproximaciones obtenidas mediante estudios experimentales, como son las contribuciones de las masas de hielo. Las diferentes metodologías utilizadas para calcular las proyecciones de las contribuciones hacen que algunas dependan del escenario RCP que se está analizando, como son la contribución relacionada al océano y los hielos terrestres, mientras que el resto no depende del escenario de estudio. Respecto a las que no dependen del escenario de estudio, esto no significa que en realidad estas contribuciones no cambien según el escenario analizado, sino que simplemente hasta el momento del análisis los métodos utilizados no incluían variables que dependieran de los escenarios.

En particular las contribuciones se pueden separar en 4 grupos principales: componentes relacionadas al océano, componentes relacionados a los hielos, componente relacionado al aporte de aguas terrestres (reservorios, ríos, etc.) y la componente relacionada al ajuste isostático glacial (de aquí en más GIA). Los primeros dos grupos también pueden dividirse. Las componentes relacionadas al océano se dividen en tres: anomalía de nivel de mar dinámica, anomalía global asociada a la expansión térmica y anomalía debido a la presión atmosférica sobre el mar a través del efecto barométrico inverso. Luego la componente relacionada a los hielos se puede dividir en 5 subgrupos: el balance de masa superficial (SMB, dada por acumulación y ablación de hielos) y las contribuciones dinámicas (dada por cambios en los flujos de los hielos y reacciones a los cambios topográficos) de Groenlandia y la Antártida, y la contribución de los glaciares (el resto de los hielos terrestres sin incluir Groenlandia y la Antártida).

Los resultados de aumento en el nivel medio del mar desarrollados en el capítulo 13 del IPCC AR5 (IPCC, 2013) presentan libre acceso a sus resultados en una malla global los cuales son utilizados en este trabajo (sección 5.5). Dada la importancia que tiene el cambio del nivel medio del mar es un ámbito en el que se trabaja constantemente y existen varios estudios posteriores al IPCC que siguen mejorando la metodología de cálculo de las diferentes componentes que lo afectan (Slangen et al 2014, Carson et al 2016).

3.3.2 Estudios globales y regionales

Actualmente existen varios estudios a escala global y regional que evalúan los cambios en el oleaje y nivel de mar bajo diferentes escenarios futuros de emisión de gases de efecto invernadero. Estos estudios mantienen una línea de trabajo que implica utilizar los resultados de los modelos GCM, como son vientos y presiones, para proyectar cambios en las variables de interés en determinado dominio.

Los métodos utilizados para obtener las variables de interés en el dominio de estudio pueden ser métodos de reducción de escala estadísticos o dinámicos. La diferencia principal entre estos desde el punto de vista metodológico es que los métodos de reducción de escala estadísticos

implican un costo computacional bajo, lo cual permite utilizar una gran cantidad de modelos atmosféricos globales como forzantes, permitiendo mejorar la cuantificación de la incertidumbre implicada y el consenso de los cambios proyectados. De hecho, los estudios que aplican esta metodología suelen utilizar todos los modelos atmosféricos globales que tienen libre acceso a los resultados de las variables necesarias para forzar los modelos en cuestión (Wang et al. 2014, Camus et al. 2017).

Por otra parte, al aplicar un método de downscaling dinámico el costo computacional es alto lo cual implica la necesidad de seleccionar bajo cierto criterio, como pueden ser antecedentes o alguna recomendación específica, el conjunto de modelos atmosféricos globales a utilizar como forzantes, y parte del desafío está en encontrar los que actuando como forzantes arrojan los mejores resultados. Para analizar el comportamiento de los GCM como forzantes se evalúan los resultados de los modelos hidrodinámicos utilizados forzados con cada uno de los GCM que están siendo evaluados y también se evalúa el promedio de los resultados obtenidos forzando con cada GCM, a lo cual se le denomina ensamble. Los resultados de este último resultan de interés porque el ensamble muchas veces suele tener mejor comportamiento que los modelos individuales (Hemer et al. 2015).

Respecto a estudios de proyecciones de cambio en oleaje existen varios estudios globales (Casas-Prat et al. 2017; Semedo et al. 2018; Hemer et al. 2015). Casas Prat et al. (2017) implementa un modelo dinámico de oleaje en todo el globo, y lo fuerza con vientos en superficie y concentraciones de hielo resultado de 5 modelos atmosféricos globales del CMIP5: BCC-CSM1-1, INMCM4, MIROC5, GFDL-ESM2M y EC-EARTH. La determinación de los modelos utilizados se basa en incluir el mayor rango de incertidumbre posible y desde los cambios más pequeños proyectados a los más grandes, siguiendo las recomendaciones de COWCLIP (Coordinated Ocean Wave Climate Project). Los vientos de cada modelo y los resultados de oleaje obtenidos se evalúan contrastando con datos de reanálisis. Por otra parte, Hemer et al (2015) evalúa un ensamble de 10 modelos del CMIP3 y CMIP5 al ser usados como forzantes en un downscaling dinámico de oleaje global, y separa 13 regiones al evaluarlo. Para la zona que abarca nuestra zona de interés concluyen que el modelo atmosférico mejor rankeado como forzante para un modelo de oleaje es el MRI-CGCM3 del Instituto meteorológico de investigación de Japón correspondiente al CMIP5, siguiéndole el ensamble de los 10 modelos analizados (incluyendo modelos del CMIP3 y CMIP5) y siguiéndole el ensamble de los modelos del CMIP5 únicamente. Los resultados de este estudio son utilizados como antecedente en estudios regionales, por ejemplo, para la selección de los modelos utilizados en Shimura et al. (2016), sobre la proyección de eventos extremos de oleaje generados por ciclones tropicales utilizando ensambles del CMIP5 y por Wandres et al. (2017) en los cambios proyectados en el clima de oleaje en el sur de Australia ante los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5.

En relación a los estudios globales de proyecciones de cambio en el nivel de mar solo existen estudios que determinan los cambios en el nivel medio del mar (IPCC, 2013, Slangen et al. 2014, Carson et al. 2016), no así el cambio en la variable nivel de mar total, considerando los forzantes atmosféricos y los cambios que el aumento en el nivel medio del mar puede generar al nivel de mar total. Por otra parte, sí existen estudios regionales que analizan el cambio en el nivel de mar debido al forzante atmosférico como hace Voudouskas et al. (2016, 2017) para la costa europea. A modo de ejemplo, Voudouskas et al (2016) emplea el modelo numérico Delft3D para estimar

la propagación de la marea meteorológica forzándolo con vientos y presiones en superficie en un dominio que incluye Europa y gran parte del Atlántico Norte. Para obtener proyecciones de la marea meteorológica fuerza el modelo con vientos y presiones de 8 modelos climáticos globales del CMIP5, con una resolución de 6 hs. En este estudio se seleccionan los modelos atmosféricos globales utilizados como forzantes a partir del estudio realizado por Pérez et al. (2014) en donde se desarrolla una metodología para evaluar la pericia de los modelos atmosféricos globales correspondientes al CMIP3 y al CMIP5 para reproducir condiciones atmosféricas en el Atlántico Norte, generando un ranking de todos los modelos según su pericia.

Para nuestra región de estudio, que abarca gran parte del océano Atlántico Sur, no existe hasta el momento ningún estudio específico que permita definir cuál modelo atmosférico global es el más adecuado para proyectar los efectos del cambio climático en nivel de mar, así como tampoco para oleaje, aunque para este último existen algunos estudios que aportan información como el de Hemer et al. (2015). Es por esto que se determina realizar una evaluación de algunos modelos atmosféricos globales, en particular los que tienen libre acceso a las variables resultado necesarias para forzar los modelos hidrodinámicos a utilizar en este trabajo de tesis. Esta evaluación se desarrolla en el capítulo 4.

3.3.3 Escala nacional

El estudio más reciente sobre el efecto del cambio climático realizado en la costa uruguaya se enmarca en el Plan Nacional de Adaptación costera (NAP costas) llevado a cabo por el MVOTMA (Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente), el CTCN (Climate Technology Centre & Network) y AECID (Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo), en particular en uno de sus productos titulado “Desarrollo de herramientas tecnológicas para evaluar los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay”.

En el marco de este último, el Instituto Hidráulico de Cantabria (IH-Cantabria) desarrolló un atlas de riesgos e impactos en toda la costa uruguaya a escala nacional, así como a escala local para determinadas playas seleccionadas por las intendencias de los 6 departamentos costeros del Uruguay. Para analizar dichos riesgos como paso intermedio se realizaron proyecciones de cambio climático de oleaje y residuo meteorológico de nivel de mar, que se presentan y desarrollan en el informe de proyecto (NAP Costas, 2019).

Para realizar las proyecciones aplican un downscaling estadístico basado en tipos de tiempo. IH-Cantabria tiene gran trayectoria utilizando la técnica, tanto a escala regional como global. Esta metodología hace uso de modelos estadísticos que relacionan de forma empírica las variables de circulación atmosféricas con las variables de interés en la zona de aplicación del modelo. Debido al bajo costo computacional que implica la técnica (en relación al del downscaling dinámico), es posible realizar las proyecciones utilizando un gran número de GCMs, en particular se utilizaron en el estudio los resultados de 30 GCMs y solamente se muestran y analizan los resultados del ensamble de los modelos. Como base de datos histórica tanto de oleaje como de nivel, se utilizan reanálisis de oleaje y nivel generados por el IMFIA (IMFIA, 2018a) en el marco del mismo proyecto. El downscaling estadístico realizado permitió generar proyecciones con una resolución espacial igual a la de la base de datos histórica utilizada (alcanza 1 km a lo largo de la

costa uruguaya). El detalle de la metodología implementada se puede encontrar en el informe del proyecto (IH-Cantabria, 2018).

En el estudio las proyecciones se obtuvieron para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 para períodos de tiempo futuros 2001-2039, 2040-2069 y 2070-2099. Respecto al oleaje, los resultados concluyen, para el escenario RCP 8.5, aumentos de los oleajes del Este y disminuciones en los oleajes del Sur. Los cambios respecto a la dirección media del oleaje mostraron un giro en sentido anti horario a lo largo de la costa debido al aumento de energía del oleaje del E, entre 3º a 6º. Por otra parte, se obtuvieron aumentos en la magnitud media de Hs del orden de entre 0.03 m y 0.04 m y disminuciones entre 0.04 m y 0.05 m, mientras que los cambios positivos de Tp fueron del orden de 0.05s y los negativos del orden de 0.1s. Por otra parte, el cuantil 95% de Hs muestra aumentos similares a la media y disminuciones ligeramente superiores que alcanzan los 0.09 m. El estudio destaca que a lo largo del siglo XXI se observa una intensificación de los cambios, es decir cambios menos intensos a corto plazo y más intensos al final del siglo (esto es más notable para el escenario RCP 8.5) y que los cambios no muestran consenso en la mayoría del dominio (considerando el consenso cuando el 80% de los modelos coinciden en la dirección del cambio y el cambio sobrepasa la desviación estándar intermodelo).

Por otra parte, respecto al nivel de mar que es el tema central de este trabajo de tesis, el estudio se centra en el residuo de nivel de mar (lo que suele llamarse como componente meteorológica de nivel) y en el aumento del nivel medio. Los resultados obtenidos mediante el downscaling estadístico para el cambio en el residuo de nivel de mar muestran para el horizonte temporal 2070-2100 y el escenario RCP 8.5, un descenso del valor medio del residuo del nivel de mar del orden de 0.010 m en la costa exterior del Río de la Plata y del orden del 0.015 m en el percentil 95% en prácticamente todo el dominio que incluye al estuario y la costa Este. Además, los resultados muestran consenso solamente en el cambio de la media, en costa interior del Río de la Plata, y hacia la costa de Punta del Este. Para el percentil 95% los cambios no muestran resultados robustos en ninguna zona de la costa. Respecto al aumento del nivel medio del mar, comparando el período 2081-2100 con respecto al período de referencia 1986-2005, para la zona de aguas abiertas de Uruguay estiman un valor medio de aumento de 41.5 cm con un límite inferior del intervalo de confianza al 90% de 25.6 cm y superior de 60.3 cm para el RCP 4.5. Para el RCP 8.5 la estimación media es de 57.9 cm y los límites inferior y superior del intervalo de confianza al 90% son 35.2 cm y 85.4 cm respectivamente.

Debido a que las proyecciones realizadas por IH-Cantabria mediante downscaling estadístico no contemplan cambios que puedan darse debido al aumento en el nivel medio del mar, en el marco del mismo proyecto, el IMFIA realizó nuevas simulaciones hidrodinámicas (IMFIA, 2018b) utilizando los mismos modelos que se utilizaron para generar la base de datos históricas nombradas más arriba (IMFIA, 2018a) actualizando las condiciones de borde e iniciales mediante la incorporación del aumento en el nivel medio del mar. El objetivo de lo anterior fue el de analizar la interacción entre el aumento del nivel medio de mar y la generación y propagación de oleaje y las ondas de marea y de esta forma complementar el conocimiento adquirido sobre las proyecciones. En lo que sigue se describen solo los resultados obtenidos para el reanálisis de niveles.

Se simularon dos escenarios correspondientes al valor medio y límite superior del intervalo de confianza de 90% del RCP 8.5, 57.9 cm y 85.4 cm respectivamente, para el período 1986-2005. Es importante aclarar que, en esta instancia, respecto al reanálisis de niveles en las simulaciones solo se varió el nivel medio del mar, conservándose el mismo forzante meteorológico así como la serie de caudales afluentes. En el informe se analizan los resultados restándole a las nuevas simulaciones el aumento del nivel medio. Al analizar los resultados en un punto ubicado próximo a Montevideo se observó que al comparar los cuantiles obtenidos del reanálisis original contra los obtenidos al subir el nivel medio del mar presentaban diferencias relativamente pequeñas, del orden de pocos centímetros en los cuantiles más extremos.

Al analizar el cambio en la media y en el cuantil 95% del nivel de mar (de las series de resultados luego de suprimirles el aumento de nivel medio del mar correspondiente) determinaron que las mayores diferencias se daban en el tramo más interior del Río de la Plata. Además, se observó que en el resto de la costa la diferencia de niveles medios era prácticamente despreciable mientras que el cuantil 95% presentaba un aumento del cambio en la costa de Montevideo y San José con un máximo relativo en la desembocadura del Santa Lucía que alcanzaba los 5 cm para el mayor aumento de nivel medio del mar.

Al analizar las componentes astronómicas y meteorológicas de nivel el estudio determina que los cambios en la componente astronómica del nivel de mar son más importantes que los de la componente meteorológica. De lo anterior concluyen que los cambios observados en el nivel de mar total podrían deberse únicamente a los cambios en amplitud y fase de las componentes astronómicas debido al incremento del nivel medio del mar.

4 MODELOS ATMOSFÉRICOS GLOBALES

En el presente capítulo se describe la información utilizada correspondiente a los modelos atmosféricos globales pertenecientes al CMIP5 y se muestra la evaluación de dicha información en el dominio de interés para el presente trabajo. Como se indica en el capítulo 3, los estudios antecedentes no incluyen un análisis específico del comportamiento de los modelos atmosféricos globales en la zona de estudio como forzantes de modelos hidrodinámicos de nivel de mar. Lo anterior conduce a la necesidad de evaluar dicho comportamiento, por dos motivos. El primero es conocer la pericia de los modelos del CMIP5 para representar las dinámicas que afectan al nivel de mar en la zona del Río de la Plata y el Frente Marítimo. El segundo, evaluar la posibilidad de descartar alguno de los modelos atmosféricos globales aptos para forzar los modelos hidrodinámicos a utilizar debido a que se destaque por un mal comportamiento en la zona de estudio. Pérez et al. (2014) desarrollan una metodología para evaluar la pericia para representar condiciones atmosféricas de todos los modelos atmosféricos globales correspondientes al CMIP3 y al CMIP5 en la zona del Atlántico Norte. La evaluación realizada en este trabajo de tesis se basa en dicha metodología.

4.1 Información disponible

Como se indica en la sección 3.1, no todos los modelos presentan los mismos períodos simulados, variables resultado ni resoluciones temporales. De los 42 modelos pertenecientes al CMIP5 disponibles se seleccionan aquellos que dispongan de las variables resultado necesarias (hasta el momento en que se descarga la información) para forzar los modelos a implementar en este estudio. Los modelos que se seleccionen deben contar con las siguientes condiciones:

- Tener simulados los períodos y escenarios: histórico (1985-2005), RCP45 (2026-2045 y 2081-2100) y RCP85 (2027-2045 y 2081-2100).
- Presentar como variables de salida: presión a nivel de mar y vientos en superficie a 10 m de altura.
- Resolución temporal de los resultados tri-horaria o mayor.

De esta forma se obtienen 7 modelos que cumplen las condiciones anteriores, los cuales se listan en la Tabla 1, junto con su resolución espacial y los institutos de donde provienen dichos modelos. Los datos se obtienen de <https://esgf-node.llnl.gov>.

	Instituto	Resolución espacial [°latx°lon]
ACCESS1.0	CSIRO-BOM (Australia)	1.25 x 1.9
CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo per I cambiamenti Climatici (Italia)	0.75 x 0.75
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Meteorologiques (Francia)	1.4 x 1.4
GFDL-ESM2G	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (Estados Unidos)	2 x 2.5
HadGEM2-ES	Met Oficce Hadley Centre (Reino Unido)	1.25 x 2
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre-Simon Laplace (Francia)	1.25 x 2.5
MIROC5	MIROC (Japón)	1.4 x 1.4

Tabla 1- Características de los modelos GCM que se evalúan: nombre, instituto del cual provienen y resolución espacial.

Una vez descargados los datos se observó que no todos los modelos trabajan con el mismo calendario. A tener en cuenta: ACCESS1.0, CMCC-CM y CNRM-CM5 trabajan con calendarios estándar, GFDL-ESM2G, IPSL-CM5A-MR y MIROC5 trabajan con calendarios de 365 días y HadGEM2-ES trabaja con calendarios de 360 días. Esto es tomado en cuenta al momento de forzar los modelos hidrodinámicos con los GCM.

Por otra parte, para poder evaluar los modelos atmosféricos globales es necesario contar con datos medidos históricos. Actualmente no existen campos de presión medidos con la frecuencia necesaria en toda el área de estudio. Lo que se utiliza a modo de dato medido de presión son los datos de reanálisis obtenidos de los Centros Nacionales para la Predicción Ambiental de Estados Unidos (NCEP-CFSR), de 1 hora de resolución temporal y 2.5° de resolución espacial. Los datos se tienen para el período comprendido entre el 1/1/1979 hasta el 31/12/2016, por tanto, se definirán los tipos de tiempo con 38 años de datos. El CFSR es un producto de reanálisis global, de alta resolución obtenido a partir de un modelo acoplado de atmosfera-océano-tierra-hielo que provee muy buenas estimaciones de variables atmosféricas para largos períodos de tiempo. Además, el reanálisis asimila datos medidos obtenidos de diversas fuentes de medición de datos (Saha et al. 2012).

En lo que sigue al nombrar datos de modelo se hace referencia a los datos de los modelos GCM y al nombrar datos de reanálisis se hace referencia a los datos de reanálisis del NCEP-CFSR.

4.2 Metodología de evaluación de los modelos atmosféricos globales

La metodología utilizada para realizar la evaluación de los modelos atmosféricos globales se basa en la metodología presentada en Pérez et al. (2014) y es la clasificación en los tipos de tiempo de campos de presión a nivel de mar. Esta metodología consta de separar una serie de datos (campos de presión a nivel de mar instantáneos en este caso) en una cantidad N de grupos, a los cuales denominamos tipos de tiempo, mediante alguna técnica de clasificación. Cada tipo de tiempo representa un patrón sinóptico de circulación atmosférica en el dominio (Camus et al 2014). En términos generales, para evaluar los modelos GCM se determinan las probabilidades de ocurrencia de cada tipo de tiempo en los datos medidos (en este caso datos de reanálisis) y en los datos obtenidos a partir de los modelos GCM.

La idea de comparar las probabilidades de ocurrencia de cada grupo, y no instante a instante de las series temporales de presión en el dominio, se debe a que los modelos GCM no simulan las series temporales ocurridas o que van a ocurrir en la realidad, sino que simulan otras posibles que, se espera, tengan el mismo comportamiento en términos climáticos que el observado en las series medidas o en los reanálisis de las variables en cuestión. De esta forma, generalmente estos modelos se evalúan comparando valores medios, lo cual pierde de vista la pericia de los modelos al momento de representar la variabilidad de las variables simuladas. Al evaluar los modelos GCM mediante la clasificación de los tipos de tiempo, se logra evaluar la variabilidad de los mismos, debido a que esta clasificación agrupa todos los instantes similares, disminuyendo al máximo la variabilidad dentro de cada grupo (Pérez et al. 2014).

La metodología implementada se puede describir en 3 pasos principales. Los pasos 2 y 3 a su vez se separan en etapas, y se detallan en las subsecciones siguientes. Los 3 pasos principales son:

- 1) Definición de la variable a evaluar. Para esto es importante considerar que la idea principal de la evaluación de los modelos atmosféricos es su utilización para forzar modelos de downscaling dinámico de nivel de mar, para lo cual se utilizarán los resultados de los modelos de viento a 10 m de altura y presión a nivel de mar. Para este trabajo se decide entonces utilizar datos de presión a nivel de mar para evaluar los tipos de tiempo.
- 2) Clasificación de las presiones a nivel de mar en 100 tipos de tiempo. Para esto se determina utilizar la técnica de clasificación *k-means*.
- 3) Evaluación de los modelos atmosféricos globales mediante la comparación de la probabilidad de ocurrencia de los tipos de tiempo en cada modelo con la probabilidad de ocurrencia en el reanálisis en el período histórico. A partir de las probabilidades de ocurrencia de los tipos de tiempo obtenidas de cada modelo y del reanálisis se calculan varios estadísticos para cuantificar qué tan parecido es el comportamiento de los modelos al del reanálisis. Por otra parte, también se calcula la probabilidad de ocurrencia de los tipos de tiempo para los bloques futuros de cada modelo GCM y se determina el consenso del signo de cambio entre modelos para cada tipo de tiempo (para cuántos modelos cada tipo de tiempo es más probable o menos probable a futuro).

Como período histórico de evaluación se considera un periodo común entre los datos de los modelos atmosféricos y los datos de reanálisis. Este periodo común es el comprendido entre 1985 al 2005. Los escenarios que se evalúan para cada modelo son el RCP 4.5 y RCP 8.5 y los periodos futuros son a mediano plazo (entre 2026-2045) y a largo plazo (entre 2081-2100).

Para profundizar en el análisis de los patrones determinados se trabaja con datos de nivel de mar y oleaje obtenidos del reanálisis histórico del IMFIA (ver sección 6.4 e IMFIA, 2018a) para un punto característico de la zona de especial interés para este estudio: latitud 35.4° S, longitud 55.66°W (ver ubicación en Figura 2). A partir de la serie de reanálisis se clasifican los datos de nivel y oleaje asociados a cada grupo. Es decir, el dato de reanálisis de nivel de mar y oleaje con determinada fecha corresponde al grupo al cual corresponde el campo de presión con la misma fecha. Luego a partir de esta información se pueden obtener valores máximo, medio y de distintos cuantiles para las variables nivel de mar y altura de ola asociados a cada tipo de tiempo.

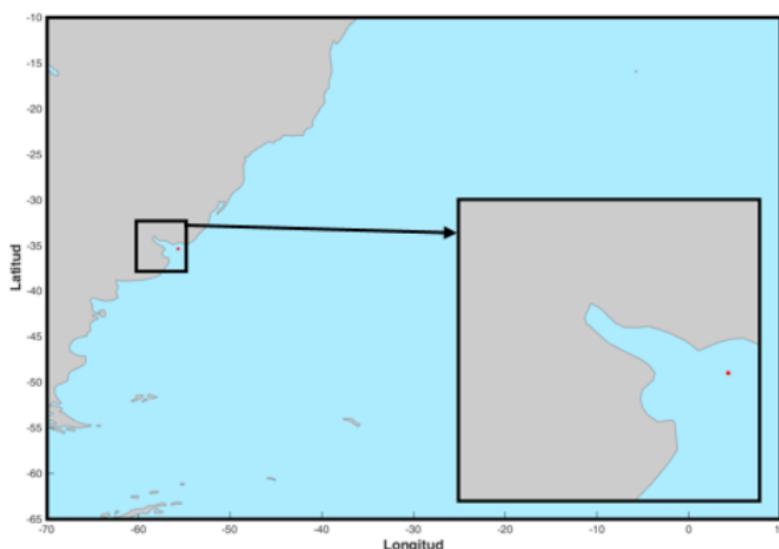


Figura 2- Localización del punto de extracción de información de oleaje y nivel de mar.

4.2.1 Clasificación de los tipos de tiempo

Partiendo de los datos de presión de reanálisis, la metodología para llegar a la clasificación de los tipos de tiempo se separa en dos etapas: análisis de componentes principales (PCA) a los datos de reanálisis y agrupamiento de los datos obtenidos en 100 tipos de tiempo. Este último se realiza mediante la técnica de *K-means* y para inicializar el proceso de agrupamiento se utiliza la técnica de máxima disimilitud (MDA). En la presente sección se explican brevemente las técnicas utilizadas (PCA, algoritmo *k-means* y algoritmo MDA).

Por otra parte, para realizar la clasificación, es necesario determinar el dominio para el cual se evaluarán los modelos atmosféricos globales. Para esto se parte de un dominio que abarca la mayor parte del océano Atlántico Sur, abarcando la zona de generación de los eventos de oleaje y nivel (observados en la costa uruguaya). No obstante, al abarcar un área muy grande, si se abarcan zonas alejadas con gran variabilidad se puede perder la variabilidad de la zona de mayor interés.

Para realizar la primera clasificación se parte de un dominio que comprende las latitudes [-10,-70] y las longitudes [-70,-10]. Como se verá en los resultados, de esta clasificación se observó que se captaba mucha variabilidad en los campos de presión al sur del dominio, asociados a la oscilación antártica, por lo cual se determinó disminuir el dominio a la zona comprendida entre las latitudes [-10,-65] manteniendo el rango de longitudes, [-70,-10].

4.2.1.1 Base de datos inicial

Se parte de la base de datos de reanálisis del CFSR de 1 hora de resolución temporal y 2.5° de resolución espacial. Durante todo el análisis solo se consideran los puntos espaciales correspondientes al mar, pues el interés final es utilizar las variables de salida de los modelos GCM que fuerzan la dinámica marina. Para realizar la clasificación se trabaja con anomalías diarias de presión a nivel de mar. De esta forma el primer paso es calcular las medias diarias y luego para el instante t (diario) a cada punto del dominio se le resta la media espacial para dicho instante:

$$SLPA(x, t) = SLP(x, t) - \overline{SLP(t)}$$

Ecuación 1

Donde $SLPA$ es la anomalía de presión diaria y $\overline{SLP(t)}$ es la media espacial de todo el dominio para el instante t . Se tiene entonces una serie temporal diaria de campos de presión que van desde el 1/1/1979 hasta el 31/12/2016 (38 años), lo cual se traduce en 13.880 campos instantáneos. Para el caso del dominio que comprende las latitudes [-10,-70] y longitudes [-70,-10] se tiene una dimensión espacial de 825 datos que se reducen a 674 cuando se eliminan los puntos de tierra, es decir 13.880x674 datos. Para el caso del dominio que comprende las latitudes [-10,-65] y longitudes [-70,-10] se tiene una dimensión espacial de 759 datos que se reducen a 621 cuando se eliminan los puntos de tierra, es decir 13.880x621 datos. Debido a la gran cantidad de datos que se manejan, previo a la clasificación se determina aplicar un análisis de componentes principales (PCA) a los mismos, de forma de disminuir sus dimensiones.

4.2.1.2 Análisis de componentes principales

En esta sección se desarrolla muy brevemente el análisis de componentes principales, según se explica en Wilks (2011). El objetivo de aplicar un análisis de componentes principales a un conjunto de datos es reducir las dimensiones de los mismos. El PCA reduce un conjunto de datos que contiene muchas variables, a un conjunto de datos con menos variables. Las nuevas variables son combinaciones lineales de las variables originales, y éstas nuevas variables se determinan de forma de representar la máxima fracción posible de la varianza que contenía el conjunto de variables original, de forma de perder poca información en el proceso.

De esta forma, si se tienen varias observaciones de un vector x de dimensiones $(K \times 1)$, aplicando el análisis de componentes principales se encuentran la misma cantidad de vectores, ahora llamados u y de dimensiones $(M \times 1)$, cuyos elementos son combinaciones lineales de los elementos de x . El PCA es efectivo cuando se logra que M sea mucho menor que K y esto sucede cuando existen correlaciones importantes entre los elementos de x , lo cual indica que x tiene mucha información redundante. Los elementos de los nuevos vectores u se denominan las componentes principales (PCs). Es normal que los datos correspondientes a campos atmosféricos presenten correlaciones importantes entre los datos de los distintos puntos espaciales. En nuestro caso de estudio, la cantidad de observaciones se corresponden con la longitud temporal de la serie (13.880), los vectores x corresponden a cada campo instantáneo y los elementos de dicho vector son los valores correspondientes en cada punto espacial del dominio (de dimensión 621 considerando el dominio más pequeño).

Es conveniente calcular los PCs como combinaciones lineales de las anomalías $x' = x - \bar{x}$, es por esto que en la clasificación se trabaja con anomalías de presión como se mencionó anteriormente. La primera componente principal, u_1 es la que comprende la mayor varianza, la segunda componente u_2 , comprende más varianza que la tercera u_3 , y así sucesivamente. Cada componente principal esta no correlacionada con las componentes que tienen índices menores, lo cual hace que ningún par de componentes este correlacionado. Las componentes principales que cumplen las condiciones anteriores están definidas por los vectores propios de la matriz de covarianza de x . La componente principal de índice m , u_m se obtiene como la proyección del vector x' en el vector propio de índice m , e_m .

$$u_m = e_m^T x'$$

Ecuación 2

Geoméricamente, el primer vector propio e_1 , apunta en la dirección en la cual los datos presentan mayor variabilidad. Este vector es el que está asociado al valor propio más alto. El segundo vector propio, asociado con el segundo valor propio más alto debe ser necesariamente perpendicular al primer vector propio y además apunta en la segunda dirección de mayor variabilidad de los datos. Así sucesivamente con el resto de los vectores propios. Se puede entender que los vectores propios definen un nuevo sistema de coordenadas en el cual reflejar los datos, y en particular, la matriz ortogonal $[E]$, cuyas columnas son los vectores propios, definen la rotación:

$$u = [E]^T x'$$

Ecuación 3

Este nuevo sistema de coordenadas está orientado de forma que cada eje consecutivo del sistema está alineado con la dirección de mayor variabilidad conjunta de los datos.

La ecuación anterior expresa la transformación de un vector x' de dimensiones $k \times 1$ a uno u de componentes principales también de dimensiones $k \times 1$. Haciendo la transformación inversa, x' se puede reconstruir de las componentes principales haciendo la transformación:

$$x' = [E]u$$

Ecuación 4

Es importante el hecho de que las componentes principales no están correlacionadas, pues esto significa que la matriz de correlación de las nuevas variables u_m es igual a la identidad. Lo anterior implica que las covarianzas entre pares de los elementos u_m son igual a 0, para que de esta forma la matriz de covarianza sea diagonal. Mediante ciertos cálculos se puede demostrar que la varianza abarcada por la componente principal de índice m es el valor propio m asociado al vector propio m .

Si se utilizan todas las componentes de u en la reconstrucción, es decir $M = K$, entonces la reconstrucción es exacta, pero si se utilizan solo algunas de las componentes principales, es decir $M < K$, en particular las que abarcan mayor varianza (asociadas a los mayores valores propios) entonces la reconstrucción es aproximada:

$$x'_{(K \times 1)} \approx [E]_{(K \times K)} \times u_{(M \times 1)}$$

Ecuación 5

La reconstrucción mejora a medida que la suma de los valores propios asociados a las componentes utilizadas aumenta.

Una vez aplicado el análisis de componentes principales se seleccionan para seguir trabajando las componentes que explican el 95% de la varianza. En este caso resultan 16 componentes.

4.2.1.3 Algoritmo K-means

Para determinar los tipos de tiempo se aplica una técnica de agrupamiento o clustering (Wilks, 2011). El clustering es un procedimiento a través del cual se agrupan mediante diferentes criterios de distancia los miembros de una muestra de datos. Dentro de estos grupos las distancias entre los datos deben ser pequeñas en relación a la distancia entre los diferentes grupos que se suelen caracterizar por su centroide. Existen distintas metodologías de clustering, las cuales pueden dividirse en jerárquicas y no jerárquicas. En la primera, se generan grupos en cada fase del proceso, a partir del agrupamiento de grupos de la fase anterior que mantienen sus elementos, el número de grupos final no tiene que estar definido al comienzo del proceso y una vez que un dato pertenece a un grupo siempre pertenecerá a ese mismo grupo. Por otro lado, en los métodos no jerárquicos el número de clusters debe ser conocido desde el comienzo, además los datos pueden moverse de grupo a medida que el proceso avanza, lo cual permite reasignar una observación si es que esta se agrupó de forma equivocada en una etapa temprana del proceso. En particular los datos que estaban juntos si el número de grupos seleccionado es N , no necesariamente estarán juntos si el número de grupos selecciona es $N - 1$ (Wilks, 2011).

En este caso se determina utilizar la técnica de agrupamiento no jerárquica denominada k-means, siendo éste el método más utilizado dentro de la rama de los métodos no jerárquicos. Como se indicó antes, la cantidad de grupos en los cuales se agrupa la información debe ser especificada previo a inicializar el proceso. El algoritmo se puede inicializar a partir de una partición cualquiera de los datos totales en la cantidad N de grupos especificados, o a partir de una cantidad N de datos a los cuales se los denomina semillas. Las semillas se pueden definir aleatoriamente de todo el set de datos o mediante alguna metodología específica. Una vez determinadas las semillas se determinan los grupos iniciales haciendo que cada dato pertenezca al grupo tal que la distancia entre la semilla de dicho grupo y el dato sea menor. Teniendo los N grupos inicialmente definidos, el procedimiento del algoritmo de k-means puede describirse en 3 pasos según Wilks (2011):

- 1- Se determinan los centroides de cada grupo: $\bar{X}_g, g = 1, \dots, N$.
- 2- Se calcula la distancia entre el dato x_i del set de datos y cada uno de los 100 centroides \bar{X}_g determinados en el paso anterior. En el presente estudio se utiliza siempre la distancia Euclidiana.
- 3- Si x_i ya pertenece al grupo cuyo centroide es el más cercano, se repite el paso anterior para el siguiente dato x_{i+1} . En caso contrario, se reasigna x_i al grupo al cual dista menos y se vuelve al paso 1.

Los pasos anteriores se repiten hasta que la distancia entre cada dato x_i y los centroides de los grupos a los que ya pertenecen sea la menor, es decir, ningún x_i se reasigna a otro grupo durante una recorrida completa de todo el set de datos.

4.2.1.4 Algoritmo de máxima disimilitud (MDA)

Como se indicó anteriormente, para inicializar el proceso de agrupación se puede partir de N grupos aleatorios o de una cantidad N de datos a los cuales se les denomina semillas, siendo N la cantidad de grupos en los que se desea clasificar todo el set de datos, ya definida. En el presente estudio para determinar las semillas se utiliza un algoritmo de máxima disimilitud (MDA). El objetivo de este algoritmo es elegir como N datos iniciales los más representativos

del conjunto total de datos y éste garantiza una clasificación determinista. El método se basa en buscar el subgrupo de N datos menos similares posibles. Para identificar este subgrupo sería necesario determinar la disimilaridad para cada una de las combinaciones de N datos posibles que pueden obtenerse del set de datos total, lo cual implica un costo computacional muy alto si se trabaja con grandes cantidades de datos. Es por lo anterior que se suelen utilizar métodos simplificados que se basan en definir un criterio de óptima disimilitud (Willet et al, 1996).

La selección del dato inicial del subconjunto de N datos puede hacerse de forma aleatoria o puede utilizarse algún otro criterio. El resto de los $N - 1$ datos semilla se determinan calculando la no similaridad de cada dato con los restantes bajo el criterio de disimilitud establecido y se va agregando al subgrupo N el dato más disímil en cada paso del proceso (Camus et al, 2011).

En este estudio se utiliza como primer dato seleccionado de la muestra aquel con el valor más alto en la primera componente principal. A continuación se describe el procedimiento de selección de los N datos para la inicialización del agrupamiento mediante la técnica de K-means.

Considerando que se quiere aplicar la técnica a un conjunto de datos $M = \{x_1, \dots, x_M\}$. Se busca un subconjunto $N = \{n_1, \dots, n_N\}$ de datos semilla, es decir, el número de grupos seleccionado es N :

- 1- Se selecciona n_1 según cierto criterio. En este caso se selecciona el x_i que presenta la primera componente principal más alta.
- 2- Se tiene la distancia entre x_i y n_1 como:

$$d_{1i} = \|n_1 - x_i\| \quad , \quad i = 1, \dots, M - 1$$

Ecuación 6

Donde $\| \quad \|$ representa la distancia euclidiana. Se determina n_2 como el más disímil:

$$n_2 = x_i \text{ tal que } d_{1i} = \max_i(d_{1i}) \quad , \quad i = 1, \dots, M - 1$$

Ecuación 7

La notación \max_i indica que se busca el máximo variando en i .

- 3- Para determinar el elemento n_{j+1} de N ($j + 1 \leq N$) se tiene:

$$d_{ji} = \|n_j - x_i\| \quad , \quad i = 1, \dots, M - j, j = 1, \dots, j$$

Ecuación 8

$$d_{sub,i} = \min_j(d_{ji}) \quad , \quad i = 1, \dots, M - j, j = 1, \dots, j$$

Ecuación 9

Entonces para cada x_i se tiene una distancia representativa $d_{sub,i}$. El x_i que se mueve al subgrupo N es aquel tal que la distancia al punto más cercano del subgrupo N es máxima, es decir:

$$n_{j+1} = x_i \text{ tal que } d_{sub,i} = \max_i(d_{sub,i}) , \quad i = 1, \dots, M - j$$

Ecuación 10

El proceso se repite hasta que el subgrupo de datos N tenga la cantidad de datos deseados. En la Figura 3 se muestra un esquema del proceso descrito.

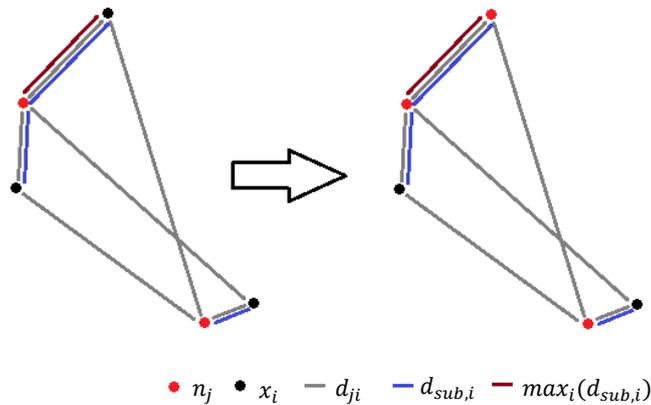


Figura 3- Esquema método MDA utilizado.

4.2.2 Evaluación de los modelos atmosféricos globales

Una vez obtenida la clasificación de los tipos de tiempo del reanálisis, para evaluar el período histórico de cada modelo atmosférico global se siguen los pasos que se describen a continuación para evaluar los modelos atmosféricos globales:

- 1- Interpolación de los datos de modelo al dominio y la malla de reanálisis (2.5°x2.5°).
- 2- Proyección de los datos de modelo en los 16 EOFs obtenidos a partir del análisis de componentes principales aplicado al reanálisis, los cuales explican el 95% de la varianza de reanálisis.
- 3- Para cada dato de modelo se busca el dato de reanálisis más cercano, según la distancia euclidiana. Luego cada dato de modelo se vuelca en el grupo al cual pertenece dicho dato de reanálisis.
- 4- Se determinan las frecuencias relativas de cada grupo para el modelo GCM y se calculan estadísticos.

Se evalúan 7 modelos atmosféricos globales que presentan diferentes resoluciones espaciales y una resolución horaria de 1 hora (Tabla 1).

Por una parte, se evalúa el período histórico de cada modelo calculando las frecuencias relativas de cada tipo de tiempo y comparándola con la del reanálisis. Además, se calculan tres estadísticos en función de las frecuencias de ocurrencia: Scatter Index (SI), Relative Entropy (RE) y Scatter Index de la desviación estándar (stdSI). El Scatter Index es el error medio cuadrático de la frecuencia normalizado con la frecuencia media:

$$SI = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=N} (p_i - p_i')^2 / N}}{\sum_{i=1}^{i=N} (p_i) / N}$$

Ecuación 11

Donde N es la cantidad de tipos de tiempos, p_i es la frecuencia relativa del tipo de tiempo i para el reanálisis y p_i' es la frecuencia relativa del tipo de tiempo i para el modelo atmosférico. Este estadístico le da más importancia a los tipos de tiempo con mayor probabilidad de ocurrencia, por lo cual se calcula otro estadístico que le da más importancia a los tipos de tiempo con menor probabilidad de ocurrencia, el RE (Pérez et al. 2014):

$$RE = \sum_{i=1}^{i=N} p_i \left| \log \left(\frac{p_i}{p_i'} \right) \right|$$

Ecuación 12

Debido a que algún tipo de tiempo puede tener una probabilidad de 0 para alguno de los modelos, se determina asumir un valor mínimo de 0.5 ocurrencias en estos casos. Cuanto menor sea el valor de SI y RE obtenido para un modelo significa que dicho modelo tiene un buen comportamiento respecto a los datos del reanálisis. Con buen comportamiento nos referimos al hecho de que los modelos GCM muestren una frecuencia de ocurrencia de los tipos de tiempo similar a la observada en el reanálisis.

Para analizar el comportamiento de los modelos respecto a los tipos de tiempo que incluyen eventos más severos (en el punto indicado en la Figura 2), se determinan los grupos cuya altura de ola máxima, altura de ola media, nivel medio del mar y nivel de mar máximo supere el cuantil 85% de la respectiva métrica, y para el caso de nivel mínimo se determinan los grupos con nivel menor al cuantil 15%. Luego los estadísticos anteriores se calculan nuevamente considerando solo los grupos que superan (o no en el caso de nivel mínimo) los respectivos cuantiles.

Los estadísticos presentados se enfocan en evaluar la similitud de los modelos y el reanálisis determinando la cantidad de veces que se repiten las situaciones sinópticas en el periodo histórico completo. Esto significa que en ningún momento se considera la variabilidad en distintos años de dichas situaciones. Debido a lo anterior se calcula otro estadístico que compara la varianza interanual de la frecuencia de cada tipo de tiempo:

$$stdSI = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=N} (std(p_i) - std(p_i'))^2 / N}}{\sum_{i=1}^{i=N} (std(p_i)) / N}$$

Ecuación 13

Donde $std(p_i)$ es la desviación estándar de la frecuencia relativa anual del tipo de tiempo i .

Por otra parte, también se analiza el comportamiento de las proyecciones futuras de cada modelo GCM. Para esto, para cada tipo de tiempo se determina cuantos de los 7 modelos

muestran un aumento o disminución de su frecuencia relativa, en relación a la frecuencia que cada uno muestra para dicho tipo de tiempo durante el periodo histórico.

4.3 Resultados

En la presente sección se muestran primero los resultados obtenidos de la clasificación en los 100 tipos de tiempo de los datos de presión de reanálisis utilizando la metodología descrita en la sección 4.2.1. A continuación, se muestran los resultados de la evaluación de los modelos atmosféricos globales, determinando los estadísticos que se describen en la sección 4.2.2.

4.3.1 Resultados de la clasificación

En la Figura 4 se muestran los 100 tipos de tiempo determinados para el caso del dominio que abarca las latitudes $[-10^{\circ}, -70^{\circ}]$ y longitudes entre $[-70^{\circ}, -10^{\circ}]$, mientras que en la Figura 5 se muestran los 100 tipos de tiempo determinados para el caso del dominio reducido que abarca las latitudes $[-10^{\circ}, -65^{\circ}]$ y longitudes entre $[-70^{\circ}, -10^{\circ}]$. Los tipos de tiempos se encuentran ordenados de manera que patrones similares se muestran juntos en la grilla, de forma de lograr una mejor y más clara interpretación de los resultados.

Para profundizar en el análisis de ambas clasificaciones a partir de los datos de reanálisis de nivel de mar y oleaje asociados a cada tipo de tiempo, obtenidos como se describe al principio de la sección 4.2, se obtiene para cada tipo de tiempo la altura de ola máxima, altura de ola media, nivel máximo, nivel mínimo y nivel medio asociado.

A grandes rasgos las clasificaciones de los tipos de tiempo obtenidas para ambos dominios representan situaciones muy similares, y la principal diferencia entre los patrones obtenidos es la dominancia de la oscilación Antártica en la clasificación. De la clasificación obtenida para el dominio original se observa que existen varios patrones que, al enfocarnos en la zona de especial interés (las latitudes medias) tienen características muy similares, y la diferencia entre ambos tipos de tiempo viene dado por la variación de la presión hacia la zona Antártica, por ejemplo, entre el WT32 y el WT42 de la Figura 4. Se observa que entre estos dos patrones la principal diferencia se encuentra en la zona de latitudes más altas, donde en el WT32 las presiones más bajas cubren toda la zona sur del dominio, y en el WT42 cubren solo la zona sureste del dominio. En los paneles inferiores de la Figura 4 se muestra la altura de ola máxima, media y los niveles máximos y mínimos asociados a cada WT (weather type), en el nodo que muestra la Figura 2. Se puede observar que entre los WT anteriormente discutidos, donde no se encuentra gran diferencia en la zona de interés entre ambos patrones, la diferencia entre las alturas de ola máximas asociadas no supera los 40 cm y las diferencias entre las alturas de ola media no superan los 20 cm. Luego, entre los niveles máximos y mínimos asociados no se encuentra gran diferencia. Esta situación se da para otros patrones de la clasificación.

A modo de respaldar cuantitativamente la selección del dominio, se determina calcular un coeficiente de varianza explicada (EV) para las variables de altura de ola (H_s) y nivel de mar (WLV) asociados a cada tipo de tiempo para cada clasificación obtenida (ambos dominios). El mismo se calcula como muestra la Ecuación 14.

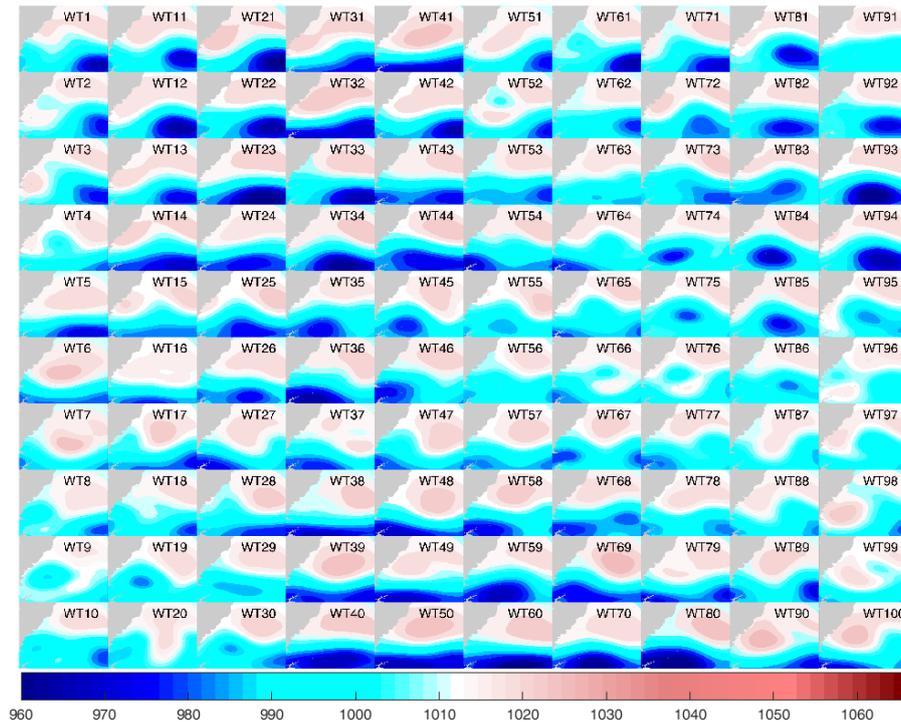
$$EV = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{N_{clus}} \sum_{i=1}^{N_j} (Z_i - \bar{Z}_j)^2}{\sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2}$$

Ecuación 14

En donde N_{clus} es el número de grupos, N_j es el número de datos dentro del grupo j , Z_i es el valor de la variable que se está analizando (Hs o WLV), y \bar{Z}_j es la media de los valores pertenecientes al grupo j . A mayor EV, mayor varianza explicada por parte de la clasificación, pues esto significa que la varianza de la variable dentro de cada cluster es baja, y el valor medio representa correctamente dicho cluster. Al calcular los coeficientes para la variable altura de ola, se tiene que para el dominio más grande este es 0.14 y para el dominio reducido es de 0.16, mientras que para la variable nivel de mar, para el dominio más grande el coeficiente es de 0.32 y para el dominio reducido es de 0.33. Las diferencias no son notorias pero ambos coeficientes son mejores para el dominio reducido.

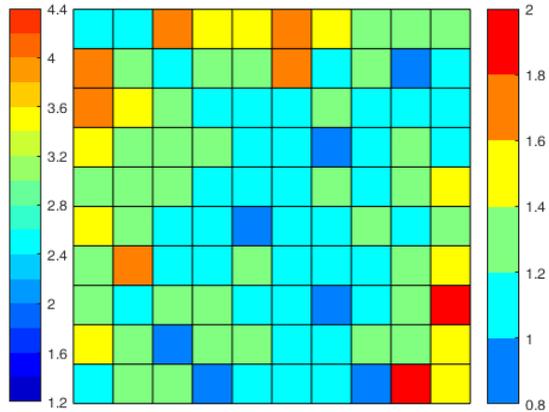
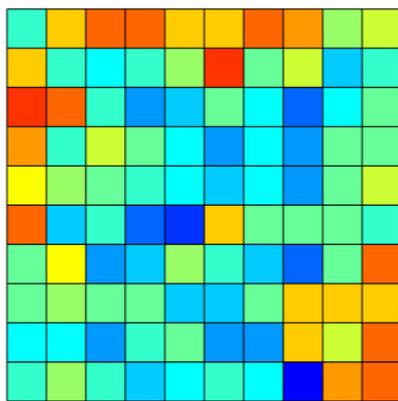
Debido a lo anterior se determina trabajar con el dominio reducido a la latitud 65° S presentado en la Figura 5. Se siguen encontrando patrones con características similares, pero se logra reducir la dominancia de las variaciones de presión en la zona antártica. Al disminuir el dominio se observa mayor variabilidad entre los patrones en la zona de latitudes medias. Por una parte, se obtienen patrones que presentan presiones bajas en la zona sureste del dominio y dentro de estos se encuentran algunos que presentan focos de bajas presiones en zonas localizadas contra el continente hacia la zona del Río de la Plata o por sobre la línea de entrada al mismo (zona superior izquierda y hacia abajo en el borde izquierdo de la rejilla). Observando las alturas de ola máximas asociadas a estos tipos de tiempo se observa que el W31 es el que presenta la altura de ola máxima más alta asociada, mientras que el resto presentan alturas máximas que pueden superar los 4 m. Respecto a los niveles máximos, algunos de los grupos presentan altos niveles máximos en relación al resto de los grupos, que superan los 2 m.

Hacia la zona inferior izquierda de la rejilla y parte de la zona superior derecha se encuentran patrones que presentan altas presiones que cubren la mayor parte del dominio hasta casi el final del continente, y muy bajas presiones al sur. A no ser por el WT9 se puede ver que estos tipos de tiempo no presentan altas alturas de ola máximas ni altos niveles de mar máximos asociados, como tampoco bajos valores mínimos. Luego hacia la zona inferior derecha de la rejilla se observan patrones que dividen el dominio casi al medio entre presiones relativamente altas y presiones relativamente bajas. Estos tampoco parecen estar asociados a las alturas de ola más altas según lo observado en el punto de interés, aunque algunos presentan niveles de mar máximos que superan los 2 m.



Hs max asociado al WT

Hs medio asociado al WT



WLV maximo asociado al WT

WLV mínimo asociado al WT

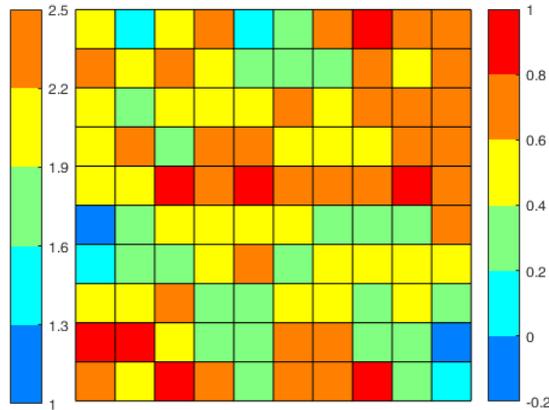
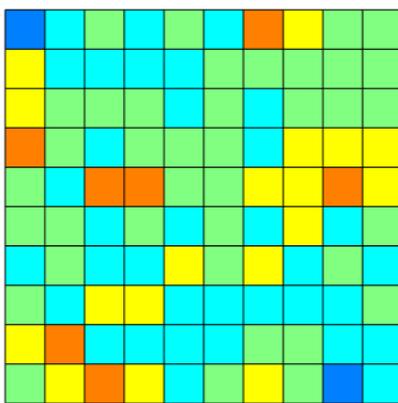
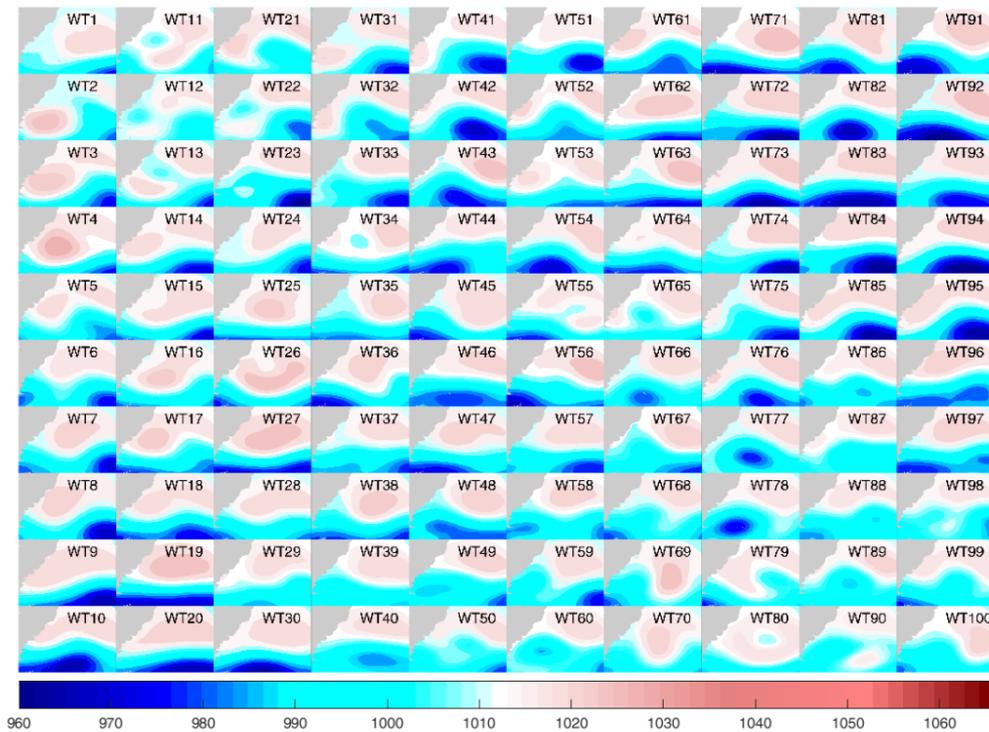
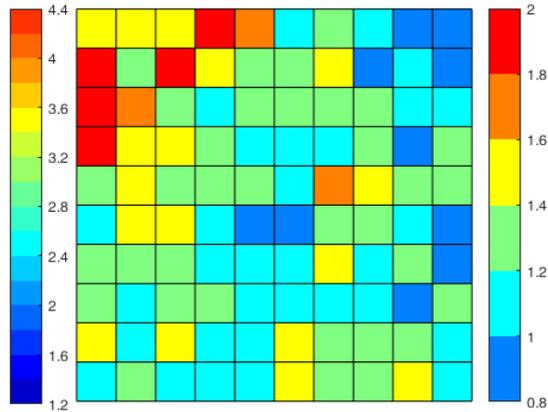
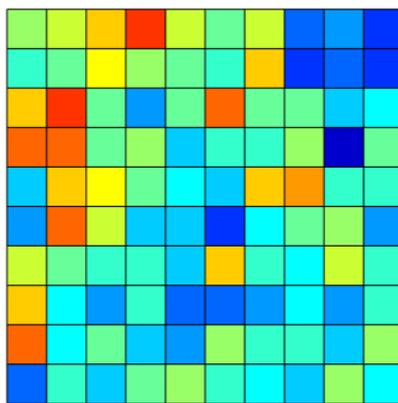


Figura 4- Clasificación de tipos de tiempo para el dominio comprendido entre latitud $[10^{\circ}, 70^{\circ}]$ S y longitudes entre $[70^{\circ}, 10^{\circ}]$ W (Panel superior). Panel inferior: Altura de ola máxima (m), altura de ola media (m), nivel de mar máximo (m), nivel de mar mínimo (m), asociado a cada tipo de tiempo, obtenido a partir de los datos de reanálisis en el punto de control.



Hs max asociado al WT

Hs medio asociado al WT



WLV maximo asociado al WT

WLV mínimo asociado al WT

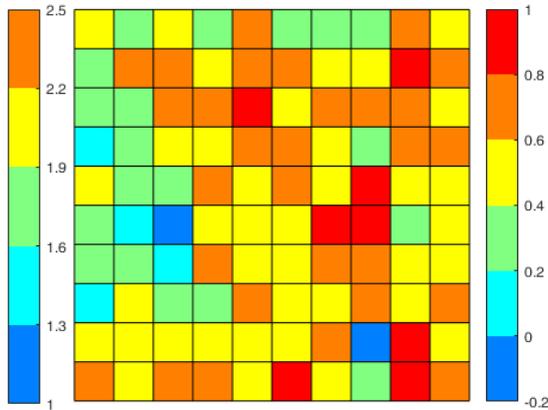
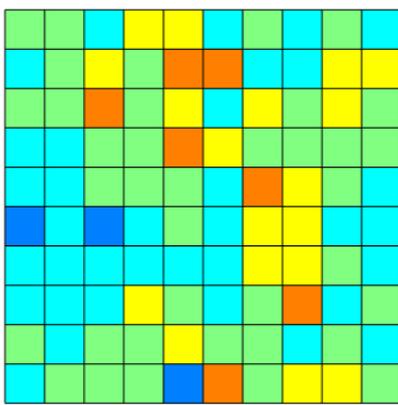


Figura 5- Clasificación de tipos de tiempo para el dominio comprendido entre latitud [10°, -65°] S y longitudes entre [70°, 10°] W (Panel superior). Panel inferior: Altura de ola máxima (m), altura de ola media (m), nivel de mar máximo (m), nivel de mar mínimo (m), asociado a cada tipo de tiempo obtenido a partir de los datos de reanálisis en el punto de control.

A partir de la clasificación realizada se tienen 100 patrones sinópticos de presión, para lo cuales es posible determinar la probabilidad de ocurrencia de cada uno en el periodo histórico comprendido entre los años 1985 y 2005. Para esto simplemente se calcula cuantos eventos horarios pertenecen a cada uno de los grupos y se determina la probabilidad dividiendo esta cantidad entre el número total de eventos (7670 eventos diarios). En la Figura 6 (panel superior) se muestra la rejilla con la frecuencia relativa de cada uno de los patrones.

Una de las principales características que se desprenden de los resultados obtenidos es el hecho de que no existe un conjunto de patrones que se destaquen por ser dominantes durante el periodo, sino que se observa una distribución que tiende a ser uniforme entre los 100 patrones sinópticos obtenidos de la clasificación, ya que la mayor frecuencia relativa obtenida no supera el 2%.

En el panel inferior de la Figura 6 se muestran los cuatro tipos de tiempo con frecuencias relativas mayores a 1.7%. Los cuatro patrones más probables son muy similares y presentan presiones más altas hacia la zona central del dominio, y presiones notoriamente bajas en la zona inferior. De la Figura 5 se desprende que de estos cuatro los tipos de tiempo W15 y W57 presentan las mayores alturas de ola máximas asociadas comprendidas en el rango entre 3.6 y 3.8 m, sin embargo, el tipo de tiempo W15 presenta una altura de ola media mayor (entre 1.4 m a 1.6 m) y un nivel mínimo menor (entre 0.2 m a 0.4 m). Por otra parte, el tipo de tiempo W64 es el que presenta el nivel máximo más alto asociado, comprendido entre 1.6 m y 1.9 m. Respecto a las frecuencias relativas de los tipos de tiempo que presentan las mayores alturas de ola máxima, el patrón W14 es el que presenta la mayor frecuencia relativa siendo esta de aproximadamente 1.5%. Luego el patrón con mayor nivel máximo asociado es el W60, con una frecuencia relativa que no supera el 0.6% y el patrón con menor nivel mínimo (el WT79) presenta una frecuencia relativa que no supera el 0.8%.

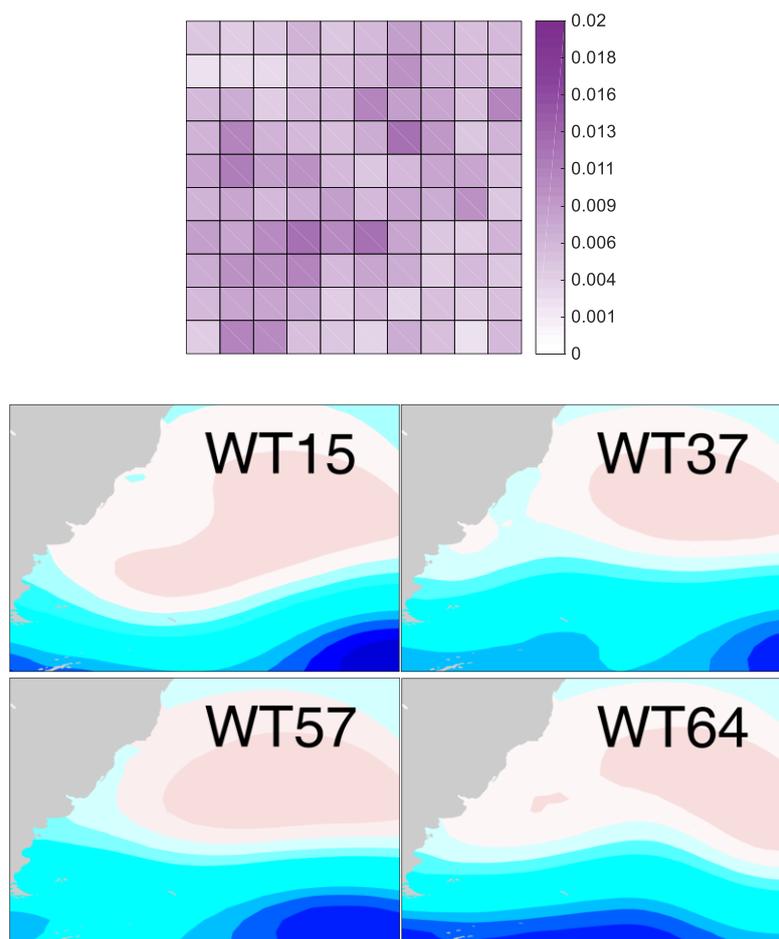


Figura 6- Frecuencia relativa de los 100 tipos de tiempo obtenidos de la clasificación para el periodo histórico (Panel superior). Tipos de tiempo con mayor frecuencia relativa (Panel inferior).

4.3.2 Resultados de la evaluación de los modelos atmosféricos globales

En la presente sección se muestra el resultado de la evaluación de los modelos atmosféricos globales. Primero se muestran los resultados para el período histórico y luego se analiza la consistencia de las proyecciones futuras.

4.3.2.1 *Período histórico*

En la Figura 7 se muestran las frecuencias relativas de los 100 tipos de tiempo obtenidas para el caso de referencia (reanálisis, panel superior) y para cada uno de los 7 modelos evaluados (panel inferior) en el periodo histórico (1985-2005). Además, para cada modelo se muestra el valor de los estadísticos SI, RE y stdSI. En términos generales se observa que exceptuando el MIROC5, los restantes 6 modelos concentran las probabilidades de ocurrencias en grupos similares, que son los que se encuentran en el vértice inferior izquierdo y superior derecho de la rejilla. Comparado con el reanálisis se observa que a pesar de que el mismo presenta una distribución de probabilidades más uniforme entre los 100 grupos, este también presenta más probabilidades de ocurrencia en los grupos situados desde la zona central hacia el vértice inferior izquierdo de la rejilla.

Reanálisis Histórico

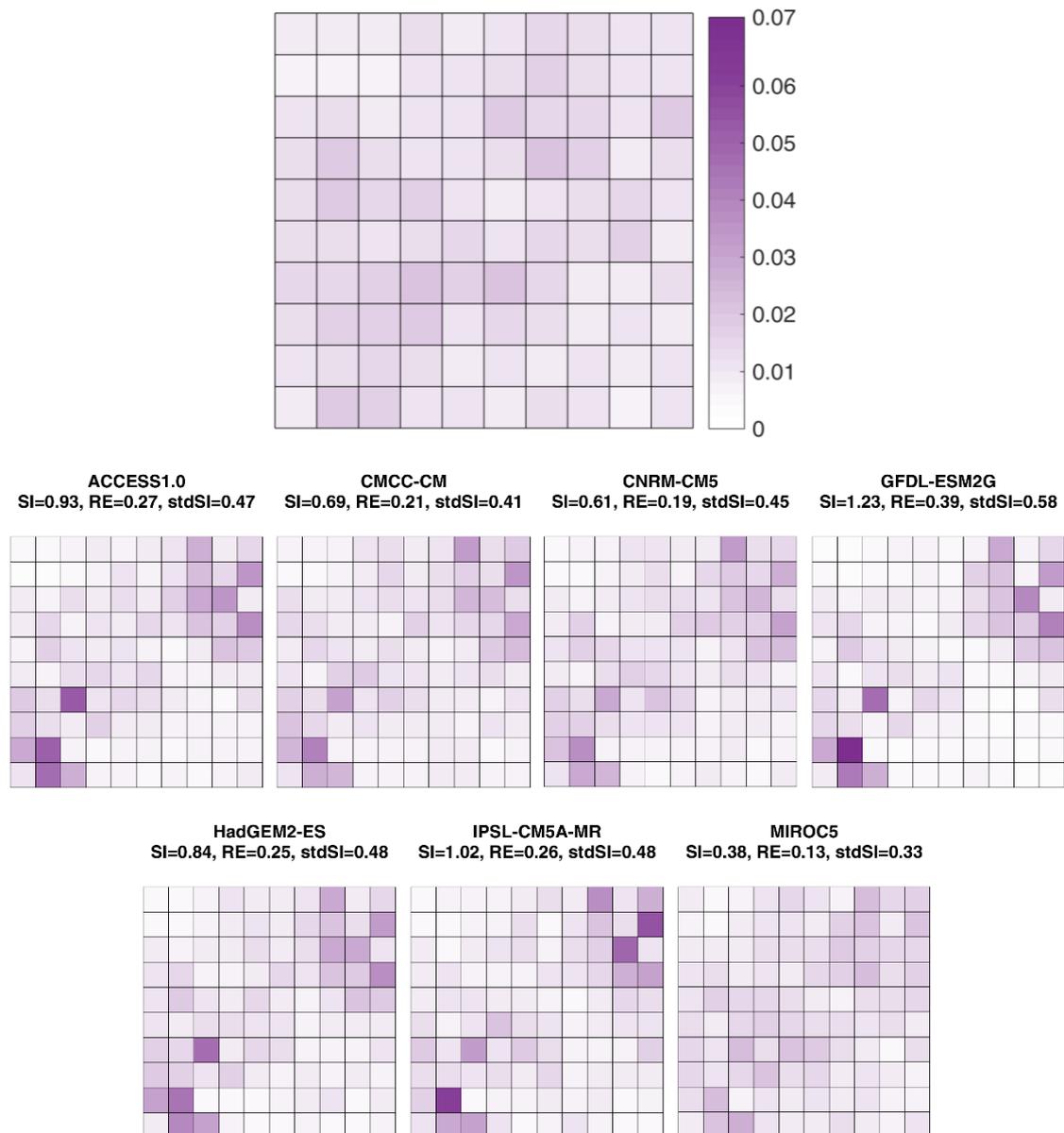


Figura 7- Frecuencia relativa y estadísticos de los 100 tipos de tiempo para el periodo histórico 1985-2005 para el reanálisis (panel superior) y para los 7 modelos evaluados (paneles inferiores).

Respecto a los estadísticos se observa que el que presenta mejor SI y RE es el MIROC5, que además de presentar los estadísticos más bajos, los mismos son notoriamente más bajos que el resto. Lo anterior resulta razonable porque se observa claramente de la Figura 6 que presenta una distribución más uniforme y similar a la del reanálisis en los 100 grupos obtenidos de la clasificación, lo cual significa que reproduce bien las condiciones más probables y también las menos probables. Por otra parte, analizando el resto de los modelos, el CMCC-CM y el CNRM-CM5 son los que siguen al MIROC5 con los valores más bajos de SI y de RE, mientras que los que presentan los más altos son el IPSL-CM5A-MR y el GFDL-ESM2G. Este último presenta valores notoriamente peores, que pueden reflejarse en las figuras, donde se observa que existen muchos grupos que no se encuentran representados por el modelo según los criterios de comparación utilizados.

Respecto a la pericia de los modelos representando la variabilidad interanual de las probabilidades de ocurrencia de cada grupo se observa que el MIROC5 presenta el valor más bajo de 0.33, lo cual significa que continúa presentando el mejor comportamiento frente al resto de los modelos, mientras que el valor más alto se tiene para el GFDL-ESM2G siendo de 0.58 en este caso. El resto de los modelos presentan valores muy similares que recorren el rango entre 0.41 y 0.47.

En la Tabla 2 se muestran los estadísticos calculados utilizando solo los grupos cuya altura de ola máxima, media, nivel de mar máximo y medio, superan al cuantil 85% y los que presentan un nivel mínimo menor al cuantil 15%. El MIROC5 sigue presentando los valores más bajos de SI y RE en todos los casos, es decir que es el que mejor reproduce los grupos que presentan los eventos más severos asociados. Por otra parte, los modelos CMCC-CM y CNRM-CM5, que le seguían al MIROC5 representando las condiciones de todos los grupos, siguen mostrando un buen comportamiento. Luego el que presenta el peor comportamiento en este caso sigue siendo el GFDL-ESM2G, mostrando los valores más altos de SI en comparación con el resto de los modelos.

	> Q 85 Hs max		> Q 85 Hs media		> Q 85 N max		> Q 85 N medio		< Q 15 N min	
	SI	RE	SI	RE	SI	RE	SI	RE	SI	RE
ACCESS1.0	1.55	0.04	1.95	0.04	2.48	0.03	1.31	0.03	2.52	0.04
CMCC-CM	1.32	0.04	1.42	0.02	2.46	0.02	1.03	0.02	1.86	0.03
CNRM-CM5	1.05	0.03	1.26	0.03	1.87	0.03	1.05	0.02	1.57	0.03
GFDL-ESM2G	1.74	0.05	2.19	0.05	3.02	0.06	1.80	0.07	2.82	0.05
HadGEM2-ES	1.59	0.04	1.93	0.03	2.26	0.03	1.23	0.03	2.25	0.04
IPSL-CM5A-MR	1.44	0.06	1.48	0.04	4.30	0.04	1.26	0.03	2.09	0.04
MIROC5	0.74	0.02	1.02	0.02	1.07	0.01	0.56	0.01	0.98	0.02

Tabla 2- Estadísticos SI y RE para los grupos con eventos más extremos asociados en el punto de la Figura 5, para los 7 modelos evaluados durante el periodo histórico.

4.3.2.2 Consistencia de proyecciones futuras

Respecto a las proyecciones futuras de cada modelo, se realiza un breve análisis cualitativo observando los cambios mostrados por los diferentes modelos para cada tipo de tiempo, y desde el punto de vista cuantitativo se determina la consistencia entre los modelos evaluando cuantos modelos modifican sus valores de probabilidad en la misma dirección para cada grupo.

Los escenarios futuros analizados son el RCP 4.5 y el RCP 8.5, y los períodos son el mediano plazo considerando el período 2026-2045 y el de largo plazo considerando 2081-2100, teniendo en total 4 casos. En la Figura 8 se muestran los cambios en las frecuencias relativas a largo plazo para el escenario más severo RCP 8.5, para los 7 modelos. Se observa que los cambios más importantes se dan para tipos de tiempo similares en todos los modelos. En particular según los modelos se tiene una disminución importante de la probabilidad de ocurrencia en varios tipos de tiempo situados en el vértice inferior izquierdo de la rejilla. Volviendo a la Figura 5 se observa que estos presentan presiones medias a altas cubriendo la mayor parte del dominio y de la zona de interés, y presiones notoriamente bajas hacia el sur del dominio; además, estos tipos de tiempo no presentan las alturas de ola máximas ni medias más altas asociadas. También se observan disminuciones en la probabilidad de ocurrencia para tipos de tiempo situados en la

esquina superior derecha para la mayoría de los modelos. El modelo que muestra cambios más notorios en las frecuencias de ocurrencia totales es el IPSL-CM5A-MR.

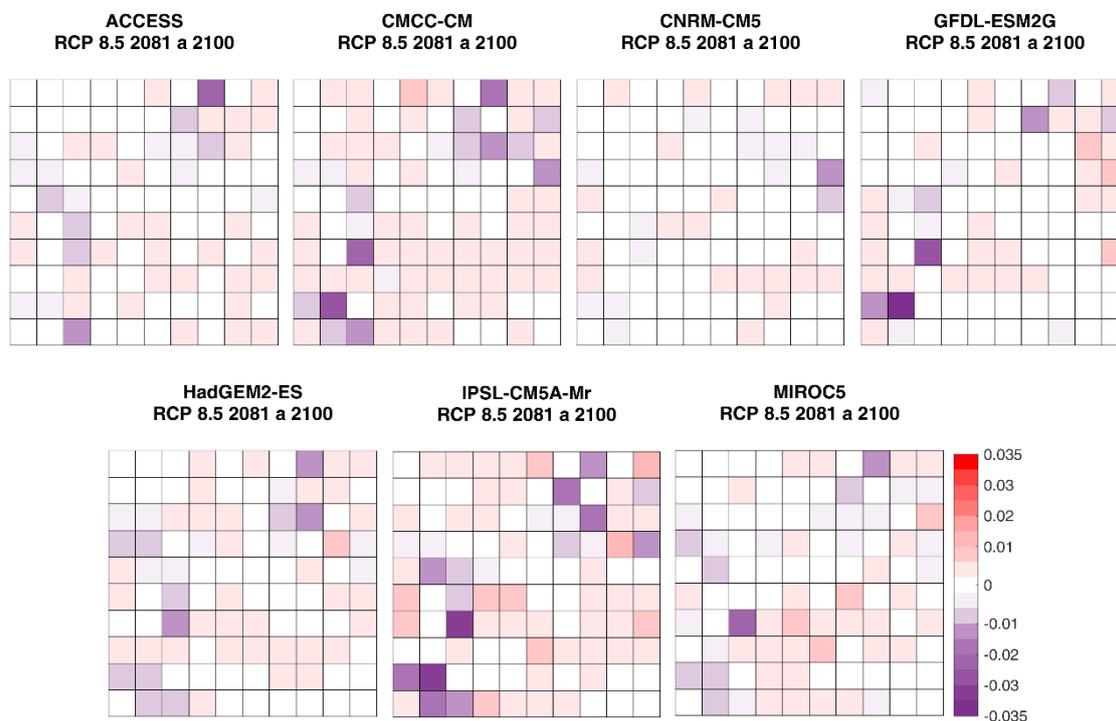


Figura 8- Cambios en la probabilidad de ocurrencia respecto al período histórico de los 100 tipos de tiempo para cada uno de los 7 modelos; escenario de largo plazo (2081-2100) para el escenario RCP 8.5.

En la Figura 9 se muestra para cada escenario analizado cuantos modelos coinciden en aumentar o disminuir la probabilidad de ocurrencia de cada tipo de tiempo. De la figura se desprende que para el largo plazo y para el escenario más severo es donde más modelos coinciden en la dirección de cambio para la mayoría de los grupos.

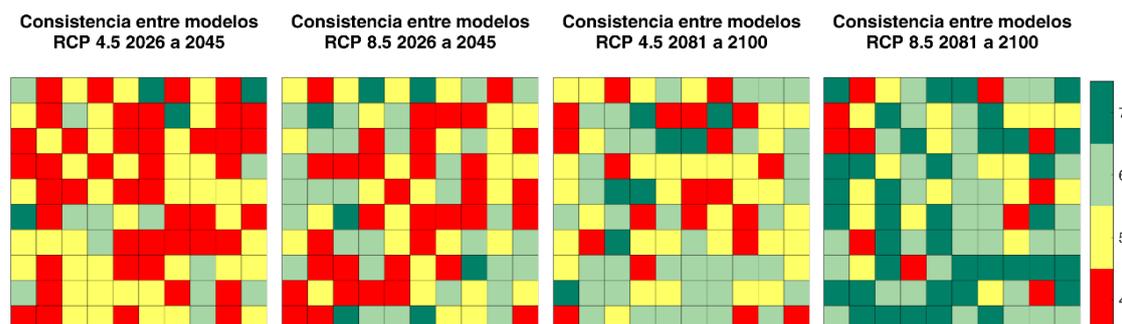


Figura 9- Consistencia entre los 7 modelos evaluada según el valor máximo entre el número de modelos que aumentan o que disminuyen la probabilidad de cada grupo.

4.4 Síntesis

Con el fin de determinar modelos atmosféricos globales del CMIP5 adecuados para forzar modelos dinámicos de nivel de mar en el Atlántico sur, se resuelve implementar una metodología similar a la desarrollada por Pérez et al. (2014) basada en la clasificación de tipos de tiempo de presión a nivel de mar. Se evalúan los 7 modelos atmosféricos globales que

cumplen con las restricciones específicas de este estudio, vinculadas al dominio espacial, resolución temporal y variables necesarias para forzar los modelos de oleaje y nivel de mar.

La metodología implicó clasificar campos de presión a nivel de mar de reanálisis NCEP-CFSR, previamente sometidos a un análisis de componentes principales, en 100 tipos de tiempo mediante la técnica de clasificación de *k-means*. Los modelos se evaluaron considerando su periodo histórico (1985-2005), y dos periodos futuros (2026-2045, 2081-2100) considerando dos escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5). Para evaluar el período histórico se calcularon 3 estadísticos (SI, RE, stdSI) que analizan el desempeño de los modelos reproduciendo las situaciones sinópticas más y menos probables durante todo el periodo considerado, y también al reproducir la variabilidad interanual. Luego, para las proyecciones futuras se analizó la consistencia entre los modelos evaluados determinando cuantos modelos coincidían en la dirección de cambio de las probabilidades de ocurrencia para cada grupo. A modo de lograr una mejor interpretación de la clasificación obtenida se utilizan datos de nivel y de altura de ola en un punto correspondiente al Río de la Plata.

Para el período histórico se obtiene que el MIROC5 es el modelo que mejor representa tanto los grupos más probables como los menos probables, presentando valores de SI y de RE notoriamente más bajos que el resto de los modelos, al igual que bajos valores de stdSI. Esto último demuestra también una buena representación de la variabilidad interanual por parte del modelo. Al MIROC5 le siguen con su buena pericia el CNRM-CM5 y luego el CMCC-CM. Se destaca el modelo GFDL-ESM2G con los valores más altos de SI y RE, lo que indica que representa pobremente varias de las situaciones sinópticas de presión a nivel de mar características de la región, el cual concentra la mayor cantidad de ocurrencias en pocos grupos, dejando muchos grupos no representados (Figura 7). También se determinaron los estadísticos considerando solo los 15 grupos con eventos más severos asociados de oleaje y nivel de mar y se mantienen los resultados obtenidos para todos los grupos.

Por otra parte, respecto a las proyecciones futuras, se analizaron los cambios en la probabilidad de ocurrencia de los patrones sinópticos para cada modelo. El modelo IPSL-CM5A-MR es el que muestra cambios más notorios en la probabilidad de ocurrencia. Por otra parte, al analizar la consistencia de los modelos en la dirección de cambio en la probabilidad de ocurrencia de cada tipo de tiempo, se observa buena concordancia entre los modelos, sobre todo en el largo plazo y para el escenario más severo analizado.

5 MODELOS HIDRODINÁMICOS

En lo que respecta a la modelación hidrodinámica llevada a cabo en este trabajo, el punto de partida son dos modelos hidrodinámicos bidimensionales implementados, calibrados y validados previamente en el IMFIA. El primero abarca el dominio comprendido por el Océano Atlántico Sur al cual llamaremos modelo regional, forzado por ondas de marea astronómica en los bordes oceánicos, caudal medio de los ríos Paraná y Uruguay y por vientos y presiones en la superficie libre. El objetivo del modelo regional es generar la onda de marea relevante que luego es impuesta en los nodos correspondientes a la frontera oceánica del segundo modelo, al cual denominaremos modelo local, conformando de esta forma un sistema de modelos anidados.

El modelo local comprende un dominio que abarca al Río de la Plata y el Frente Marítimo, y es forzado por vientos y presiones en la superficie libre y caudales correspondientes a los ríos Uruguay, Paraná y Santa Lucía, además de la condición de borde proveniente del modelo regional. En la Figura 10 se muestra un esquema del sistema de modelos hidrodinámicos anidados, con sus respectivos dominios.

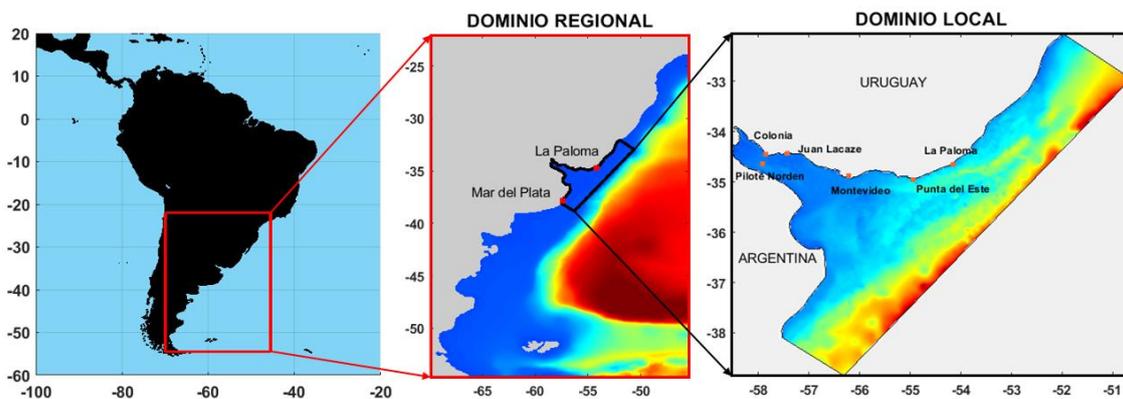


Figura 10- Esquema de modelos hidrodinámicos anidados utilizados en este trabajo.

A continuación, se describen las ecuaciones gobernantes comunes entre los modelos hidrodinámicos. Luego se describen las particularidades de cada modelo, en secciones independientes que incluyen dominio, batimetría, condiciones de borde y calidad del período histórico simulado. La información referida a los modelos se extrae en mayor parte de informes del IMFIA (Martinez et al 2015 e IMFIA, 2018a).

5.1 Ecuaciones gobernantes de los modelos hidrodinámicos

Los modelos hidrodinámicos utilizados en el presente trabajo simulan flujos a superficie libre de fluidos newtonianos. Los mismos resuelven las ecuaciones de cantidad de movimiento y la ecuación de continuidad en un espacio bidimensional. Las ecuaciones se simplifican asumiendo un fluido incompresible, homogeneidad en la vertical y distribución de presiones hidrostática. En las ecuaciones 15 y 16 se muestran las ecuaciones de cantidad de movimiento para las velocidades horizontales en coordenadas cartesianas. En la ecuación 17 se muestra la ecuación de continuidad para un fluido incompresible.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial(uu)}{\partial x} - \frac{\partial(uv)}{\partial y} - \frac{\partial(uw)}{\partial z} + fv - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left((v_H + \nu) \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((v_H + \nu) \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((v_t + \nu) \frac{\partial u}{\partial z} \right),$$

Ecuación 15

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial(vu)}{\partial x} - \frac{\partial(vv)}{\partial y} - \frac{\partial(vw)}{\partial z} - fu - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left((v_H + \nu) \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((v_H + \nu) \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((v_t + \nu) \frac{\partial v}{\partial z} \right),$$

Ecuación 16

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Ecuación 17

Donde u , v , w son las componentes del vector velocidad en la dirección x , y , z respectivamente, f es el parámetro de Coriolis, v_H y v_t son las viscosidades turbulentas en las direcciones horizontal y vertical, ν es la viscosidad cinemática turbulenta y p es la presión.

La superficie libre se obtiene por integración de la ecuación de continuidad sobre toda la columna de agua, es decir, entre la elevación de la superficie libre $\eta(x,y)$ y el fondo $-h$, e imponiendo las condiciones de borde cinemáticas en el fondo y en la superficie (Ec. 18).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-h}^{\eta} u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-h}^{\eta} v dz \right)$$

Ecuación 18

El desarrollo de la aproximación de hidrostática (Ec. 19), permite relacionar la presión a cualquier profundidad con la presión atmosférica en la superficie, el nivel de agua y la presión integrada entre dicha profundidad y la superficie libre.

$$\frac{\partial p}{\partial z} + g\rho = 0$$

Ecuación 19

Respecto a los términos de viscosidad, ambos modelos tienen implementadas varias expresiones para determinar los coeficientes de viscosidad turbulenta, como puede ser la formulación de Smagorinsky, k-epsilon, entre otros y pueden implicar parámetros de calibración del modelo.

5.2 Condiciones de borde

En la superficie libre los flujos convectivos de cantidad de movimiento, salinidad y temperatura son nulos. Esta condición se impone directamente en las ecuaciones considerando que el flujo vertical en las celdas superficiales es cero. Por otro lado, el flujo difusivo de cantidad de movimiento se impone explícitamente en la capa superficial a través de la tensión de corte debida al viento, la cual es calculada a partir de la ecuación 20. Siendo C_D el coeficiente de arrastre, ρ_a la densidad del aire y W la velocidad del viento a 10m sobre la superficie libre.

$$\vec{\tau}_w = C_D \rho_a \vec{W} |\vec{W}|$$

Ecuación 20

El flujo difusivo de cantidad de movimiento por la cara inferior de las celdas de fondo se impone como una tensión de corte que se calcula por una ley cuadrática en función de la velocidad V de la celda de fondo y el coeficiente drag de fondo C_f (Ec. 21). En ambos modelos este último se calcula a partir del número de Manning n de acuerdo con la ecuación 22, donde h es la profundidad local y g la aceleración de la gravedad. Los flujos difusivos de temperatura y salinidad en el fondo son nulos.

$$\vec{\tau}_w = C_f \vec{V} |\vec{V}|$$

Ecuación 21

$$C_f = \frac{2gn^2}{h^{1/3}}$$

Ecuación 22

5.3 Modelo regional

El desarrollo del modelo regional del cual se parte en este trabajo fue iniciado en el año 2008 y se denomina ASTide (IMFIA, 2008). Se basa en el modelo hidrodinámico a superficie libre MOHID (Mateus y Neves, 2013) en su versión bidimensional, en un dominio que comprende gran parte del Océano Atlántico. El modelo numérico MOHID fue desarrollado en el Instituto Superior Técnico - Maretec de Portugal y utiliza para la resolución de las ecuaciones una aproximación de volúmenes finitos. En su versión actual el MOHID está subdividido en módulos, cada uno contiene determinada información e interactúa con los demás a través de flujos de información (Martins, Leitaó, Silva, & Neves, 2000).

La primera implementación abarcaba un dominio de cálculo [22°S; 60°E]-[70°W; 20°W] con una malla estructurada en latitud longitud con una discretización constante de 0,1°. Se consideraban como forzantes un modelo atmosférico regional (WRF) y la marea astronómica. En trabajos posteriores el dominio se redujo, se mejoró la información batimétrica y se revisaron otras características sobre la implementación del modelo para mejorar la representación de la marea astronómica en el Río de la Plata y su Frente Marítimo (Fernández, 2011). La versión más reciente incluye como forzante atmosférico en la superficie libre los vientos provenientes del reanálisis NCEP-CFSR (Saha et. al. 2010), la cual fue calibrada y validada utilizando datos de niveles en varias estaciones del dominio de cálculo (Martínez et al. 2015).

En este trabajo no se utiliza estrictamente la última versión del modelo denominado ASTide, debido a que se realizaron ciertas modificaciones para adaptarlo a su uso en el presente estudio. Por esta razón en lo que sigue se refiere al modelo como modelo regional.

5.3.1 Dominio y batimetría

El dominio de cálculo y la batimetría del modelo regional se presentan en la Figura 11. El dominio está comprendido entre las latitudes [22°S; 54.4°S] y las longitudes [70°W; 45.5°W]. La malla está estructurada en latitud-longitud y tiene una discretización constante de 0.1°.

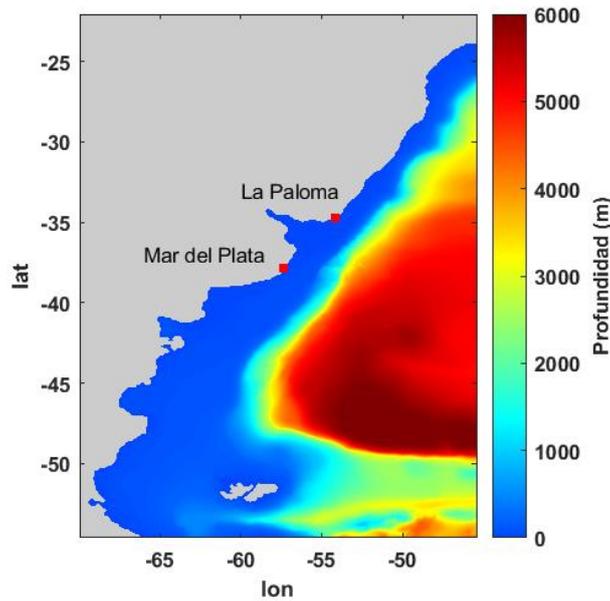


Figura 11- Dominio y batimetría del modelo regional.

La batimetría del área de interés fue generada a partir de datos batimétricos digitalizados extraídos del GEBCO (General Bathymetric Chart of the Ocean) para la zona del dominio exterior al Río de la Plata, y a partir de una carta batimétrica del proyecto FREPLATA y de una serie de datos de batimetría provistos por el Servicio de Hidrografía Naval de la Argentina (SHN) para la zona del Río de la Plata. Se considera 1m de profundidad mínima para evitar inestabilidades del modelo. Por otro lado, para representar la línea de costa de la región de estudio se utilizaron datos extraídos del NOAA/NGDC Marine Geology and Geophysics Division.

5.3.2 Condiciones de borde

La marea meteorológica en la zona es generada en el dominio del modelo por el efecto de vientos y presiones en la superficie libre. En la superficie libre se impone como condición de borde el efecto del viento y presiones obtenidos del reanálisis del National Centers for Environmental Prediction de USA, NCEP-CFSR (Saha et. al., 2010) de 6 hs de resolución temporal y 0.5º de resolución espacial. El coeficiente de arrastre de viento en la implementación utilizada es calculado a partir de la formulación de Large & Ponds (Ec. 23) que relaciona linealmente dicho coeficiente con la intensidad del viento.

$$C_D = 0,44 + 0,63|\vec{W}|$$

Ecuación 23

En las fronteras laterales abiertas se deben imponer valores de las variables de cálculo de forma de garantizar que la información correspondiente a lo que sucede fuera del dominio ingrese a la zona de cálculo y deben permitir que las ondas del interior del dominio se propaguen a través de las mismas y que el fluido pase libremente por éstas. La condición de nivel se utiliza en las fronteras influenciadas por la marea, la de caudal para representar la descarga de afluentes, y también se pueden imponer velocidades, temperaturas, salinidad, etc. Por otro lado, el MOHID permite usar el esquema de relajación Blumberg-Kantha como condición de borde en la frontera

abierta (Ec. 24), la cual se encarga de transmitir la información de un modelo global a un modelo regional.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + c n \nabla \eta = \frac{\eta_{ref} - \eta}{T_{lag}}$$

Ecuación 24

Donde η es el nivel de la superficie libre calculado con el modelo, η_{ref} es el nivel de la superficie libre impuesto por la solución de referencia, c es la velocidad de fase de la onda y T_{lag} el tiempo de relajación.

La condición de borde de la frontera oceánica es utilizada para imponer el efecto de la marea astronómica sobre el dominio de cálculo. Para imponer la marea astronómica en el dominio de cálculo se calcula la elevación de la superficie libre en celda por medio de la frontera oceánica (102 celdas en la frontera Sur y 152 en la Este, totalizando 254 celdas del borde) a partir de la superposición de 13 componentes armónicas de la marea: M2, N2, S2, K2, 2N2, O1, Q1, K1, P1, Mf, Mm, Mtm, MSqm. Los valores de las amplitudes y fases de estas componentes de la marea astronómica se extraen de la solución del atlas global de Mareas FES2004 (Lyard et al, 2006).

5.3.3 Características de la configuración utilizada

La versión del modelo AStide de la cual se parte fue calibrada para representar los niveles en Mar del Plata y La Paloma en 2014 (Fossati et al. 2014). La metodología de calibración consistió en la realización 32 simulaciones de prueba de corta duración, cambiando en cada una de ellas alguno de los parámetros de calibración del modelo, analizando también la sensibilidad del modelo a dichos parámetros: coeficiente de arrastre del viento, número de Manning (n), influencia de presiones en superficie (observando cambios al anular el forzante de presión), modificación de la parametrización de la turbulencia, modificación de inputs no fundamentales correspondientes al modelo hidrodinámico, modificaciones en la condición de relajación de la frontera abierta y modificaciones en el paso de tiempo de cálculo, dt .

A pesar de que luego del proceso de reajuste no se considera la presión atmosférica como forzante en superficie (Martínez et al. 2015), en el presente estudio sí se introdujo el forzante de presión en superficie debido a la necesidad de analizar su influencia y se evalúa la configuración en la sección siguiente. Las características principales de la configuración utilizada se resumen en:

- Paso de tiempo de cálculo $dt=180$ s.
- Presión atmosférica activada.
- Formulación de Large & Ponds para determinar la tensión de corte del viento.
- Número de Manning igual a 0.005.
- Formulación de Smagorinsky con coeficiente igual a 0,1 para el cálculo de la viscosidad horizontal.
- Condición de relajación Blumberg-Kantha en las fronteras abiertas con tiempo de relajación de 100 s en aguas profundas, 1000 s en aguas poco profundas y transición lineal.
- Condición inicial: velocidades nulas y nivel medio de 0.91 m.
- Caudal medio afluente de los ríos Paraná y Uruguay 25.000 m³/s.

5.3.4 Evaluación de la calidad del modelo para el período histórico

En esta sección se evalúa la calidad del modelo regional en la representación de la dinámica de marea para el período histórico simulado (1985-2005) manteniendo los forzantes descriptos en las secciones anteriores. Para realizar la evaluación se utilizan datos medidos en las estaciones mareográficas de La Paloma y Mar del Plata, que se muestran en la Figura 11 representativas de la dinámica del modelo regional en la zona de interés del Río de la Plata y Frente Marítimo.

Se cuenta con varios años de datos medidos comprendidos en el período histórico. Para la validación se consideran solamente los años que presentan menos del 50% de datos faltantes, considerando datos medidos horarios. En la Tabla 3 se muestran la cantidad de datos horarios medidos disponibles entre el año 1985 y 2005. En verde se muestran los años con más de 50% de datos medidos y por lo tanto los años utilizados para validar la calidad del modelo en cada estación.

LA PALOMA											
AÑO	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
#	1106	3259	6455	3322	7976	8509	6683	0	0	0	0
%	13	37	74	38	91	97	76	0	0	0	0
AÑO	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	
#	0	0	0	7422	6833	7641	8288	8509	7543	7030	
%	0	0	0	85	78	87	95	97	86	80	
MAR DEL PLATA											
AÑO	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
#	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AÑO	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	
#	0	0	8020	0	0	0	0	0	7168	8038	
%	0	0	92	0	0	0	0	0	82	92	

Tabla 3- Cantidad y porcentaje (considerando frecuencia horaria) de datos medidos en las estaciones de La Paloma y Mar del Plata durante el período histórico 1985-2005.

Para estudiar la calidad del modelo se calculan el sesgo (BIAS), el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de correlación (r), según expresan las ecuaciones 25, 26 y 27 respectivamente.

$$BIAS = \overline{y_m - y_o}$$

Ecuación 25

$$RMSE = \sqrt{(y_m - y_o)^2}$$

Ecuación 26

$$R = \frac{\sum(y_m - \overline{y_m}) - (y_o - \overline{y_o})}{\sqrt{\sum(y_m - \overline{y_m})^2} \sqrt{\sum(y_o - \overline{y_o})^2}}$$

Ecuación 27

Donde y_m hace referencia a los datos modelados e y_o a los datos medidos (observados). Además, se presentan los diagramas de dispersión, que muestra según una escala de colores la densidad de datos, superpuestos por los gráficos cuantil-cuantil para ambas estaciones para la

totalidad de los datos considerados en la validación. Se consideran 25 cuantiles que están equiespaciados en escala Gumbel, siendo 0.001 el menor y 0.999 el mayor.

En la Tabla 4 se muestra para cada año, los valores de BIAS, RMSE y r en la estación de La Paloma. Además, se muestra al final de la tabla los estadísticos calculados con la totalidad de los datos considerados. Se observa un sesgo de hasta 23 cm (correspondiente al año 2003), mientras que el error medio cuadrático máximo es de 32 cm que se da en los años 2003 y 2004. Respecto al coeficiente de correlación se observa buena correlación entre datos medidos y modelados que comprende valores entre 0.69 y 0.76. Los valores calculados para todo el período muestran un sesgo de 16 cm, un RMSE de 28 cm y una correlación de 0.71.

La Paloma			
Año	BIAS (m)	RMSE (m)	r
1987	-0.12	0.25	0.72
1989	-0.16	0.26	0.71
1990	-0.17	0.28	0.73
1991	-0.12	0.25	0.71
1999	-0.13	0.25	0.76
2000	-0.08	0.22	0.70
2001	-0.18	0.27	0.73
2002	-0.20	0.29	0.73
2003	-0.23	0.32	0.71
2004	-0.19	0.32	0.70
2005	-0.19	0.31	0.69
TOTAL	-0.16	0.28	0.71

Tabla 4- Valores de BIAS, RMSE y r para cada año con más del 50% de los datos medidos, y para el total de datos utilizados para validación en La Paloma.

En la Figura 12 (panel izquierdo) se muestra el diagrama de dispersión para la totalidad de los datos, en negro el gráfico cuantil-cuantil y en rojo la recta identidad. Se observa en general un buen comportamiento por parte del modelo, aunque se observa un corrimiento de la nube de puntos que indica una subestimación general por parte del modelo, esperable a partir de los valores del sesgo, y una leve rotación en sentido horario más notoria hacia los valores altos. La subestimación de los niveles por parte del modelo se puede ver claramente a partir del gráfico cuantil-cuantil, de donde se desprende que los cuantiles modelados no se despegan más de 0.32 m por debajo de la línea identidad.

Por último para la estación de La Paloma, en la Figura 13 se muestra la serie temporal de los niveles medidos y modelados durante el año 1990, por ser uno de los que presenta más datos medidos. Se vuelve a notar el sesgo que muestra la Tabla 4, pero a pesar de esta diferencia se observa como el modelo capta bien las oscilaciones de la marea, aunque se encuentre generalmente por debajo de los niveles medidos. También se observa que capta los eventos de mayor nivel, aunque no logre alcanzar los picos.

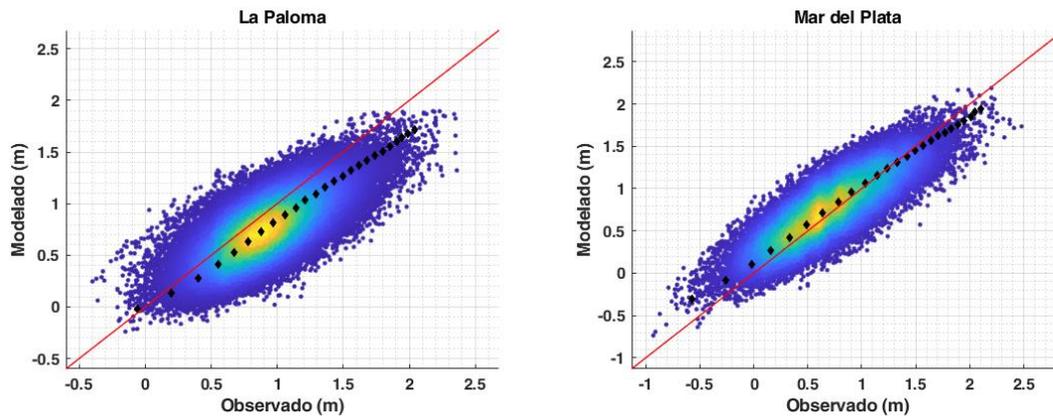


Figura 12-Diagrama de dispersión y grafico cuantil-cuantil (negro) de niveles modelados (m) vs niveles medidos (m) en La Paloma (panel izquierdo) y Mar del Plata (panel derecho) para los años con más de 50% de datos medidos considerando frecuencia horaria de medición. La recta roja representa la recta identidad. La escala de colores representa la densidad de datos (azul menor-amarillo mayor).

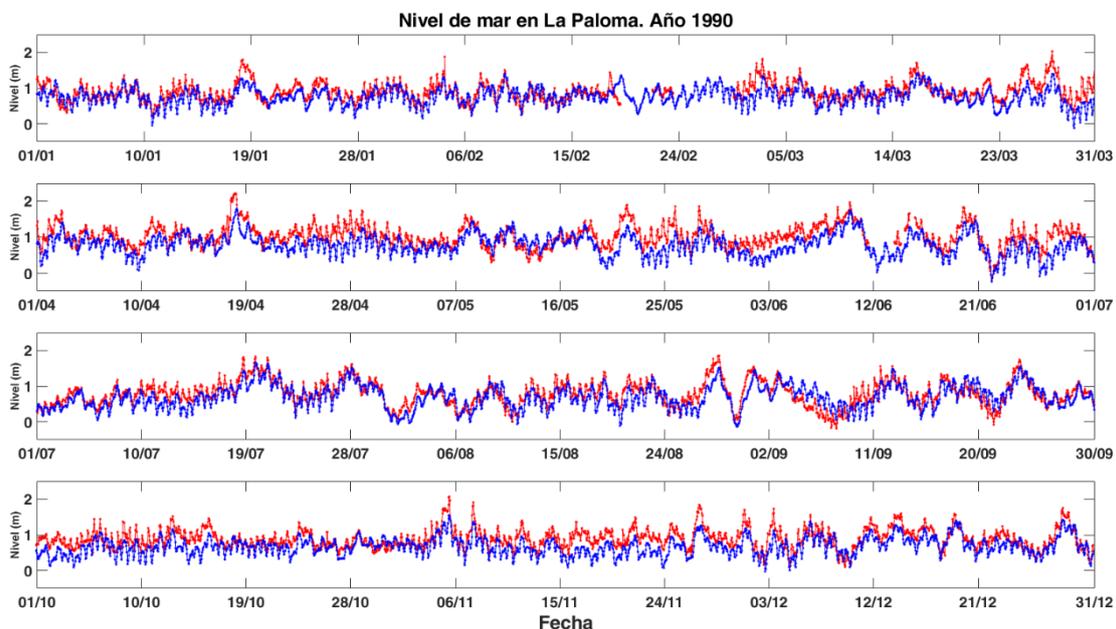


Figura 13-Serie temporal de niveles medidos (rojo) y niveles modelados (azul), en La Paloma durante el año 1990 que cuenta con un 97% de datos medidos considerando frecuencia horaria de medición.

En la Tabla 5 se muestra para la estación de Mar del Plata y los años 1993, 1997, 1998, 2004 y 2005 (únicos años que superan el 50% de datos horarios medidos dentro del período histórico) los valores de BIAS, RMSE y r . En la última fila se muestran los estadísticos para la totalidad de los datos considerados para validar.

En esta estación se observa sesgo bajo; mientras que en La Paloma se tenía un sesgo total de 16 cm en Mar del Plata se observa un sesgo total de 6 cm. Además, el máximo sesgo se da para para el año 1993 y no supera los 11 cm. Respecto al error medio cuadrático se tiene un valor para todos los datos de 24 cm, mientras que el máximo es de 26 cm y se da para el año 1997. Por otra parte, los coeficientes de correlación entre datos medidos y modelados son muy buenos, superando en todos los casos 0.8.

Mar del Plata			
Año	BIAS (m)	RMSE (m)	r
1993	0.11	0.25	0.85
1997	0.10	0.26	0.84
1998	0.08	0.24	0.84
2004	0.05	0.24	0.85
2005	0.02	0.24	0.84
TOTAL	0.06	0.24	0.84

Tabla 5- Valores de BIAS, RMSE y r para cada año con más del 50% de los datos medidos, y para el total de datos utilizados para validar en Mar del Plata.

En la Figura 12 (panel derecho) se muestra el diagrama de dispersión para la totalidad de los datos, en negro el gráfico cuantil-cuantil y en rojo la recta identidad. Se observa en términos de valores medios un muy buen comportamiento por parte del modelo. La nube de puntos se encuentra notoriamente alineada con la recta identidad, aunque mínimamente rotada en sentido horario. Esta rotación se vuelve más notoria al observar los cuantiles. Desde el punto de vista cuantitativo se observa que los cuantiles graficados no se desprenden por más de 20 cm por debajo de la recta identidad ni 27 cm por sobre la recta identidad.

Por último, en la Figura 14 se muestra la serie temporal de datos medidos y modelados durante el año 1998 en Mar del Plata. Se observa que el modelo reproduce muy bien las oscilaciones asociadas a la marea semidiurna, aunque en algunos casos no alcanza los picos más altos o bajos de nivel. A pesar de lo anterior el comportamiento es satisfactorio.

En términos generales a partir de la validación del modelo regional en dos estaciones situadas en la zona exterior del estuario del Río de la Plata, una al Norte y una al Sur, se observa que el modelo representa correctamente las ondas de marea que se ingresan al modelo local como condición de borde.

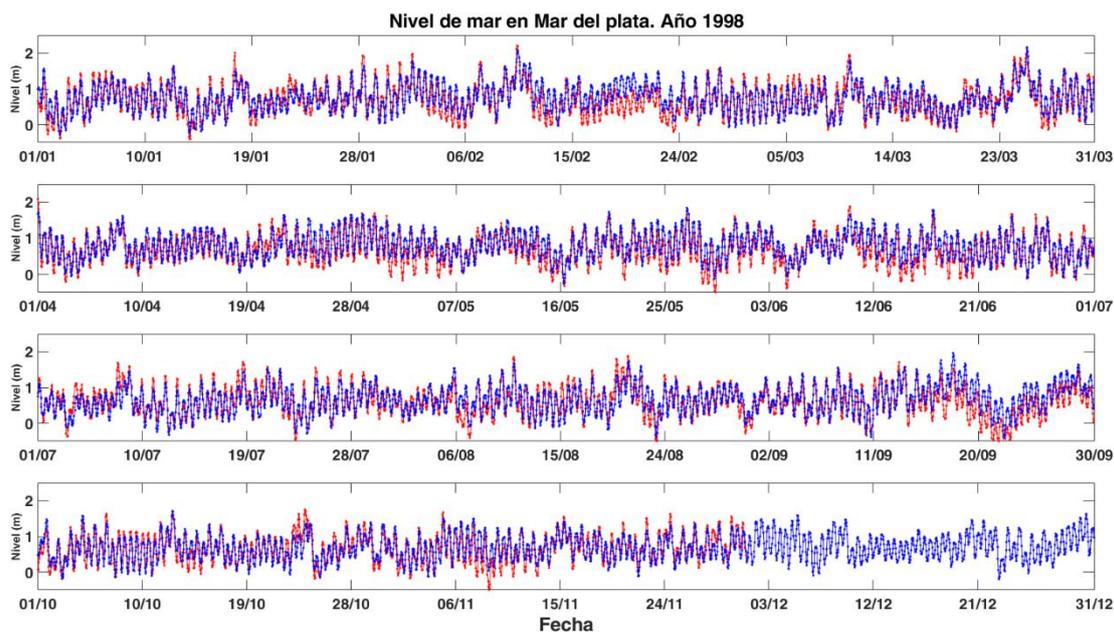


Figura 14- Serie temporal de niveles medidos (rojo) y niveles modelados (azul) en Mar del Plata, durante el año 1998, el cual cuenta con un 92% de datos medidos considerando frecuencia horaria de medición.

5.4 Modelo local

Como punto de partida para la modelación local se cuenta con el reanálisis de niveles realizado por el IMFIA en el marco del convenio entre Universidad de la Republica y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (IMFIA, 2018a). Dicho reanálisis surge de la implementación del modelo hidrodinámico TELEMAC-MASCARET (Herouvet, 2007), en su versión 2D, a un dominio que comprende al Río de la Plata y el Frente Marítimo. El sistema TELEMAC-MASCARET fue creado y desarrollado principalmente por el Laboratorio Nacional de Hidráulica y el Ambiente, un departamento de la División para la Investigación y el Desarrollo de la Compañía de Electricidad Francesa (EDF – R&D). Es un sistema de código abierto desarrollado por el consorcio Open TELEMAC-MASCARET del cual participan instituciones de varios países europeos (www.opentelemac.org). El sistema ofrece diversos modelos numéricos que permiten el estudio de la hidrodinámica, transporte de sustancias y sedimentos.

El modelo TELEMAC-2D hidrodinámico bidimensional integrado en vertical resuelve mediante el método de elementos finitos sobre mallas no estructuradas las ecuaciones gobernantes de aguas someras que se presentaron en la sección 5.1. Este modelo permite también resolver de forma simultánea y acoplada la ecuación de transporte de sustancias disueltas y la densidad promedio en la vertical puede depender de la concentración de dicha sustancia, como es en el caso de un estuario la salinidad.

El modelo fue calibrado y validado utilizando datos medidos de niveles en diversas estaciones de la costa uruguaya y algunas de la zona central del Río de la Plata. Una descripción más detallada de la implementación del modelo, su calibración y validación se puede encontrar en el informe del proyecto (IMFIA, 2018a). En esta sección se describen brevemente algunas características del modelo y se evalúa su calidad en la representación de los niveles en el periodo histórico.

5.4.1 Dominio y batimetría

El dominio del modelo local cubre todo el Río de la Plata y su Frente Marítimo. El límite sur sobre la costa argentina es Mar del Plata mientras que el límite norte sobre la costa brasilera es Río Grande. La zona del Frente Marítimo se extiende hasta los 200 m de profundidad de la plataforma continental. Los límites del dominio de cálculo en la frontera oceánica se ubicaron normales a la costa. De esta forma que la frontera abierta se sitúa aproximadamente en forma paralela a la línea Punta Rasa – Punta del Este y la frontera Sur se posiciona de tal manera que la principal componente de marea (la componente M2) ingresa al dominio de cálculo prácticamente con su frente de onda paralelo a la frontera. Esta condición de ingreso de la onda es favorable para la modelación según estudios anteriores realizados en el IMFIA (Fossati and Piedra-Cueva, 2013; Fossati and Piedra-Cueva, 2008).

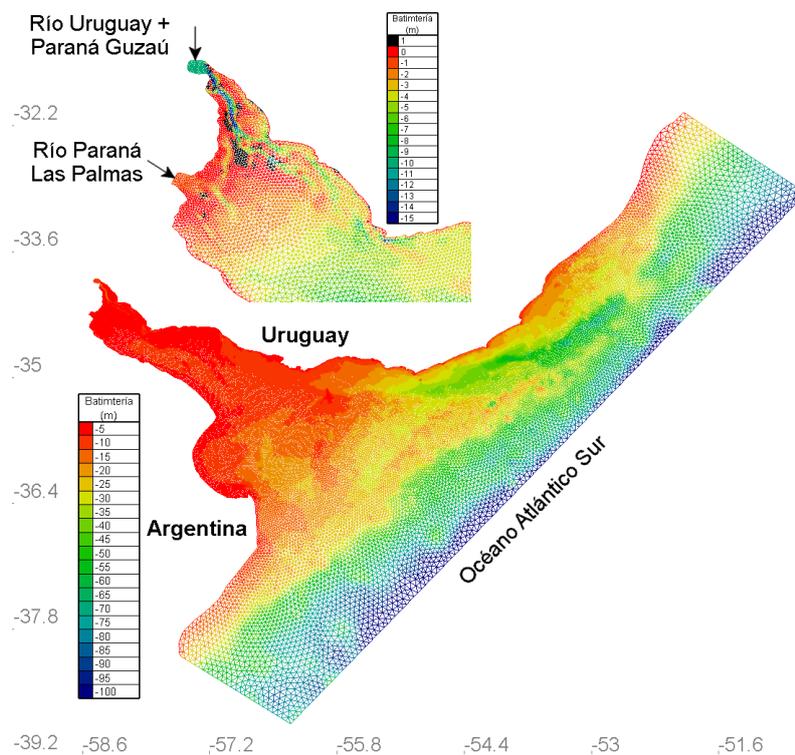


Figura 15: Malla de cálculo y batimetría (m) del modelo local.

La malla fue generada con el software Blue Kenue y es una malla de volúmenes finitos de tipo triangular, la cual se muestra en la Figura 15. La misma cuenta con 37.534 nodos y 73.768 elementos. El tamaño de los elementos triangulares es variable, teniendo los de mayor tamaño 7 km de lado correspondientes al borde oceánico. En la zona estuarina los elementos tienen lados de 2 km aproximadamente y sobre la costa uruguaya alcanza una resolución de 1 km de lado.

La batimetría del dominio de cálculo se confeccionó a partir de información cartográfica correspondiente a las cartas náuticas del SOHMA (Uruguay) y del SHN (Argentina).

5.4.2 Condiciones de borde

Respecto a la condición de borde en la superficie libre el modelo permite definir un coeficiente de arrastre del viento constante o utilizar la formulación de Flather (1976) que calcula el coeficiente C_D de la ecuación 23, en función del módulo de la velocidad del viento a 10 m.

Respecto a los bordes de la frontera oceánica, la onda de marea relevante se le impone mediante los resultados obtenidos del modelo regional. El modelo permite imponer una condición de borde del tipo Dirichlet, lo cual implica que se impone el valor exacto de la variable en cuestión.

Los datos de vientos y presiones se extraen de los reanálisis del National Centers for Environmental Prediction de USA, NCEP-CFSR (Saha et. al., 2010). En este caso se trabajó con series horarias, compuestas por datos de reanálisis cada 6 hs y datos de pronóstico entre cada uno de ellos. Mientras los datos de viento se descargaron con una resolución espacial de $0.205^\circ \times 0.204^\circ$, los de presión tienen una resolución espacial de $0.312^\circ \times 0.312^\circ$.

Por ultimo respecto al caudal fluvial, en el caso del Río de la Plata por la frontera Oeste ingresa el mayor aporte de caudal a través de la descarga de los ríos Paraná y Uruguay. Además, también se tiene como condición de borde fluvial el ingreso del caudal del Río Santa Lucia. Las secciones de ingreso de aporte definidas en la zona interior del Río de la Plata se presentan en la Figura 14. En la implementación original del modelo (IMFIA 2018), se le ingresaba como condición de borde fluvial la serie de caudales medios diarios. En el caso de la implementación realizada para el presente trabajo se ingresó para cada descarga representada un caudal medio. La razón de lo anterior es que las series temporales reales de caudales son consistentes con los forzantes atmosféricos de reanálisis pero no así con los forzantes atmosféricos de los GCM, que como ya se indicó antes representan trayectorias igual de probables pero no reales precisamente, y escapa del alcance de este trabajo de tesis calcular series de caudales consistentes con cada uno de los modelos atmosféricos.

5.4.3 Características de la configuración utilizada

En estudios previos el modelo fue calibrado considerando diversos valores del número de Manning y formulación de tensión de corte del viento. Se realizaron más de 40 simulaciones de calibración, comparando resultados obtenidos en 3 estaciones correspondientes a la costa uruguaya: La Paloma, Montevideo y Colonia. Las características correspondientes a la configuración utilizada como referencia en el presente trabajo se describen a continuación:

- Paso de tiempo de cálculo $dt=60$ s.
- Formulación de Flather para determinar la tensión de corte del viento.
- Número de Manning variable en el dominio (0.007 en la zona interior del estuario y 0.15 en zona exterior e intermedia).
- Condición inicial: velocidades nulas y nivel medio de 0.91 m.
- Campo de salinidad inicial: Se utiliza como condición inicial el instante final de una corrida aleatoria de 1 año de duración, de forma de tener un campo de salinidad inicial más cercano a la realidad. Notar que las simulaciones realizadas en este trabajo tienen 2 meses de calentamiento cuyos resultados no se utilizan lo cual asegura que el campo de salinidad se encuentra estabilizado para los resultados utilizados.

- Caudal fluvial medio para los ríos Santa Lucia; 180 m³/s; Uruguay – Paraná Guazú; 20.547 m³/s; Uruguay- Paraná Las Palmas; 5.825 m³/s.

5.4.4 Evaluación de la calidad del modelo para el período histórico

En esta sección se evalúa la calidad del modelo local para representar los niveles durante el período histórico. Para esto, además de comparar con la estación La Paloma (utilizada para evaluar el modelo regional) se comparan resultados con otras 5 estaciones mareográficas: Punta del Este, Montevideo, Colonia, Juan Lacaze y Pilote Norden. La localización de las estaciones se muestra en la Figura 16.

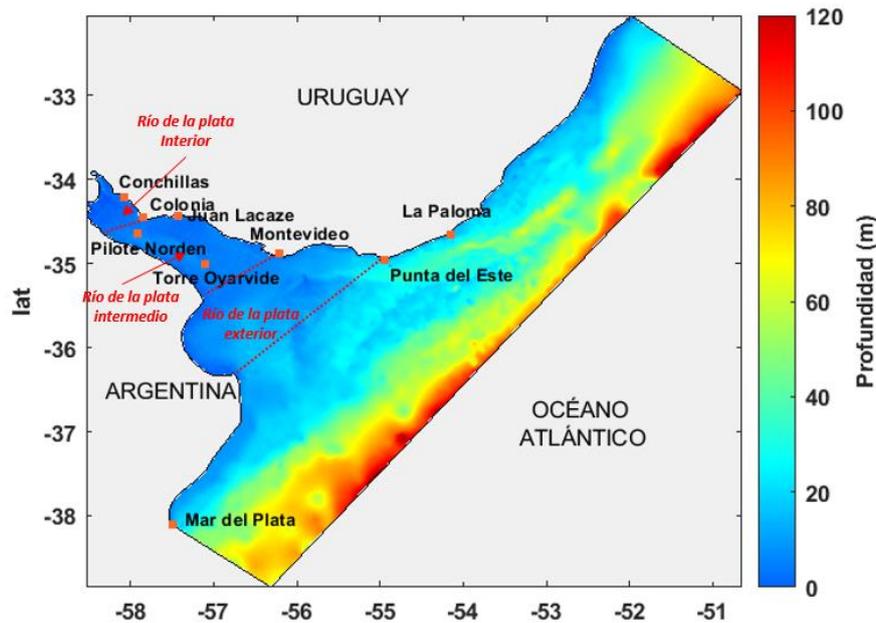


Figura 16- Ubicación de las estaciones mareográficas consideradas para la comparación de cuantiles del modelo local con medidas.

Al igual que para el modelo regional, se utilizan para comparar los años con menos de 50% de datos horarios faltantes. En la Tabla 6 se muestran los datos disponibles por año y en verde los años que cumplan dicha condición y que por tanto son utilizados para la evaluación del modelo. Para analizar la calidad del modelo se utilizan los estadísticos descriptos en las ecuaciones 25, 26 y 27; BIAS, RMSE y r , los gráficos de dispersión y los gráficos cuantil-cuantil comparando los mismo cuantiles descriptos para el modelo regional.

En la Tabla 7 se muestran los valores de los estadísticos obtenidos para la totalidad de los datos comparados en cada estación. Se observa que el peor desempeño del modelo se da en la estación de Punta del Este, donde se tiene el BIAS más alto, alcanzando los 12 cm y 31 cm respectivamente, y el coeficiente de correlación más bajo.

LA PALOMA											
AÑO	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
#	1106	3259	6455	3322	7976	8509	6683	0	0	0	0
%	13	37	74	38	91	97	76	0	0	0	0
AÑO	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	
#	0	0	0	7422	6833	7641	8288	8509	7543	7030	
%	0	0	0	85	78	87	95	97	86	80	
PUNTA DEL ESTE											
AÑO	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
#	4407	4117	8185	6621	4706	7124	5567	7733	5906	62	8329
%	50	47	93	76	54	81	64	88	67	1	95
AÑO	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	
#	563	8327	8683	8665	8784	7320	8424	7189	4923	0	
%	6	95	99	99	100	84	96	82	56	0	
MONTEVIDEO											
AÑO	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
#	7397	7854	8500	8229	8195	8398	8352	8675	8642	7807	3
%	84	90	97	94	94	96	95	99	99	89	0
AÑO	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	
#	2875	8518	8563	7120	8203	8460	7807	7511	8713	5486	
%	33	97	98	81	94	97	89	86	99	63	
JUAN LACAZE											
AÑO	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
#	1095	1095	1095	1250	1432	1186	1095	4900	1144	1809	6696
%	13	13	13	14	16	14	13	56	13	21	76
AÑO	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	
#	4373	804	509	4756	5888	4971	8701	8759	8782	8740	
%	50	9	6	54	67	57	99	100	100	100	
COLONIA											
AÑO	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
#	1078	3618	8235	7075	3977	5796	6984	7492	5469	6402	7758
%	12	41	94	81	45	66	80	86	62	73	89
AÑO	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	
#	8271	8684	8137	7872	8036	7636	5782	7741	8703	6073	
%	94	99	93	90	92	87	66	88	99	69	
PILOTE NORDEN											
AÑO	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
#	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AÑO	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	
#	0	0	0	0	0	0	0	8752	8451	6307	
%	0	0	0	0	0	0	0	100	96	72	

Tabla 6- Cantidad y porcentaje de datos de nivel medidos (considerando frecuencia horaria), en las estaciones de La Paloma, Punta del Este, Montevideo, Colonia, Juan Lacaze y Pilote Norden.

Estación	BIAS (m)	RMSE (m)	r
La Paloma	-0.09	0.24	0.77
Punta del Este	-0.12	0.31	0.65
Montevideo	-0.002	0.25	0.80
Colonia	-0.08	0.28	0.82
Juan Lacaze	-0.02	0.25	0.84
Pilote Norden	-0.11	0.29	0.84

Tabla 7- Valores de BIAS, RMSE y r para el total de datos usados para comparar en La Paloma, Punta del Este, Montevideo, Colonia, Juan Lacaze y Pilote Norden.

En la Figura 17 se muestran los diagramas de dispersión y los gráficos cuantil-cuantil, junto con la recta identidad a modo de referencia en rojo, para todas las estaciones de comparación. En términos generales se observa un muy buen comportamiento por parte del modelo en todas las estaciones. Las nubes de puntos se encuentran alineadas con la recta identidad, lo cual se observa claramente en los gráficos cuantil-cuantil.

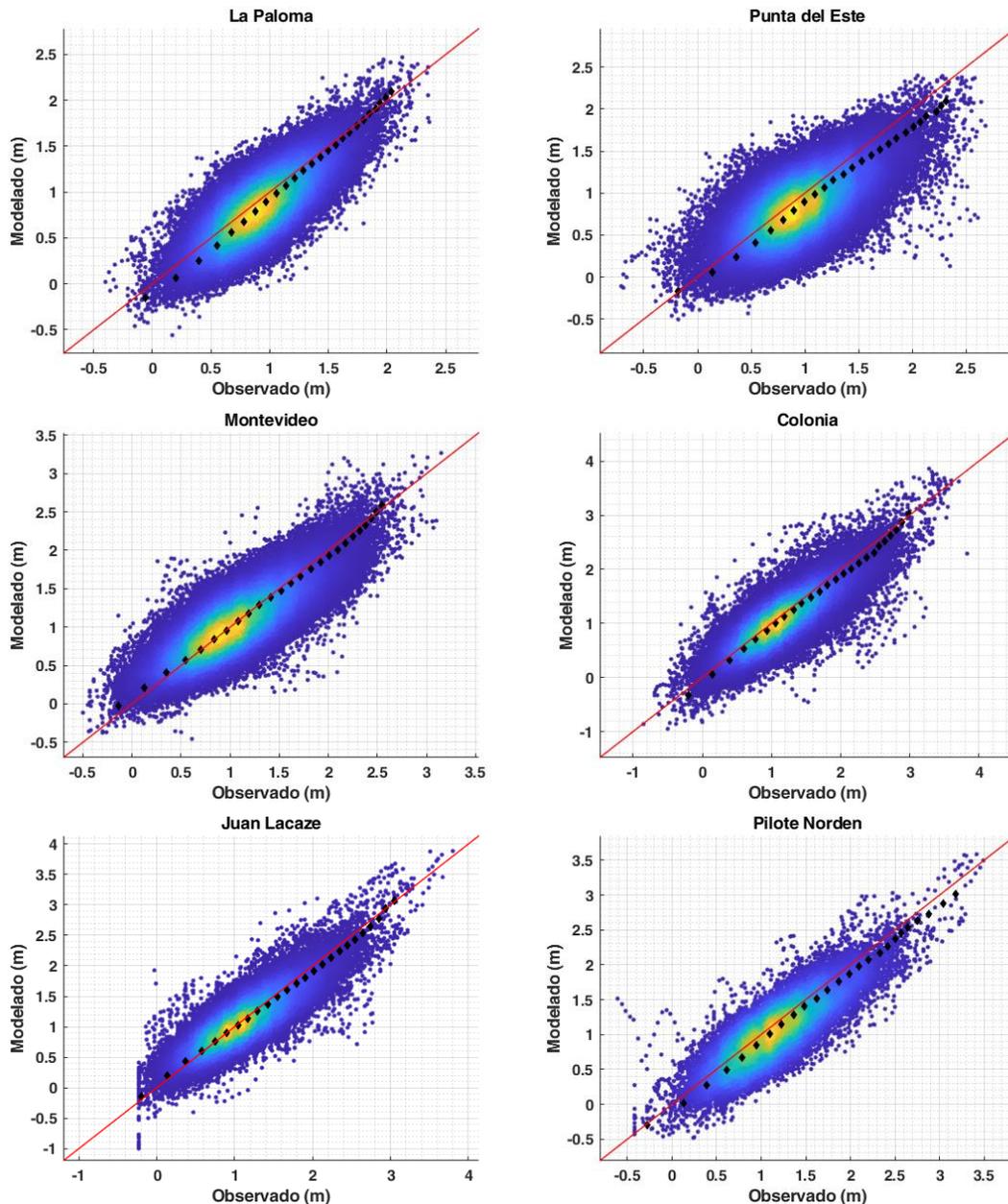


Figura 17-Diagrama de dispersión y grafico cuantil-cuantil (negro) de niveles modelados (m) vs niveles medidos (m) en (de izquierda a derecha de arriba hacia abajo): La Paloma, Punta del Este, Montevideo, Colonia, Juan Lacaze, y Pilote Norden. Para los años con más de 50% de datos medidos considerando frecuencia horaria de medición. La recta roja representa la recta identidad. La escala de colores representa la densidad de datos (azul menor-amarillo mayor).

Al comparar todas las estaciones se identifica claramente el peor comportamiento en Punta del Este, donde la nube de puntos resulta más dispersa que en el resto de las estaciones. En particular se destaca el buen comportamiento del modelo en la estación de Juan Lacaze donde se alcanza el coeficiente de correlación más alto y un error medio cuadrático que no supera los

25 cm. Además, el sesgo es de 2 cm. En Pilote Norden se observa aún muy buen comportamiento, sin embargo, se alcanzan errores medios más altos y un sesgo más elevado, que se desprende tanto del gráfico como de la tabla de estadísticos.

5.5 Proyecciones de aumento de nivel medio del mar regional (NMMR)

Para lograr simular de forma correcta los cambios en el nivel de mar en los bloques temporales futuros es importante conocer cómo se estima que cambiara el nivel medio del mar a lo largo del tiempo. El objetivo de esta sección es analizar la variabilidad espacial del cambio en el nivel medio del mar en la zona de interés, tanto en el Océano Atlántico Sur como en la región comprendida por el Río de la Plata y el Frente Marítimo. Luego se busca determinar la forma de introducir el efecto del aumento en el nivel medio del mar en los modelos implementados, especialmente se busca determinar si es posible considerar valores medios espaciales sin perder información relevante. La base teórica de los fenómenos que contribuyen al aumento del nivel medio del mar se explica brevemente en la sección 3.3.1.

Se analizan las proyecciones de aumento de NMMR para los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5 obtenidos a partir de los datos utilizados para realizar los análisis que se muestran en el capítulo 13 del manual del IPCC AR5 (IPCC, 2013). Los resultados que se muestran en el manual (con mayor detalle) se encuentran disponibles para su acceso al público lo cual permitió profundizar en el análisis enfocado en la región de estudio. En particular los datos se encuentran disponibles para su acceso al público en la página web de la Universidad de Hamburgo².

El set de datos disponible se encuentra conformado por 19 archivos en formato netcdf, de los cuales se utilizan los que se listan a continuación para el análisis llevado a cabo.

- Aumento del nivel medio del mar total (diferencia entre media de 1986-2005 y media de 2081-2100) para escenarios RCP 4.5 y escenario RCP 8.5.
- Contribución de cada componente al aumento del nivel medio del mar total (diferencia entre media de 1986-2005 y media de 2081-2100) para escenarios RCP 4.5 y escenario RCP 8.5.
 - SMB Groenlandia
 - SMB Antártida
 - Contribución dinámica de Groenlandia
 - Contribución dinámica de Antártida
 - Contribución de los glaciares
 - Contribución de aguas terrestres
 - Contribución de GIA
 - Contribución de componentes oceánicas
- Serie temporal del aumento de nivel medio del mar total (con base en la media de 20 años entre 1986-2005)
- Serie temporal de la contribución de cada componente al aumento del nivel medio del mar total (mismas componentes descritas arriba).
- Límite superior e inferior del intervalo de confianza del 90% para cada variable disponible.

² <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/daten/ocean/ar5-slr.html>

El dominio de los datos disponibles es global, los datos se encuentran en formato latitud longitud y la resolución es $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. Como primer paso se limita el dominio global al comprendido por el Océano Atlántico Sur (lat [-54.5,-22] lon [-70,-45.5]). Debido a que se simulará solo un caso para cada bloque futuro RCP 4.5 y RCP 8.5, se determina utilizar el valor medio de aumento de nivel de mar, por lo cual no se hace particular énfasis en los límites superiores e inferiores de los intervalos de confianza.

En la Figura 18 se muestran los aportes al cambio en el nivel de mar de cada grupo contribuyente para una localidad representativa de la zona de estudio (lon -55.5, lat -36.5), como la diferencia entre la media del período 2081-2100 y el período 1986-2005, para ambos escenarios RCP. En la figura se agrupan los aportes de Groenlandia y la Antártida (SMB y dinámico), de forma que se pasa de 8 contribuyentes a 6. Como primera observación se tiene que las componentes relacionadas a los océanos, a los glaciares y a Groenlandia son las que aportan un mayor cambio en el nivel de mar, siendo su aporte mucho mayor que el de las componentes relacionadas a las aguas terrestres y al GIA. A modo de ejemplo, mientras que el aumento asociado a las componentes oceánicas alcanza los 20 cm al año 2100 en el escenario RCP4.5, y el de los glaciares los 15 cm, el aporte asociado a las aguas subterráneas no supera los 5 cm. En la Figura 19 se muestran los aportes al cambio en el nivel de mar de cada grupo contribuyente en el Océano Atlántico sur, en esta instancia todos los hielos se representan juntos. Se observa que los patrones de variabilidad para las componentes relacionadas a los hielos y al océano son muy similares para ambos escenarios RCP.

Se desprende de la figura que la componente relacionada al océano presenta una variabilidad de menor escala, que proviene de la componente dinámica del océano, y se debe a los vientos cambiantes en superficie y al contenido de calor e ingreso de agua dulce al océano (Slangen et al 2014). En la región observada, se tiene que los cambios asociados a esta componente, recorren valores desde los 10 cm hasta casi los 30 cm, rondando los 17 cm alrededor del Río de la Plata, para el escenario RCP 4.5. Para el escenario RCP 8.5 se tienen valores que recorren desde aproximadamente 16 cm hasta los 40 cm, rondando los 25 cm hacia la zona del Río de la Plata.

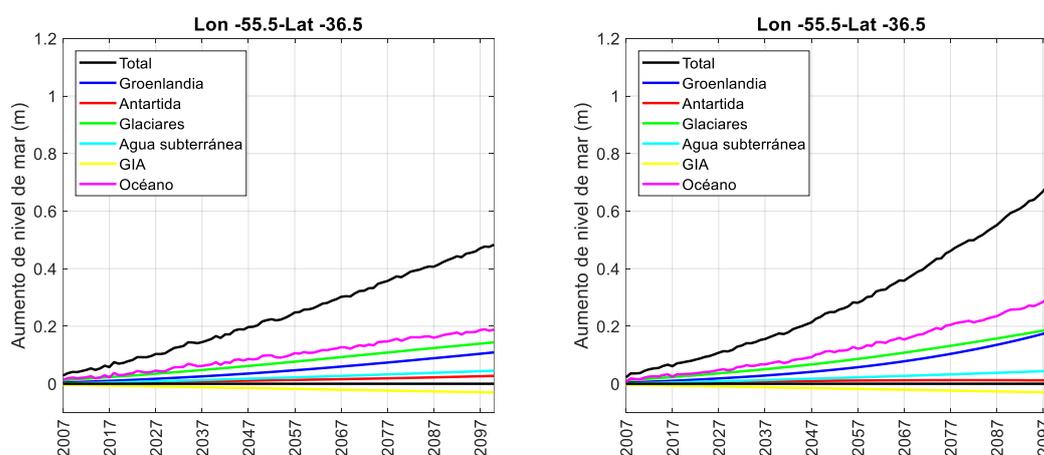


Figura 18- Aporte de cada componente al aumento del nivel medio del mar en relación a la media de 20 años entre 1986-2005 para una localidad representativa dentro del dominio del Río de la Plata y el Frente Marítimo (lon -55.5, lat -36.5), RCP 4.5 panel izquierdo y RCP 8.5 panel derecho.

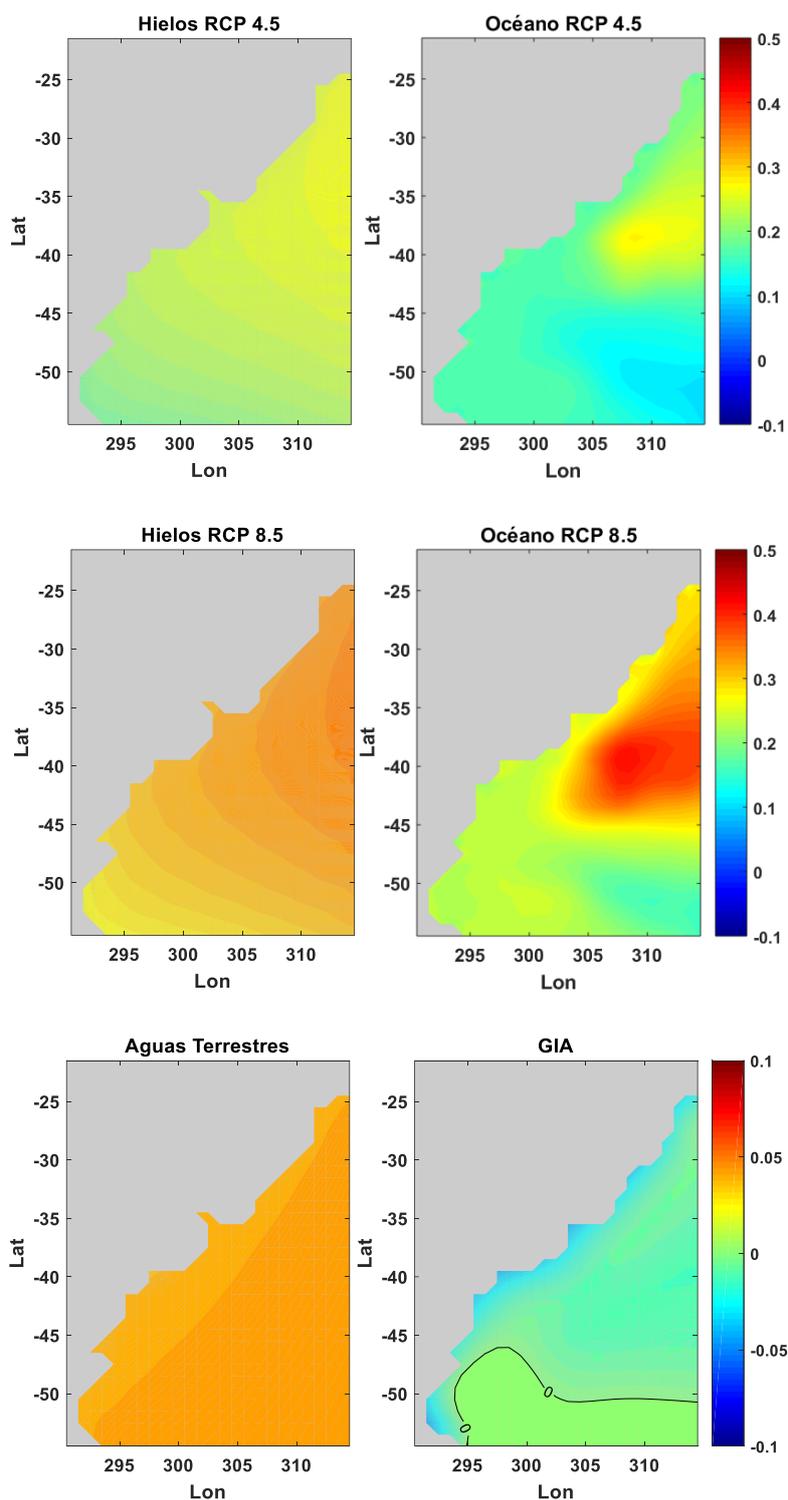


Figura 19- Proyección de cambio en el nivel de mar como la diferencia entre la media 2081-2100 menos la media de 1986-2005, para cada grupo contribuyente. En el panel superior la proyección para el escenario RCP 4.5, panel intermedio la proyección para el escenario RCP 8.5 y en el panel inferior las contribuciones independientes del escenario.

Se presta ahora especial atención a la variabilidad espacial dentro del dominio regional comprendido por el Océano Atlántico Sur, y también dentro del dominio del Río de la Plata y su Frente Marítimo. En la Figura 20 se muestra el cambio en el nivel de mar total (suma de todas

las componentes), como la diferencia entre la media entre el período 2081-2100 y la media en el periodo 1986-2005, para los escenarios futuros. Principalmente se observa que el rango de cambio en el nivel medio de mar total abarca aproximadamente el medio metro. Los mayores cambios se observan en la zona central de dominio y se extiende hacia el este, mientras que los menores cambios se observan en toda la zona sur del dominio. Enfocando la atención en el dominio local del Río de la Plata como una primera aproximación se podría concluir que en esa zona no se alcanza a ver diferencias espaciales importantes.

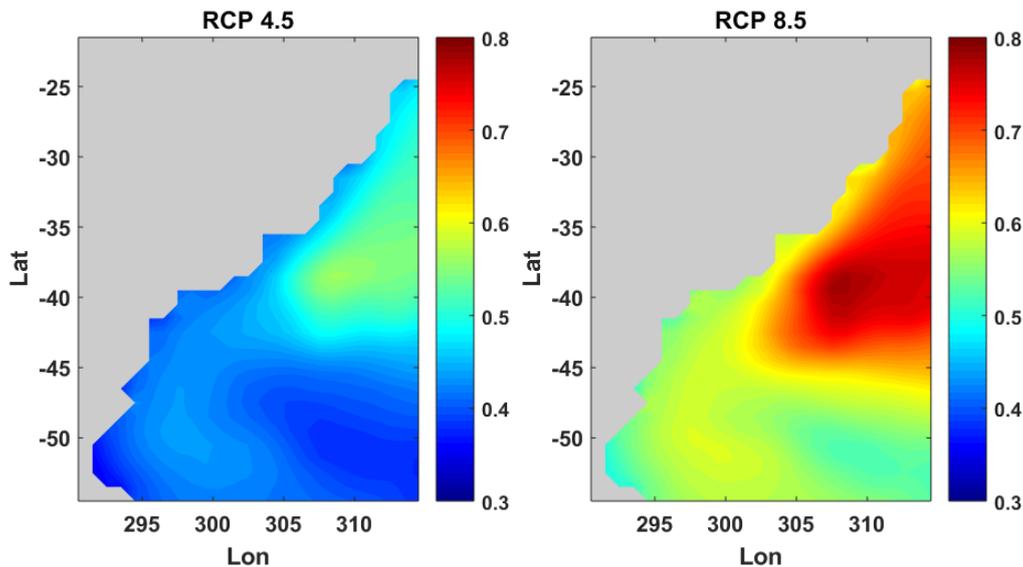


Figura 20- Cambio del nivel de mar total en el Océano Atlántico Sur calculado como la diferencia entre la media en el periodo 2081-2100 y la media del periodo 1986-2005 (m). Panel izquierdo RCP 4.5. Panel derecho RCP 8.5.

En la Figura 21 se muestra para los años 2026, 2045, 2081 y 2100 y los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, el porcentaje de la diferencia entre la media espacial del cambio en el NMM para el año correspondiente y el cambio correspondiente a cada punto del espacio. El porcentaje se obtiene en relación al cambio en el nivel medio total. Se observa que las mayores diferencias con la media espacial se encuentran en la zona central del dominio y en la zona sur de la costa argentina, alcanzando hasta 40%, consistente con la Figura 20.

Para analizar en profundidad el dominio del Río de la Plata y su Frente Marítimo se analizan los valores en 14 puntos ubicados dentro de dicho dominio. Se calculan las medias espaciales del aumento de nivel de mar para los años 2026, 2045, 2081 y 2100 y para ambos escenarios RCP4.5 y 8.5, considerando el dominio regional del Atlántico Sur y el dominio local del Río de la Plata. Los resultados se muestran en la Tabla 8, y se puede ver que las diferencias entre las medias espaciales no superan los 3 centímetros en el peor de los casos. Además, es importante notar que la diferencia del aumento entre años consecutivos incrementa hacia el final del periodo futuro, pero no supera una diferencia de 2.15 cm en el caso más severo.

Por tanto, debido a que en la zona de particular interés la media local no se aleja notoriamente de la media espacial regional, se considera para cada año simulado un nivel medio de mar uniforme, igual a la media espacial del aumento de dicho año. Por otra parte, debido a que la media espacial calculada para el dominio local se aleja mínimamente de la media espacial calculada para el dominio regional se determina considerar la media espacial obtenida utilizando

solo los puntos que caen dentro del dominio local. Considerar la media regional para las simulaciones regionales y la media local para las simulaciones locales se descarta para evitar inconsistencias en las condiciones de borde del dominio local. Y entre ambas se selecciona la correspondiente al dominio local siendo que la dinámica dentro de este dominio es lo que presenta mayor interés en el presente estudio, y de esta forma no se influencia por dinámicas que ocurren en zonas muy alejadas. Finalmente en la Tabla 9 se muestran los aumentos del nivel medio del mar considerados para cada año de los bloques temporales futuros simulados.

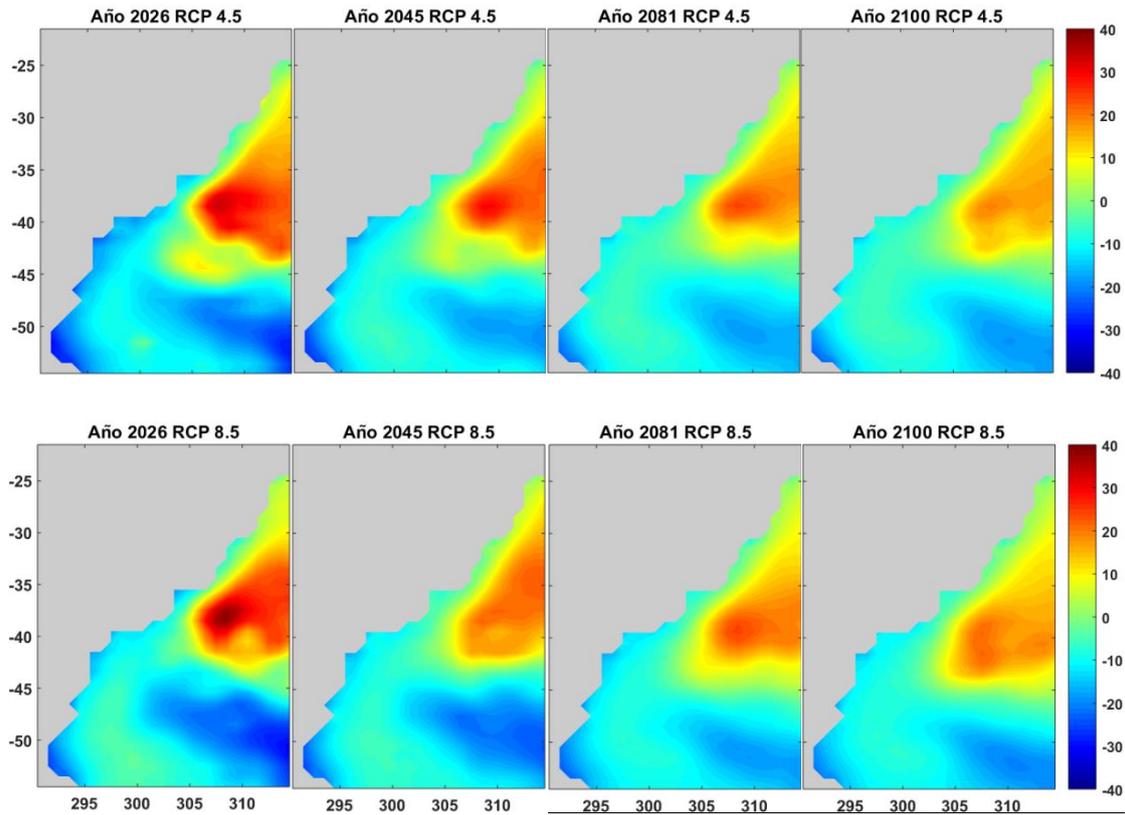


Figura 21- Diferencia (%) entre el nivel medio espacial anual y el nivel medio anual en cada punto, para los años 2026, 2045, 2081 y 2100, y escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

Cambio en el nivel de mar (m)				
RCP 4.5				
	Océano Atlántico Sur	RdP y FM	Diferencia	
2026	0.108	0.100	0.008	
2045	0.198	0.189	0.009	
2081	0.404	0.385	0.019	
2100	0.515	0.492	0.023	
RCP 8.5				
	Océano Atlántico Sur	RdP y FM	Diferencia	
2026	0.112	0.103	0.100	
2045	0.212	0.204	0.008	
2081	0.528	0.505	0.023	
2100	0.757	0.729	0.028	

Tabla 8- Diferencia entre el cambio en el nivel medio considerando el dominio del Océano Atlántico Sur y considerando el dominio del Río de la Plata y el Frente Marítimo (RdP y FM).

Aumento del nivel medio del mar (m)					
Año	RCP 4.5	RCP 8.5	Año	RCP 4.5	RCP 8.5
2027	0.106	0.109	2082	0.394	0.509
2028	0.108	0.115	2083	0.400	0.519
2029	0.109	0.113	2084	0.403	0.528
2030	0.117	0.120	2085	0.409	0.542
2031	0.125	0.130	2086	0.414	0.551
2032	0.130	0.137	2087	0.414	0.563
2033	0.132	0.143	2088	0.420	0.575
2034	0.142	0.142	2089	0.428	0.590
2035	0.143	0.149	2090	0.434	0.603
2036	0.141	0.154	2091	0.441	0.611
2037	0.144	0.158	2092	0.449	0.620
2038	0.153	0.163	2093	0.447	0.632
2039	0.156	0.172	2094	0.459	0.645
2040	0.168	0.179	2095	0.462	0.651
2041	0.162	0.175	2096	0.467	0.665
2042	0.174	0.182	2097	0.476	0.678
2043	0.173	0.189	2098	0.486	0.699
2044	0.183	0.197	2099	0.485	0.707
2045	0.189	0.204	2100	0.492	0.729

Tabla 9- Aumento del nivel medio del mar considerado para simular cada año correspondiente a los bloques futuros según escenario RCP 4.5 o RCP 8.5.

5.6 Metodología de modelación

Respecto a la metodología de modelación general existen varias condiciones a tener en cuenta. Principalmente debido a que se utilizan diferentes modelos para modelar el dominio regional y el dominio local (MOHID y TELEMAR respectivamente), cada modelo se corre de forma independiente del otro y se realiza un procesamiento de datos intermedio para generar las condiciones de borde oceánicas del modelo regional al modelo local.

Por otro lado, la metodología de modelación adquirida está condicionada por el hecho de que no todos los modelos atmosféricos globales adoptan los mismos calendarios (sección 4.1). De esta forma, cada año forzado con vientos y presiones de los modelos atmosféricos globales se simulan de forma independiente. Se parte de las condiciones iniciales ya indicadas para los bloques históricos de referencia, agregando dos meses de calentamiento previo a cada año en ambos modelos, que luego no se toman en cuenta al momento de analizar los resultados. Los años se corren de forma independiente para ser coherentes con el ciclo de la marea astronómica que se ingresa al modelo regional.

En términos generales se siguen los siguientes pasos para modelar cada año de manera independiente:

- 1- Simulación anual del modelo hidrodinámico regional.

- 2- Extracción de resultados del modelo regional en los nodos correspondientes a los bordes oceánicos del dominio local.
- 3- Interpolación y transformación de las condiciones extraídas en el punto 2, al formato necesario para el modelo local.
- 4- Simulación anual del modelo hidrodinámico local.

Se realizan un total de 1382 simulaciones anuales que se describen en la Tabla 10.

SIMULACIONES						
	Modelo Regional			Modelo local		
		RCP 4.5 y RCP 8.5			RCP 4.5 y RCP 8.5	
FORZANTE ATMOSFÉRICO	Histórico	Corto Plazo	Largo Plazo	Histórico	Corto Plazo	Largo Plazo
CFSR*	1985-2005	-	-	1985-2005	-	-
ACCESS	1986-2005	2027-2045	2082-2100	1986-2005	2027-2045	2082-2100
CMCC_CM	1986-2005	2027-2045	2082-2100	1986-2005	2027-2045	2082-2100
CNRM_CM5	1986-2005	2027-2045	2082-2100	1986-2005	2027-2045	2082-2100
GFDL_ESM2G	1986-2005	2027-2045	2082-2100	1986-2005	2027-2045	2082-2100
MIROC5	1986-2005	2027-2045	2082-2100	1986-2005	2027-2045	2082-2100
IPSL_CM5A_MR	1986-2005	2027-2045	2082-2100	1986-2005	2027-2045	2082-2100
HadGEM2_ES	1986-2005	2027-2045	2082-2099	1986-2005	2027-2045	2082-2099
Años simulados por bloque	161	266	264	161	266	264
Simulaciones totales	1382					

*Tabla 10- Simulaciones anuales independientes totales realizadas con cada modelo hidrodinámico. *Las simulaciones CFSR son las evaluadas en las secciones 5.3.4 y 5.4.4.*

Todas las simulaciones se realizaron en el centro nacional de supercomputación, Cluster Uy (www.cluster.uy). Las corridas anuales del modelo regional se separan en 5 bloques temporales (el primero de 2 meses y el resto de 3 meses). Cada corrida se configura para utilizar 12 nodos de cómputo, lo cual toma un tiempo de aproximadamente 1 hora para la primera corrida y 90 minutos para finalizar el resto de las corridas. Exceptuando al primer bloque anual que es de calentamiento, el resto de los bloques de un mismo año utilizan como condición inicial la condición final del bloque anterior, por lo tanto, simular un año con el modelo regional consume un tiempo de aproximadamente 7 horas.

Por otra parte, el modelo regional no se encuentra dividido en bloques temporales, por lo tanto, con una sola corrida se simula un año entero. En este caso se utilizaron entre 11 y 12 nodos de cómputo para cada corrida consumiendo un tiempo entre 90 y 120 minutos cada año simulado.

Debido a la gran cantidad de nodos de cómputo que existen en el Cluster Uy, es posible correr varios años en simultáneo, desde 4 hasta 6, dependiendo de los límites establecidos por Cluster Uy para los usuarios de la herramienta, lo cuales son muy variables dependiendo de la demanda.

5.7 Síntesis

En el presente capítulo se describieron los modelos hidrodinámicos utilizados en este trabajo de tesis. Estos modelos han sido desarrollados en estudios previos realizados por el IMFIA y por tanto se parte de configuraciones determinadas a las cuales se les hacen pequeñas modificaciones para su adaptación al uso en el presente trabajo. Debido a lo anterior, se evalúa

la calidad de los mismos en la representación del período histórico definido para este trabajo, comprendido entre 1985 y 2005. Además, se determina el aumento en el nivel medio del mar que luego se introduce como condición inicial para cada año simulado, a partir de información disponible del IPCC (IPCC, 2013).

Los resultados del modelo local son considerados de aquí en más los resultados de referencia, con los cuales se evalúa el comportamiento de los modelos atmosféricos globales como forzantes atmosféricos. En un paso intermedio también se consideran como referencia los resultados del modelo regional, al evaluar el comportamiento de los modelos atmosféricos como forzantes del modelo regional.

En términos generales ambos modelos representan correctamente la dinámica de las mareas en la zona. El modelo regional se evalúa comparando datos medidos en dos estaciones localizadas fuera del Río de la Plata, cercanas a las condiciones de borde del modelo local, La Paloma y Mar del Plata. Los estadísticos utilizados para evaluar muestran un comportamiento notoriamente mejor en Mar del Plata que en La Paloma. Mientras que el sesgo en La Paloma alcanza los 16 cm en Mar del Plata es de tan solo 6 cm. Los errores medios cuadráticos son similares, de 28 cm en La paloma y 24 cm en Mar del Plata, y el coeficiente de correlación vuelve a mostrar una notoria mejora en Mar del Plata, siendo en esta última de 0.84 y de 0.71 en La Paloma.

Respecto al modelo local se evalúa su comportamiento en 6 estaciones localizadas en el dominio de estudio, 5 en la costa uruguaya y una situada en la zona interior del estuario. La calidad del modelo es muy buena en todas las estaciones, desprendiéndose los peores resultados de la estación de Punta del Este con un sesgo de 12 cm, error medio de 31 cm y coeficiente de correlación de 0.65. El resto de las estaciones (exceptuando Pilote Norden) muestran sesgos por debajo de los 10 cm. Los coeficientes de correlación resultan mejores para las estaciones interiores al estuario alcanzando valores de 0.84. Por último, los errores medios cuadráticos abarcan un rango entre 24 y 31 cm, alcanzándose el más bajo en la estación de La Paloma.

6 RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de forzar los modelos hidrodinámicos con los vientos y presiones de los 7 modelos atmosféricos globales evaluados en el capítulo 4.

El capítulo se separa en 4 partes. Las dos primeras partes muestran la calidad de los resultados de los modelos hidrodinámicos; regional y local; forzado con los modelos atmosféricos globales durante el período histórico. El objetivo de lo anterior es determinar si al forzar los modelos hidrodinámicos con los vientos y presiones de los modelos atmosféricos globales se logra reproducir la climatología de niveles de mar, sobretodo en la costa uruguaya. Para esto se toma como referencia la climatología obtenida de forzar los modelos hidrodinámicos con vientos y presiones de reanálisis (CFSR), cuya evaluación se muestra en las secciones 5.3.4 (modelo regional) y 5.4.4 (modelo local).

En la tercera parte se muestran los resultados del modelo hidrodinámico local obtenidos a corto y largo plazo para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Por último, en la cuarta parte se realiza una discusión entre los resultados mostrados en el capítulo y otros resultados alcanzados en el presente trabajo así como en otros estudios.

6.1 Modelo regional: período histórico

En esta sección se evalúan los resultados de nivel de mar obtenidos forzando el modelo regional con los siete modelos atmosféricos globales, comparándolo con el modelo regional forzado con vientos y presiones de reanálisis de CFSR presentado en el capítulo 5. Visto que las series temporales obtenidas del modelo hidrodinámico forzado con el reanálisis y con los modelos atmosféricos globales no son comparables instante a instante, para la comparación se utilizan distintos estadísticos calculados a partir de cada una de las series obtenidas: gráficos cuantil-cuantil y campos correspondientes a los cuantiles 5% y 95%. Para la evaluación se considera todo el periodo histórico 1986-2005.

La comparación cuantil-cuantil se realiza en 4 puntos de control. Dos puntos ubicados en la frontera del modelo local (Mar del Plata y Frontera Oceánica, donde predomina la marea astronómica), un punto cercano a la frontera Noreste (La Paloma, donde predomina la marea meteorológica) y un punto ubicado en la media longitudinal del Río de la Plata (Figura 22). Los primeros dos puntos mencionados son representativos de las condiciones de borde con las que se fuerza el modelo local. Se comparan 50 cuantiles que se distribuyen uniformemente desde el cuantil 0.001 hasta el 0.999 en escala de Gumbel, la cual concentra cuantiles en los extremos.

Por otra parte, se realiza la comparación de los campos de nivel correspondientes a los cuantiles 5% y 95%, de forma de evaluar la variabilidad espacial de los estadísticos obtenidos en las diferentes simulaciones.

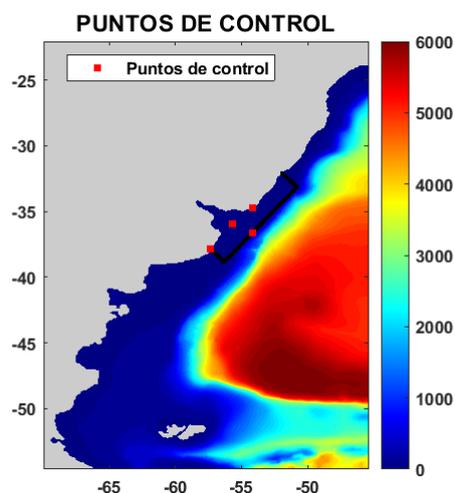


Figura 22- Puntos de control definidos para extraer los niveles de mar en la evaluación de los modelos atmosféricos globales como forzantes del modelo regional durante período histórico y batimetría en m. En negro se indican los bordes del modelo local.

6.1.1.1 ACCESS1.0

En la Figura 23 se muestran los gráficos cuantil cuantil de nivel para los 4 puntos, forzando el modelo regional con vientos y presiones del modelo ACCESS 1.0 y con vientos y presiones del CFSR. En términos generales se observa una muy buena representación de los cuantiles por parte del modelo forzado con vientos y presiones de ACCESS 1.0. Los cuantiles se alinean notoriamente con la recta 1-1 (recta roja). En Mar del Plata se puede observar que los cuantiles más bajos y más altos se despegan de la línea de referencia, donde se observa que al forzar con el GCM se subestiman algunos cuantiles, aunque no demasiado, siendo que la máxima diferencia entre cuantiles comparados no supera los 6 cm.

En la Figura 30 y 31 se muestran los campos de nivel asociados a los cuantiles 0.05 y 0.95. Se observa en ambos casos patrones de distribución de los niveles muy similares entre el modelo forzado con ACCESS1.0 y el modelo forzado con los vientos de reanálisis.

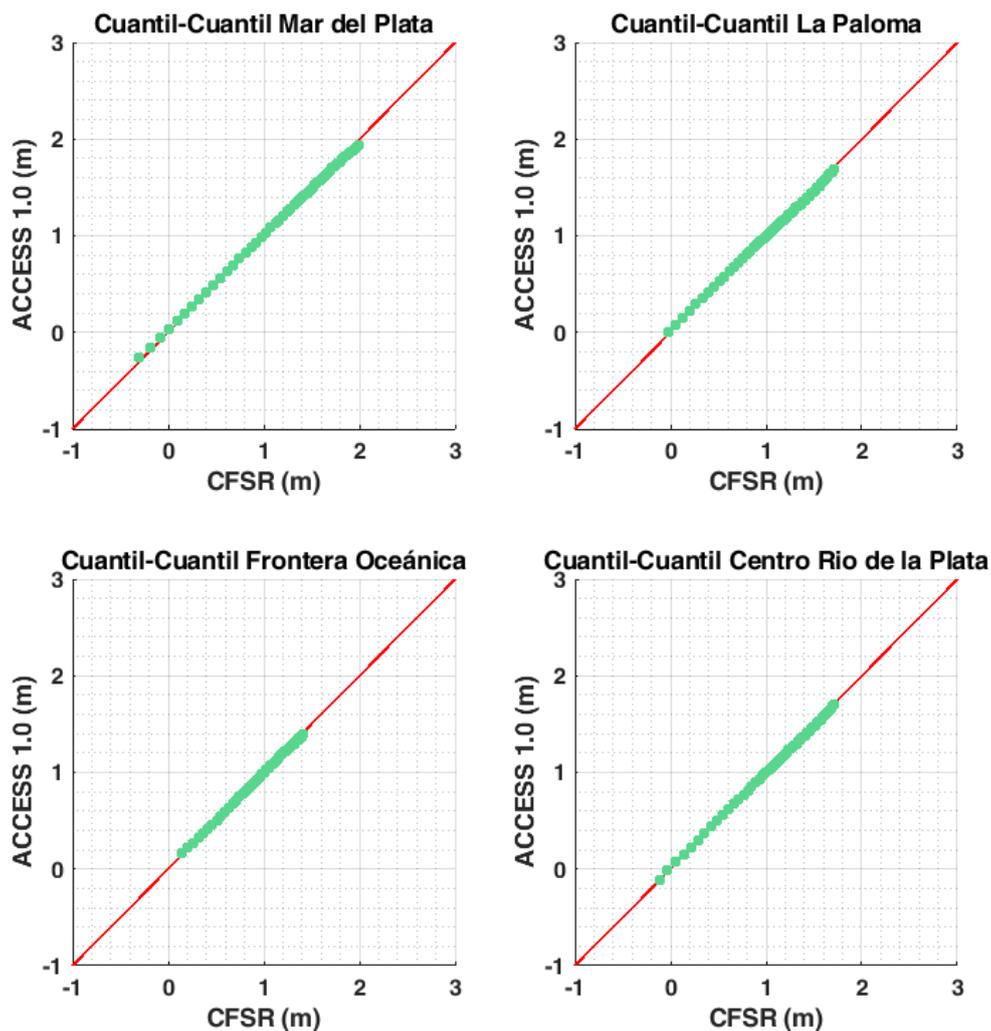


Figura 23- Gráficos cuantil-cuantil de nivel de mar resultado de modelo forzado con vientos y presiones ACCESS 1.0 vs nivel de mar resultado de modelo forzado con CFSR en 4 puntos de control: panel superior Mar del Plata (izquierda) y La Paloma (derecha); panel inferior punto en frontera oceánica del modelo local (Izquierda) y punto en eje longitudinal del Río de la Plata (derecha).

6.1.1.2 CMCC-CM

En la Figura 24 se muestran los gráficos cuantil-cuantil para los cuatro puntos de control, forzando el modelo regional con vientos y presiones del modelo CMCC-CM y con vientos y presiones del CFSR. En términos generales se observa una buena representación de los cuantiles por parte del modelo forzado con CMCC-CM aunque no tan buena como la obtenida utilizando el modelo ACCESS 1.0. Excluyendo al punto localizado en la frontera oceánica, se observa una rotación antihoraria del gráfico cuantil-cuantil respecto a la línea de referencia. La diferencia entre los cuantiles se acentúa hacia los valores más altos, donde el modelo forzado con CMCC sobreestima los cuantiles por casi 10 cm en Mar del Plata y La Paloma.

Respecto a los campos de nivel asociados a los cuantiles 0.05 y 0.95 (Figura 30 y 31) se observa un comportamiento muy similar al del modelo ACCESS 1.0. Las distribuciones espaciales son muy similares a las del modelo forzado con vientos y presiones de reanálisis.

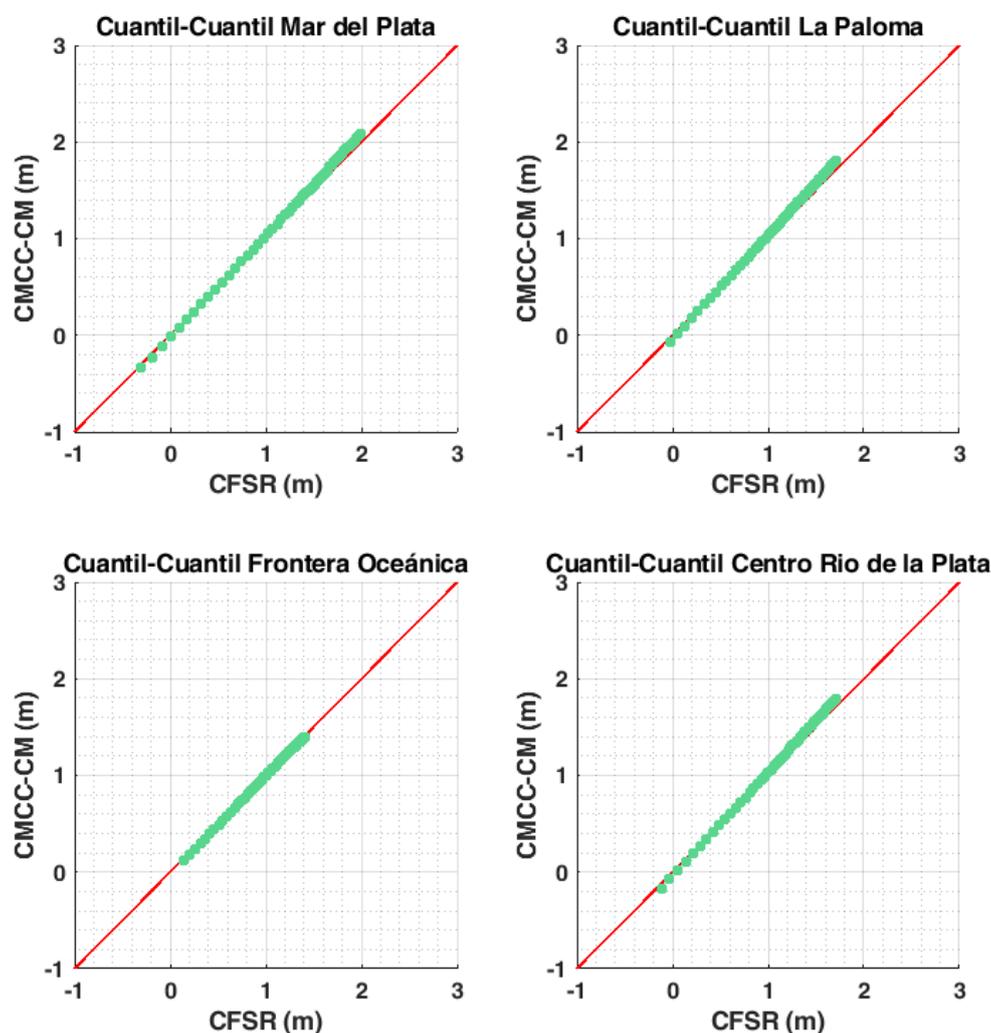


Figura 24- Gráficos cuantil-cuantil de nivel de mar resultado de modelo forzado con vientos y presiones CMCC-CM 1.0 vs nivel de mar resultado de modelo forzado con CFSR en 4 puntos de control: panel superior Mar del Plata (izquierda) y La Paloma (derecha); Panel inferior punto en frontera oceánica del modelo local (Izquierda) y punto en eje longitudinal del Río de la Plata (derecha).

6.1.1.3 CNRM-CM5

En la Figura 25 se muestran los gráficos cuantil-cuantil para los cuatro puntos de control, forzando el modelo regional con vientos y presiones del modelo CNRM-CM5 y con vientos y presiones del CFSR. Nuevamente se observa una buena representación en términos generales de los cuantiles por parte del modelo forzado con CNRM-CM5, aunque a diferencia del modelo forzado por CMCC-CM las rotaciones en los puntos de Mar del Plata, La Paloma y el punto situado en la longitudinal del Río de la Plata son en sentido horario respecto a la línea de referencia, subestimando los cuantiles más elevados y sobreestimando los más bajos. Para los cuantiles más altos la máxima diferencia se da para Mar del Plata siendo esta de aproximadamente 14 cm, mientras que la mayor sobreestimación de los cuantiles más bajos se da para el mismo punto siendo cercana a los 12 cm.

Las distribuciones espaciales de los niveles asociados a los cuantiles 0.05 y 0.95 (Figura 30 y 31) muestran el mismo comportamiento que los casos ya analizados.

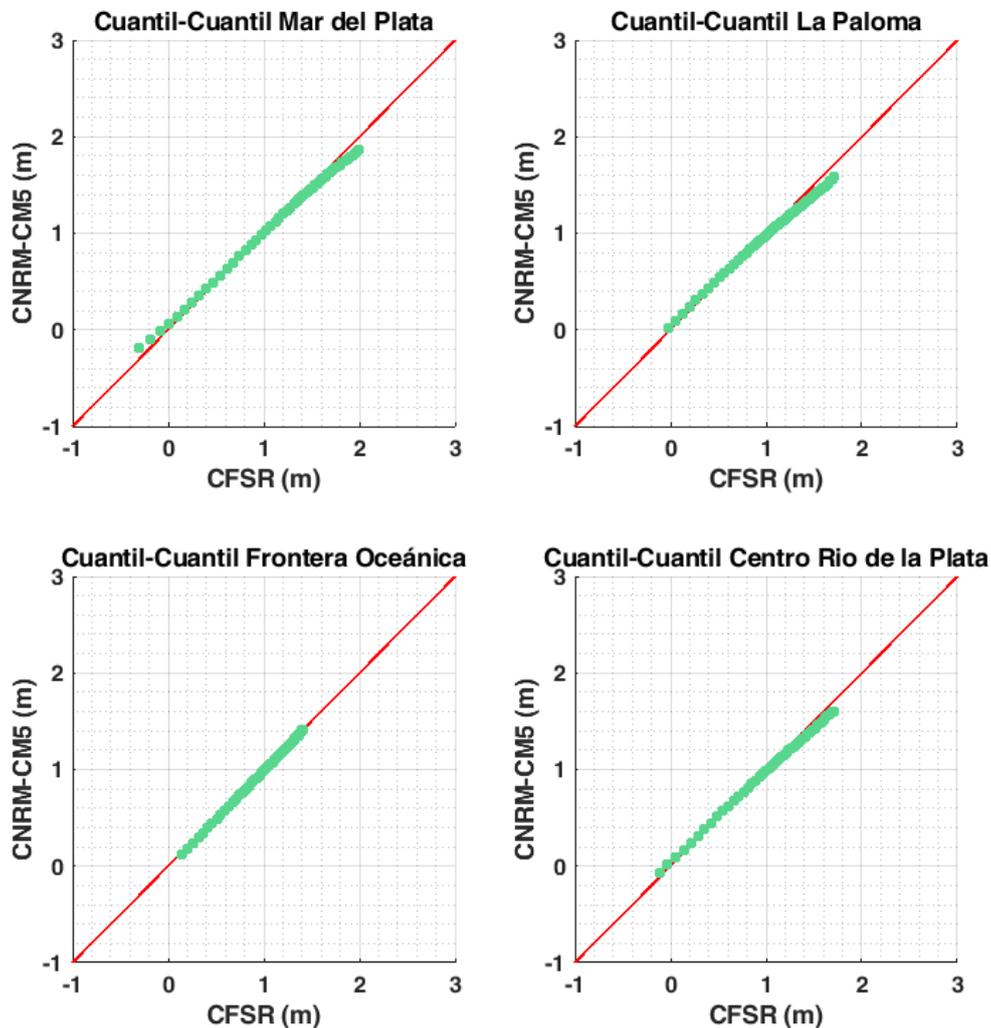


Figura 25- Gráficos cuantil-cuantil de nivel de mar resultado de modelo forzado con vientos y presiones CNRM-CM5 vs nivel de mar resultado de modelo forzado con CFSR en 4 puntos de control: panel superior Mar del Plata (izquierda) y La Paloma (derecha); Panel inferior punto en frontera oceánica del modelo local (izquierda) y punto en eje longitudinal del Río de la Plata (derecha).

6.1.1.4 GFDL-ESM2G

En la Figura 26 se muestran los gráficos cuantil-cuantil para los cuatro puntos de control, forzando el modelo regional con vientos y presiones del modelo GFDL-ESM2G y con vientos y presiones del CFSR. Se observa una muy buena representación de todos los cuantiles, y salvo en la frontera oceánica se destaca la buena alineación de los cuantiles con la línea de referencia. En La Paloma se observa una leve curva y los cuantiles más altos se despegan hacia abajo, por un máximo de 7 cm de la línea de referencia, mientras que en Mar de Plata algunos de los cuantiles más altos se despegan por poco más de 9 cm. En el punto situado en la frontera oceánica se observa que los cuantiles más altos se sobrestiman al forzar con GFDL-ESM2G, por un máximo de 9 cm.

Respecto a las distribuciones espaciales de los niveles asociados a los cuantiles 0.05 y 0.95 (Figura 30 y 31), se observa el mismo comportamiento que los casos ya analizados.

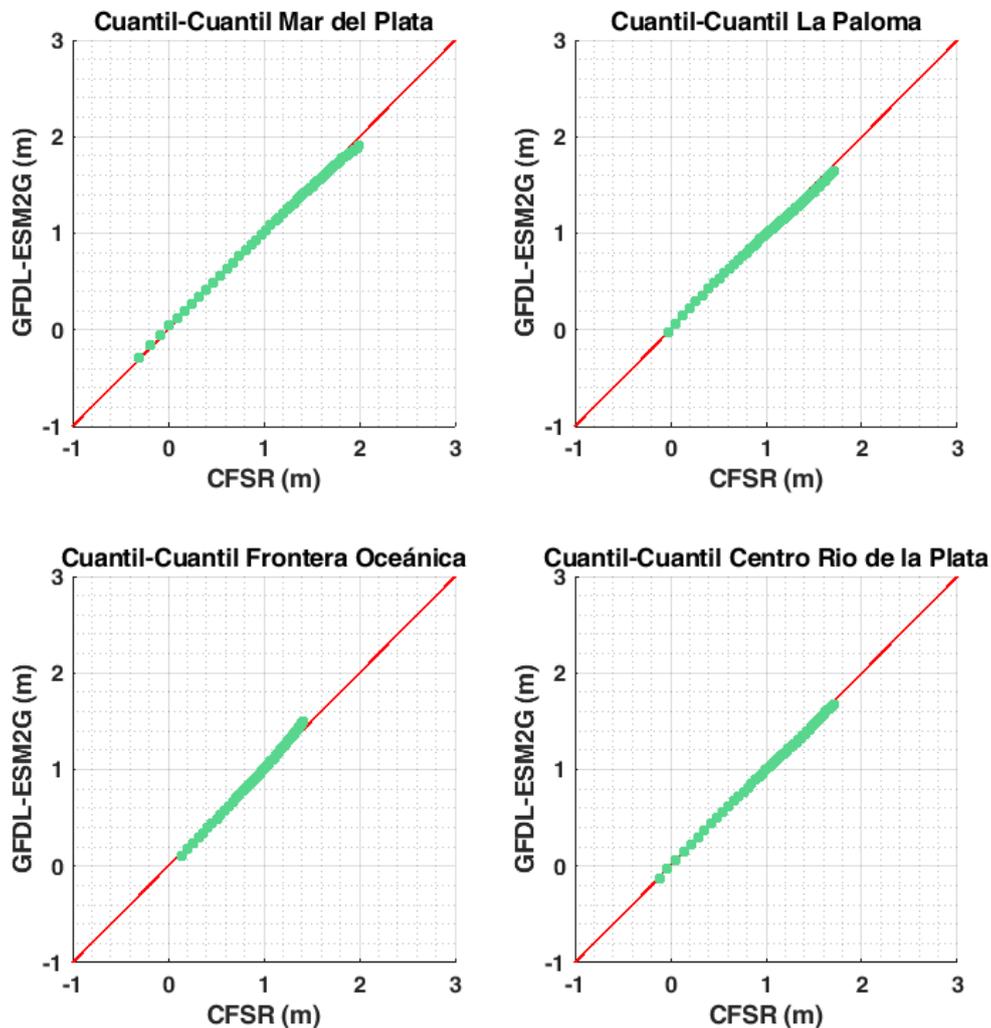


Figura 26- Gráficos cuantil-cuantil de nivel de mar resultado de modelo forzado con vientos y presiones GFDL-ESM2G vs nivel de mar resultado de modelo forzado con CFSR en 4 puntos de control: panel superior Mar del Plata (izquierda) y La Paloma (derecha); Panel inferior punto en frontera oceánica del modelo local (izquierda) y punto en eje longitudinal del Río de la Plata (derecha).

6.1.1.5 MIROC5

En la Figura 27 se muestran los gráficos cuantil-cuantil para los 4 puntos de control, forzando el modelo regional con vientos y presiones del modelo MIROC5 y con vientos y presiones del CFSR. Se observa un muy buen comportamiento por parte del modelo forzado con MIROC5, se destaca la alineación en las cuatro localidades con la línea de referencia. Se observa que, en la localidad de La Paloma, algunos de los cuantiles más altos se despegan de la recta 1-1 debido a que el modelo forzado con MIROC5 los sobrestima, aunque por menos de 6 cm. En el centro del Río de la Plata también se observa que se sobreestiman mínimamente algunos cuantiles.

Respecto a las distribuciones espaciales de los niveles asociados a los cuantiles 0.05 y 0.95 (Figura 30 y 31), se observa el mismo comportamiento que los casos ya analizados.

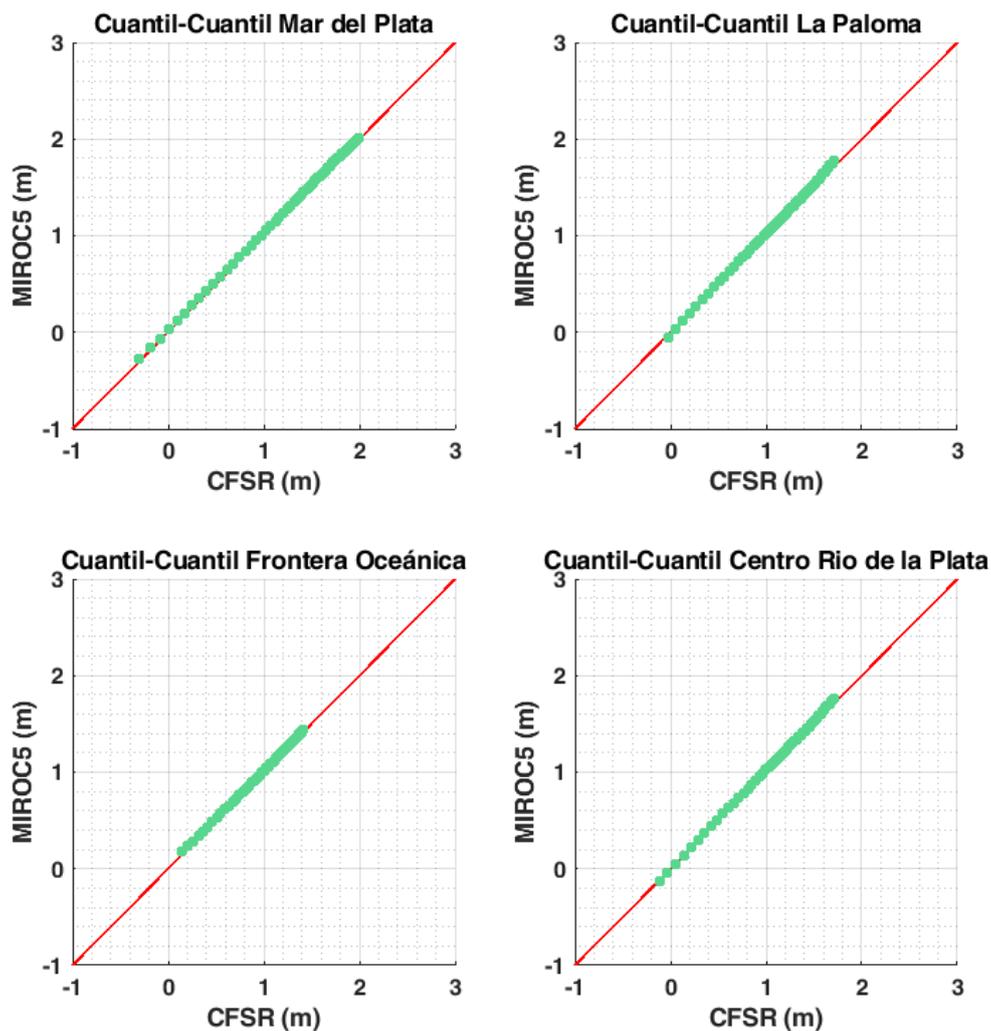


Figura 27- Gráficos cuantil-cuantil de nivel de mar resultado de modelo forzado con vientos y presiones MIROC5 vs nivel de mar resultado de modelo forzado con CFSR en 4 puntos de control: panel superior Mar del Plata (izquierda) y La Paloma (derecha); Panel inferior punto en frontera oceánica del modelo local (izquierda) y punto en eje longitudinal del Río de la Plata (derecha).

6.1.1.6 IPSL-CM5A-MR

En la Figura 28 se muestran los gráficos cuantil-cuantil para los 4 puntos de control, forzando el modelo regional con vientos y presiones del modelo IPSL-CM5A-MR y con vientos y presiones del CFSR. Se observa un muy buen comportamiento por parte del modelo forzado con el modelo GCM en los cuantiles bajos y medios, y se observa una notoria subestimación de los cuantiles más altos respecto al modelo forzado con vientos de reanálisis. La subestimación es más notoria en La Paloma y Mar del Plata donde casi alcanza los 14 cm. Lo anterior no sucede en la frontera oceánica donde se observa que la curva cuantil-cuantil se acerca a la línea de referencia hacia los cuantiles más altos.

Respecto a las distribuciones espaciales de los niveles asociados a los cuantiles 0.05 y 0.95 (Figura 30 y 31), se observa el mismo comportamiento que los casos ya analizados.

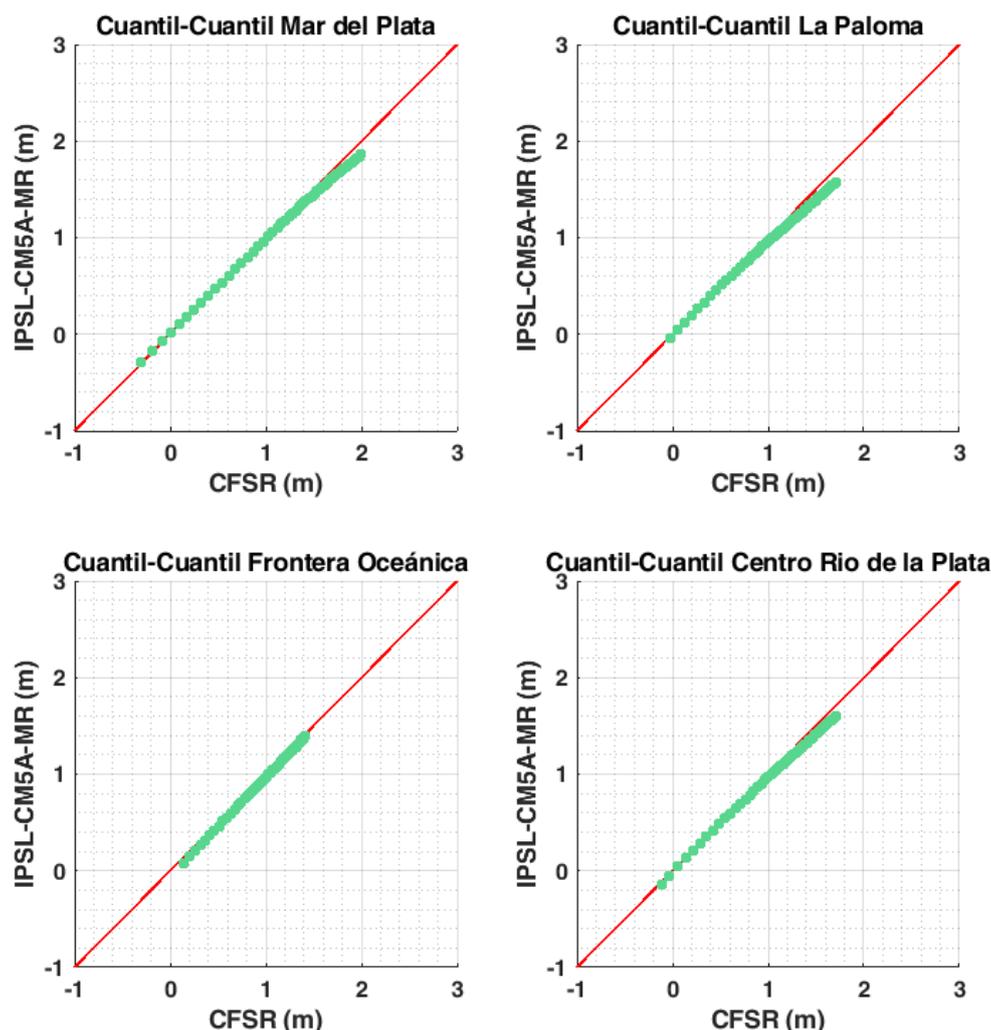


Figura 28- Gráficos cuantil-cuantil de nivel de mar resultado de modelo forzado con vientos y presiones IPSL-CM5A-MR vs nivel de mar resultado de modelo forzado con CFSR en 4 puntos de control: panel superior Mar del Plata (izquierda) y La Paloma (derecha); Panel inferior punto en frontera oceánica del modelo local (izquierda) y punto en eje longitudinal del Río de la Plata (derecha).

6.1.1.7 HadGEM-ES

En la Figura 29 se muestran los gráficos cuantil-cuantil para los 4 puntos de control, forzando el modelo regional con vientos y presiones del modelo HadGEM-ES y con vientos y presiones del CFSR. Excluyendo a la frontera oceánica, se observa en los puntos una leve rotación en sentido horario respecto a la línea de referencia, más notoria en La Paloma. Aun así, en términos generales se desprende un muy buen desempeño del modelo forzado con HadGEM-ES; en La Paloma la mayor diferencia entre cuantiles es de aproximadamente 11 cm y en Mar del Plata no llega a los 7 cm.

Respecto a las distribuciones espaciales de los niveles asociados a los cuantiles 0.05 y 0.95 (Figura 30 y 31), se observa el mismo comportamiento que los casos ya analizados.

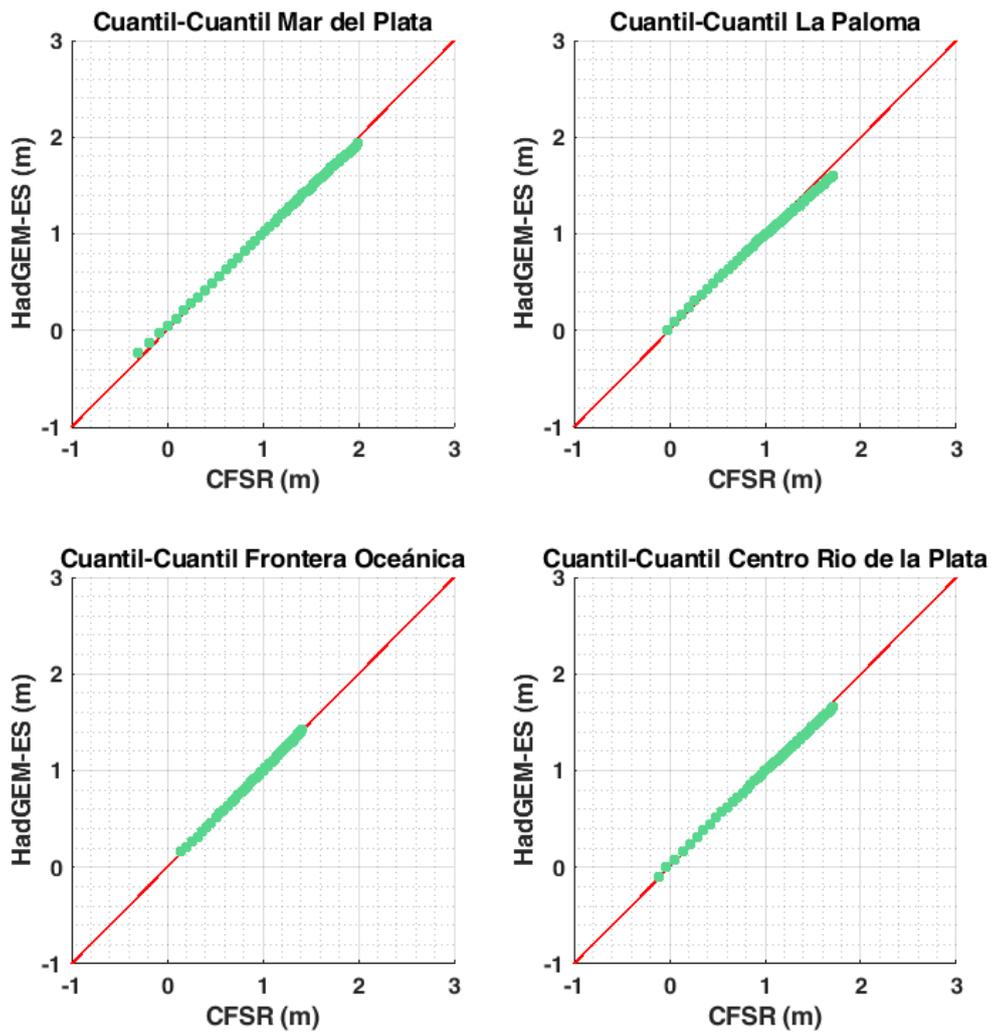


Figura 29- Gráficos cuantil-cuantil de nivel de mar resultado de modelo forzado con vientos y presiones HadGEM2-ES vs nivel de mar resultado de modelo forzado con CFSR en 4 puntos de control: panel superior Mar del Plata (izquierda) y La Paloma (derecha); Panel inferior punto en frontera oceánica del modelo local (izquierda) y punto en eje longitudinal del Río de la Plata (derecha).

Cuantil 5%

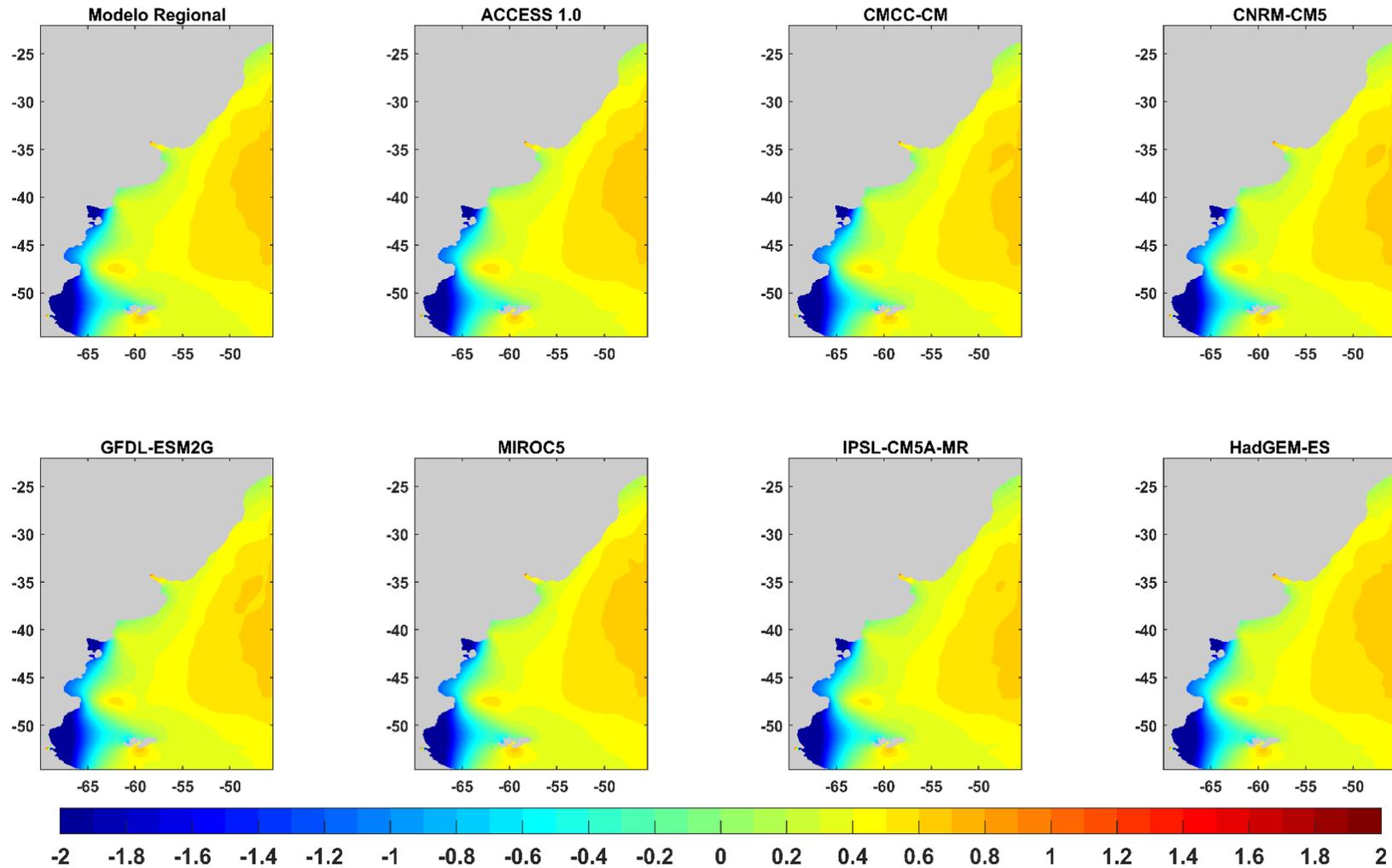


Figura 30- Distribución espacial del cuantil 5% de nivel de mar resultado del modelo regional forzado con CFSR y del modelo regional forzado con los 7 modelos atmosféricos globales.

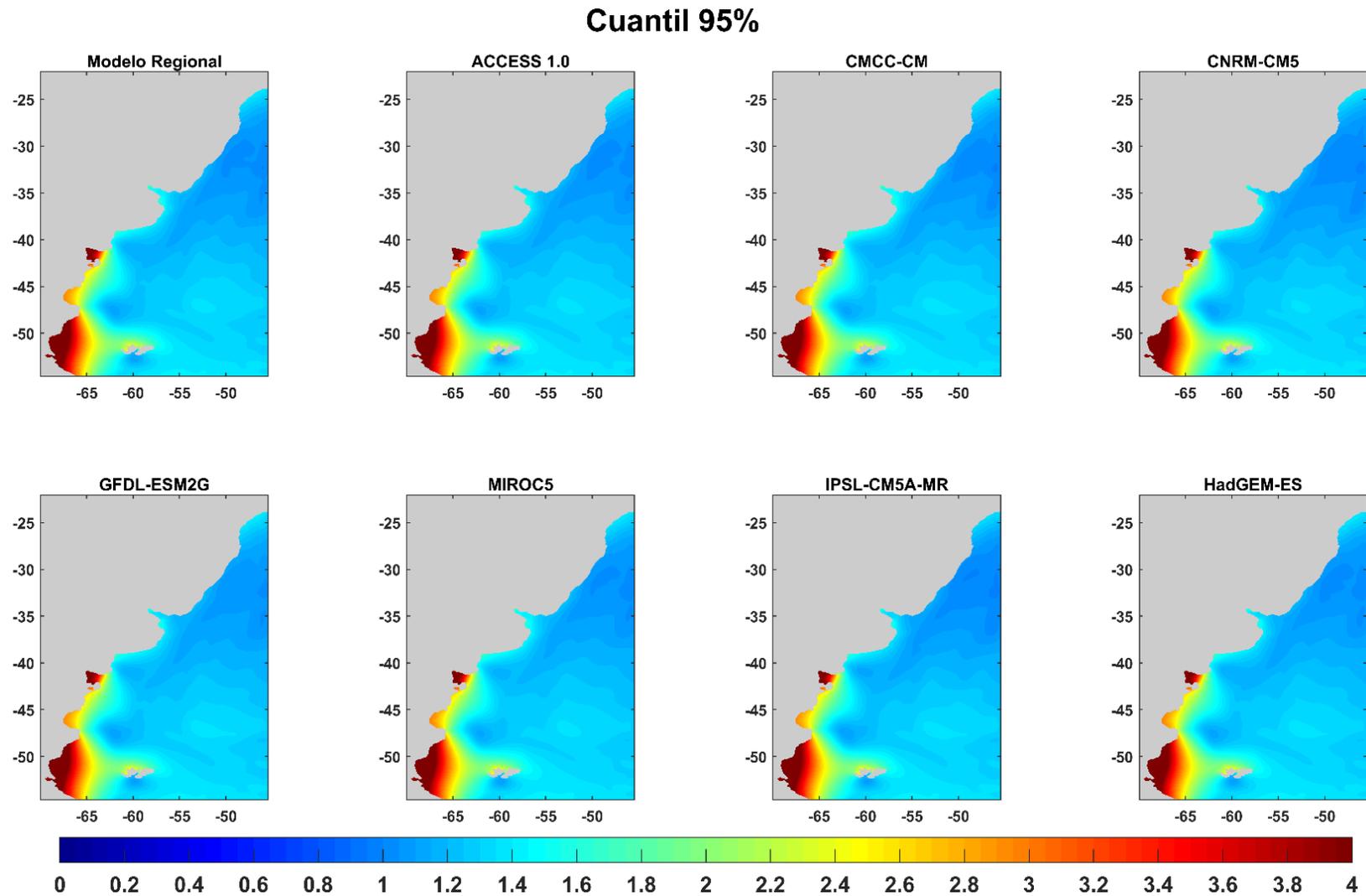


Figura 31- Distribución espacial del cuantil 95% de nivel de mar resultado del modelo regional forzado con CFSR y del modelo regional forzado con los 7 modelos atmosféricos globales.

6.1.1.8 Síntesis

La evaluación del modelo hidrodinámico regional forzado con vientos y presiones de los siete modelos atmosféricos globales utilizados en este estudio muestra buenos resultados. Los campos de niveles asociados a los cuantiles 0.05 y 0.95 muestran un comportamiento similar en los 7 casos, donde se puede observar una distribución espacial muy similar a la de referencia.

Respecto a la comparación cuantil-cuantil en 4 puntos de control se observan diversos comportamientos, aunque todos satisfactorios, con una máxima diferencia entre cuantiles comparados que no supera los 14 cm. Los resultados obtenidos para MIROC5 y ACCESS se destacan por la buena alineación de los gráficos cuantil-cuantil en todos los puntos, y bajas diferencias máximas que no superan los 6 cm. Algunos modelos tienen tendencia a sobreestimar los cuantiles más altos (CMCC-CM) y otros muestran tendencia a subestimarlos (CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR).

6.2 Modelo local: período histórico

Con el fin de conocer la calidad de los niveles obtenidos al forzar el modelo local con los modelos atmosféricos globales se realiza una comparación de los resultados obtenidos de forzar el modelo local con los modelos atmosféricos globales durante el período histórico con el modelo local forzado con vientos y presiones de reanálisis (CFSR) descrito en la sección 5.4. En esta sección al modelo local forzado con CFSR se le denomina también como reanálisis.

Al igual que para el caso del modelo regional, la evaluación se realiza mediante la comparación de cuantiles. Por una parte se comparan los cuantiles obtenidos en 9 estaciones distribuidas en el dominio, Mar del Plata, La Paloma, Punta del Este, Montevideo, Juan Lacaze, Colonia, Conchillas, Pilote Norden y Torre Oyarvide (ver ubicación presentada en Figura 16). Para cada estación se comparan 50 cuantiles que se distribuyen uniformemente desde el cuantil 0.001 hasta el 0.999 en escala de Gumbel. Con el fin de extender la evaluación al dominio espacial, se muestran también los campos espaciales asociados a los cuantiles 0.001, 0.01, 0.05, 0.5, 0.95, 0.99 y 0.999 obtenidos forzando con cada modelo. En dichos gráficos se muestran los contornos correspondientes a la diferencia entre el cuantil del reanálisis y el cuantil obtenido forzando con los diferentes modelos atmosféricos expresados como porcentaje respecto a la desviación estándar del reanálisis en cada punto del dominio. Los contornos se indican con el fin de poder entender qué tan relevantes son las diferencias en cada punto. En el análisis de resultados de los campos de cuantiles, cuando se hace referencia a las diferencias, se referirá a la diferencia descrita anteriormente.

En este caso se analiza además el resultado del ensamble del modelo local forzado por cada uno de los 7 modelos atmosféricos globales. Dicho ensamble se calcula como la media entre los 7 valores obtenidos de cada estadístico analizado, forzando el modelo local con cada modelo atmosférico global. Es decir, el ensamble del cuantil 99% se obtiene como la media en cada punto de los 7 valores de cuantil 99% obtenidos de forzar el modelo local con cada uno de los modelos atmosféricos.

6.2.1.1 ACCESS 1.0

En la Figura 32 se muestran los gráficos cuantil-cuantil para cada estación analizada; la línea roja muestra la línea identidad como referencia. Se observa un muy buen comportamiento para las

estaciones que se encuentran en la zona exterior del Río de la Plata (Mar del Plata, La Paloma y Punta del Este). A medida que las estaciones se encuentran hacia el interior del estuario el comportamiento desmejora. En Montevideo y Torre Oyarvide se sigue observando buen comportamiento, con los cuantiles notoriamente alineados con la línea de identidad. Desde Juan Lacaze hacia el interior del estuario se observa que el gráfico cuantil-cuantil se encuentra rotado en sentido horario en torno al valor 1 m, lo cual indica que forzando con ACCESS1.0 el modelo subestima los niveles mayores a 1 m y sobreestima los menores a este valor en dichas estaciones.

De la Figura 40 a la 46 se muestran los campos espaciales asociados a los cuantiles 0.1%, 1%, 5%, 50%, 95%, 99% y 99.9% para el modelo local forzado con cada modelo atmosférico y para el modelo local forzado con CFSR. Para el modelo ACCESS1.0 como primer resultado se observa una distribución espacial de niveles muy similar a la del reanálisis para todos los cuantiles obtenidos. En los cuantiles bajos (0.1%, 1% y 5%) se observan niveles más bajos a lo largo de la costa uruguaya oceánica desde la paloma hacia el norte, en la bahía de Sanboronbón y en la desembocadura de los ríos afluentes Paraná y Uruguay. Para estos cuantiles los niveles más altos se dan entre la costa de Montevideo y Punta del Este extendiéndose mar adentro. Los patrones descritos anteriormente son muy similares a los de referencia extendiéndose más o menos en el espacio para algunos cuantiles. En el cuantil 1% se observa que la diferencia respecto la desviación estándar no supera el 30% y la mayor diferencia se da en la zona del banco inglés, mientras que en el cuantil 5% ronda el 20% de la desviación.

El campo de nivel asociado a la mediana muestra que las diferencias con el reanálisis de referencia apenas alcanzan un 10% de la desviación estándar en la zona central del dominio. Respecto a los cuantiles más altos (95%, 99% y 99.9%) se observa que los niveles más altos se dan hacia el interior del estuario, cubriendo completamente la bahía de Sanboronbón. Forzando con ACCESS1.0 se observa la misma distribución espacial que en el reanálisis aunque se observa de los contornos que las mayores diferencias se dan sobre la costa uruguaya, alcanzando un 30% de diferencia en el cuantil 99 y hasta un 60% en el 99.9%.

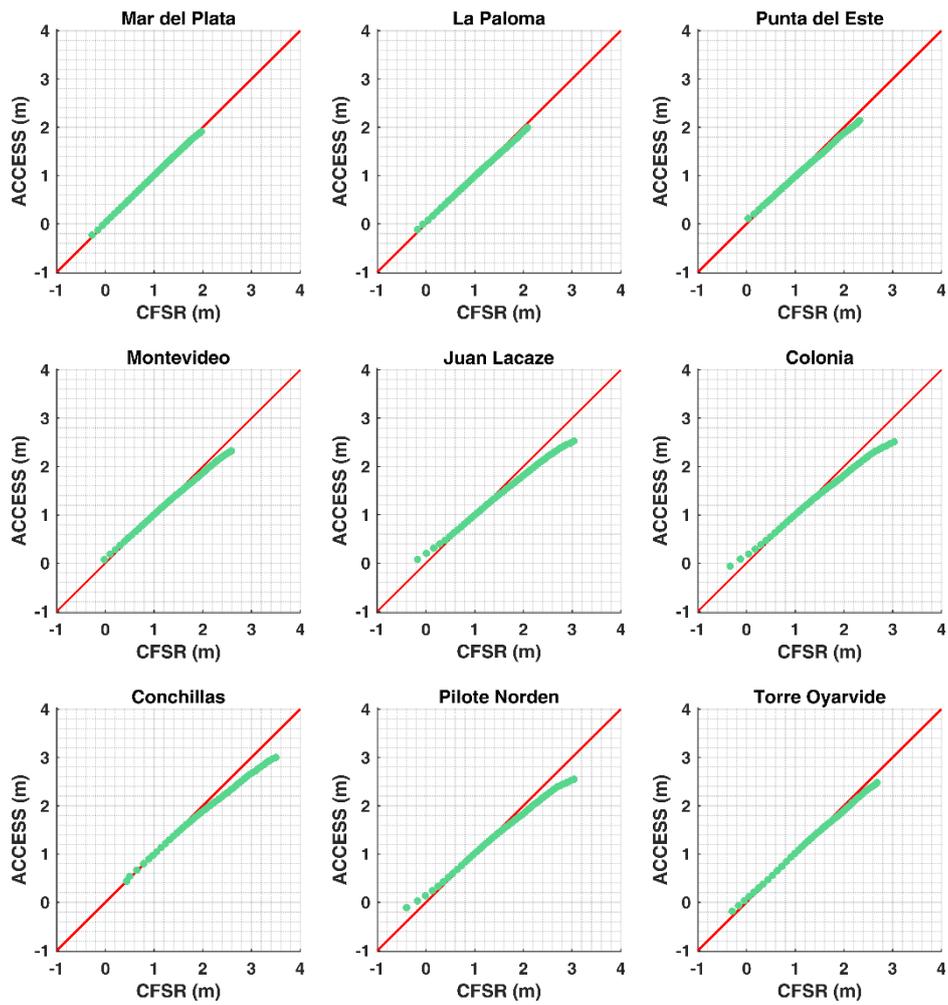


Figura 32- Gráficos cuantil-cuantil de nivel de mar resultado del modelo local forzado con vientos y presiones del modelo ACCESS 1.0 vs nivel de mar resultado del modelo local forzado con vientos CFSR en las 9 estaciones seleccionadas del modelo local.

6.2.1.2 CMCC-CM

En la Figura 33 se muestran los gráficos cuantil-cuantil de los niveles de reanálisis vs los niveles obtenidos del modelo local forzado con vientos y presiones del modelo CMCC-CM. En términos generales se observa muy buen comportamiento en todas las estaciones comparadas. En las estaciones correspondientes a la zona exterior del Río de la Plata (Mar del Plata, La Paloma y Punta del Este), Montevideo y Torre Oyarvide se observa una leve sobreestimación de los niveles por parte del modelo forzado con CMCC-CM hacia los cuantiles más altos. Por otra parte, en las estaciones interiores del Río de la Plata el modelo atmosférico subestima los cuantiles más altos.

A partir de la comparación de campos de cuantiles (Figura 40 a la 46), se observa al igual que para el modelo anterior analizado, que la distribución espacial de niveles es muy similar a la del reanálisis y las diferencias aún menores respecto a la desviación. Este resultado era esperado a partir de la buena representación de cuantiles en las estaciones. Mientras que en el cuantil 0.1% los contornos indican diferencias máximas de 20% de la desviación estándar del reanálisis, sobre la costa alrededor de Montevideo, en el cuantil 1% y 5% no alcanzan un 10% de esta diferencia.

El campo espacial asociado al cuantil 50% muestra muy buen comportamiento, con dos áreas que alcanzan una diferencia que representa el 10% de la desviación estándar, una en la zona central del dominio y otra en la zona oceánica al norte. Los campos espaciales de los cuantiles altos también muestran un buen comportamiento, aunque las diferencias respecto al reanálisis crecen, como se observó en las estaciones donde las curvas cuantil-cuantil se despegan de la línea identidad hacia los valores más altos en la costa uruguaya. Estas diferencias alcanzan el 30 % para el cuantil 99% y hasta el 40% para el cuantil 99.9%.

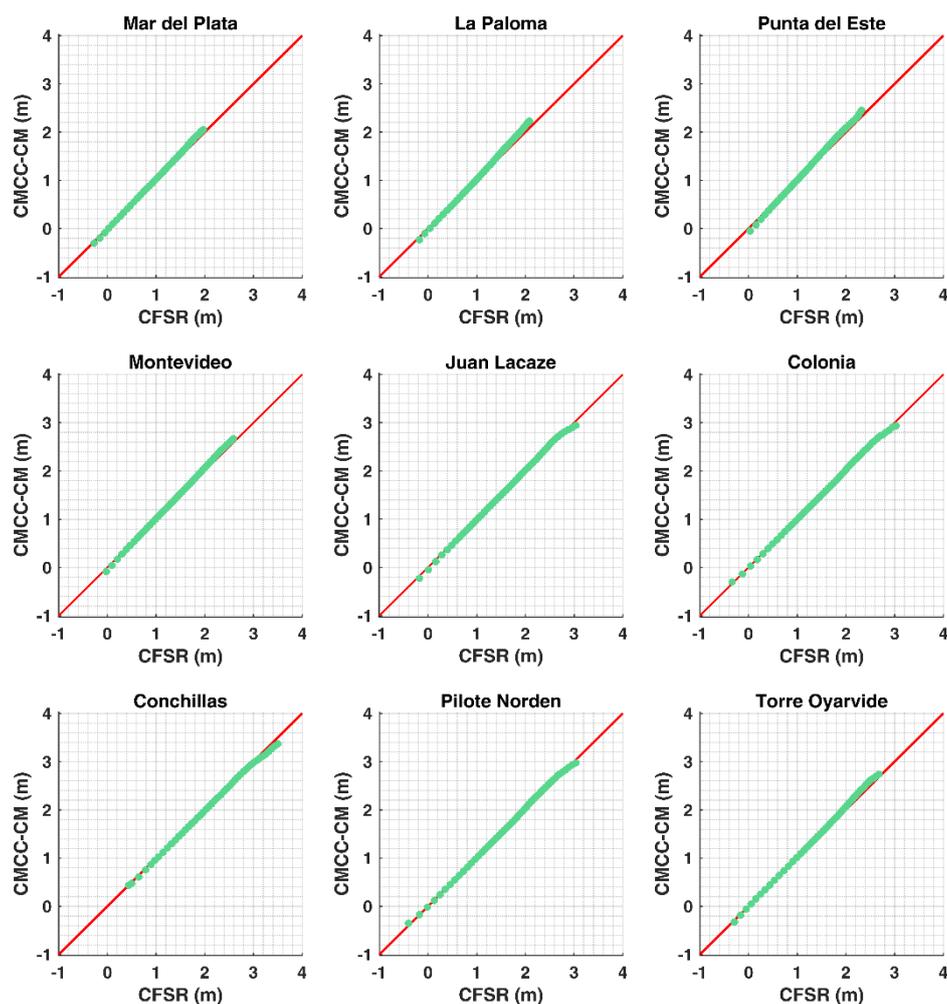


Figura 33- Gráficos cuantil-cuantil de nivel de mar resultado del modelo local forzado con vientos y presiones del modelo CMCC-CM vs nivel de mar resultado del modelo local forzado con vientos CFSR en 9 estaciones seleccionadas del modelo local.

6.2.1.3 CNRM-CM5

En la Figura 34 se muestran los gráficos cuantil-cuantil de los niveles de reanálisis y los niveles obtenidos del modelo local forzado con vientos y presiones del modelo CNRM-CM5. Este modelo no muestra un comportamiento tan bueno como los modelos anteriores. En todas las estaciones se observa una rotación de la curva cuantil-cuantil en sentido horario. Esta rotación es más importante hacia las estaciones de la zona interior del estuario, observándose subestimaciones de hasta 80 cm en Juan Lacaze y Colonia.

El comportamiento no tan satisfactorio observado en las estaciones se hace más evidente en los campos de cuantiles (Figura 40 a la 46). Como en los casos anteriores los patrones de distribución de niveles asociados a cuantiles altos y bajos de nivel son similares a los observados en el reanálisis, aunque las diferencias respecto a la desviación estándar del reanálisis son mayores, observándose diferencias de hasta 40% en el cuantil 0.1% alrededor de la costa de Montevideo. Hacia el este las diferencias decrecen. Para los cuantiles más altos las diferencias alrededor de la costa uruguaya alcanzan el 40% entre Montevideo y Punta del Este y hacia el interior del estuario. Hacia los cuantiles más altos las diferencias entre los cuantiles obtenidos

forzando con el modelo atmosférico y los del reanálisis crecen, como se hace evidente a partir de los gráficos cuantil-cuantil en las estaciones, alcanzando un 70% alrededor de la costa Uruguaya cubriendo desde Montevideo hasta La Paloma para el cuantil 95%, y superan este valor para el cuantil 99.9%.

Por otra parte la representación de los niveles asociados al cuantil 50% es buena y al igual que para los casos analizados anteriormente apenas se superan diferencias de mas del 10% de la desviación estándar con el cuantil 50% obtenido del reanálisis.

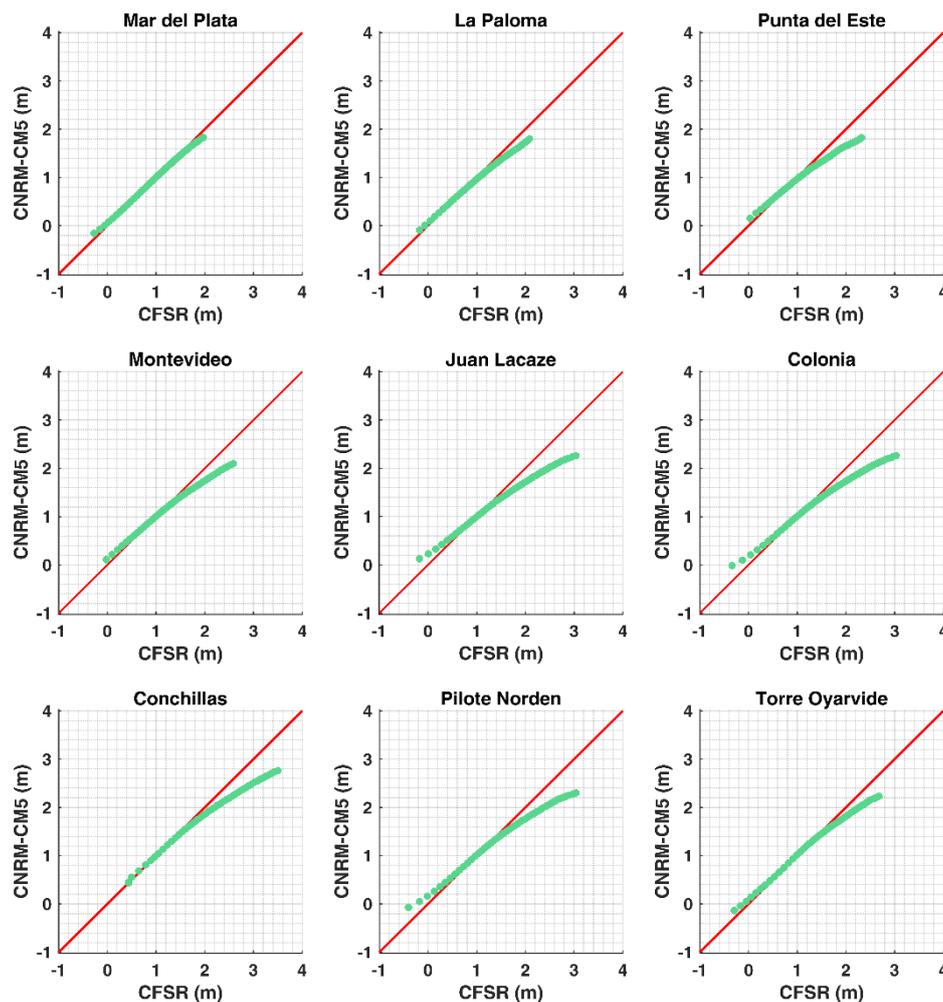


Figura 34- Gráficos cuantil-cuantil de nivel de mar resultado del modelo local forzado con vientos y presiones del modelo CNRM-CM5 vs nivel de mar resultado del modelo local forzado con vientos CFSR en 9 estaciones seleccionadas del modelo local.

6.2.1.4 GFDL-ESM2G

En la Figura 35 se muestran los gráficos cuantil-cuantil de los niveles de reanálisis y los niveles obtenidos del modelo local forzado con vientos y presiones del modelo GFDL-ESM2G. El modelo muestra un buen comportamiento en Mar del Plata y La Paloma, a pesar de subestimar los cuantiles más altos, sobre todo en esta última. A partir de la estación de Punta del Este y hacia el interior del estuario el comportamiento desmejora. Mientras que en Punta del Este el modelo

atmosférico subestima los cuantiles más elevados por aproximadamente 20 cm, la subestimación se acentúa hacia Juan Lacaze, Colonia y Conchillas alcanzando los 60 cm de diferencia.

La comparación de los campos de cuantiles (Figura 40 a la 46) muestran los mismos patrones de distribución de niveles que el reanálisis, alcanzando diferencias de hasta 20% respecto a la desviación estándar del reanálisis para el cuantil 0.1% y 1%. El cuantil 95% muestra diferencias de entre 30% y 40% a lo largo de la costa uruguaya que disminuyen hacia el Este. Hacia los cuantiles más altos de 99% y 99.9% las diferencias se disparan superando el 80% alrededor de la costa uruguaya. El campo de nivel asociado a la mediana muestra un muy buen comportamiento con muy pequeñas diferencias respecto al del reanálisis.

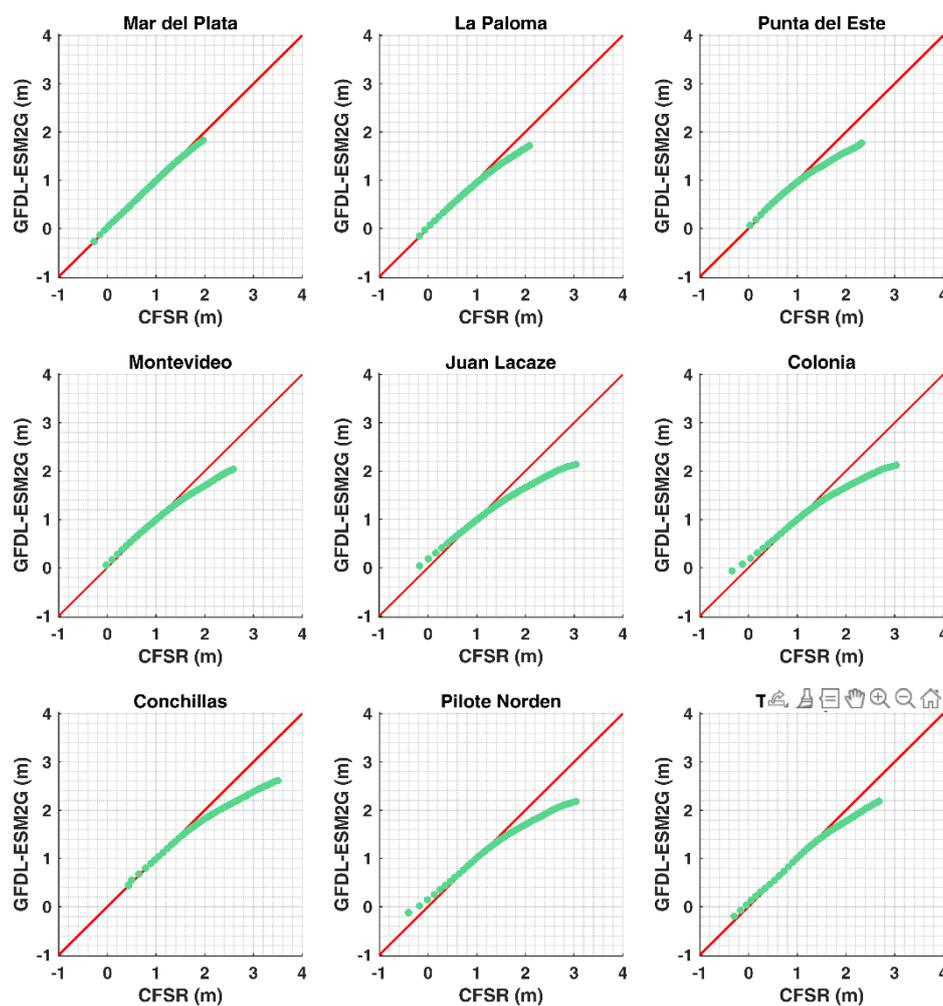


Figura 35- Gráficos cuantil-cuantil de nivel de mar resultado del modelo local forzado con vientos y presiones del modelo GFDL-ESM2G vs nivel de mar resultado del modelo local forzado con vientos CFSR en 9 estaciones seleccionadas del modelo local.

6.2.1.5 MIROC5

En la Figura 36 se muestran los gráficos cuantil-cuantil de los niveles de reanálisis y los niveles obtenidos del modelo local forzado con vientos y presiones del modelo MIROC5. El modelo local

forzado con vientos y presiones de MIROC5 muestra un muy buen comportamiento, mostrando curvas cuantil-cuantil muy alineadas con la curva identidad en todas las estaciones.

En las estaciones de la zona interior del Río de la Plata, Juan Lacaze, Colonia y Conchillas, se observa una leve subestimación por parte del modelo forzado con MIROC5 hacia los cuantiles más altos.

Los campos de cuantiles (Figura 40 a la 46) muestran los mismos patrones de distribución de niveles que el reanálisis, y bajos porcentajes de diferencia respecto a la desviación estándar del mismo. Los cuantiles bajos no superan el 20% de diferencia que se da para el cuantil 1% en la costa de Maldonado. Los cuantiles altos muestran diferencias pequeñas que no superan el 10% alrededor de la costa uruguaya para el cuantil 99% y alcanzan el 20% en alguna zona de la costa interior del estuario. El campo asociado al cuantil 50% muestra una distribución muy similar a la que muestra el reanálisis.

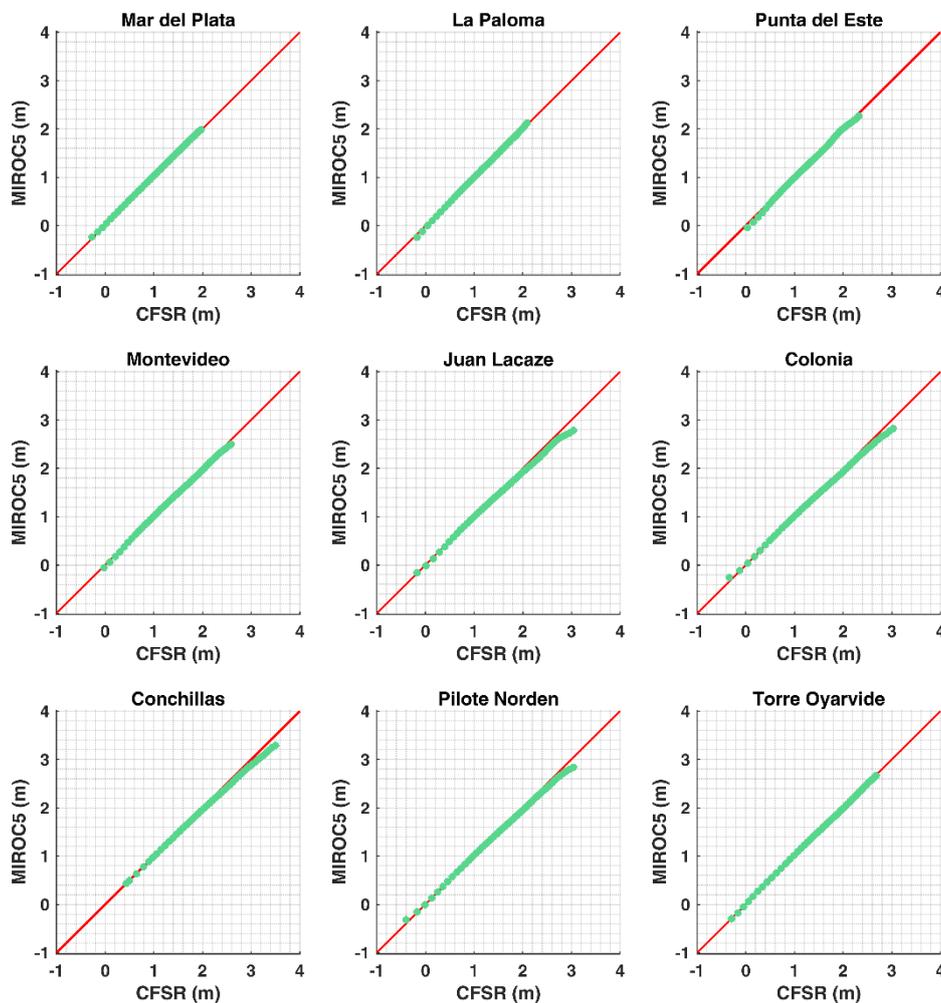


Figura 36- Gráficos cuantil-cuantil de nivel de mar resultado del modelo local forzado con vientos y presiones del modelo MIROC5 vs nivel de mar resultado del modelo local forzado con vientos CFSR en 9 estaciones seleccionadas del modelo local.

6.2.1.6 *IPSL-CM5A-MR*

En la Figura 37 se muestran los gráficos cuantil-cuantil de los niveles de reanálisis y los niveles obtenidos del modelo local forzado con vientos y presiones del modelo IPSL-CM5A-MR. Se observa un buen comportamiento por parte del modelo en Mar del Plata. En La Paloma se comienza a observar una subestimación de los cuantiles más altos por parte del modelo local forzado con IPSL-CM5A-MR. Hacia las estaciones interiores del estuario el comportamiento es malo, alcanzándose subestimaciones de más de 60 cm. Además, también se observan sobreestimaciones de los cuantiles más bajos, sobre todo en Juan Lacaze, Colonia y Pilote Norden, aunque no tan acentuadas.

Los campos de cuantiles (Figura 40 a la 46) muestran patrones de distribución de niveles similares a los de reanálisis. Como se desprende del comportamiento en las estaciones, los cuantiles bajos presentan menores diferencias respecto a la desviación estándar del reanálisis que los cuantiles altos. Los cuantiles bajos no superan el 10% de la diferencia en la costa uruguaya ni en la mayor parte del dominio. Los cuantiles altos muestran diferencias importantes que se extienden a lo largo de la costa uruguaya desde un 60% para el cuantil 95% hasta superar el 70% para el cuantil 99.9%. El cuantil asociado al 50% vuelve a mostrar buen comportamiento respecto al reanálisis.

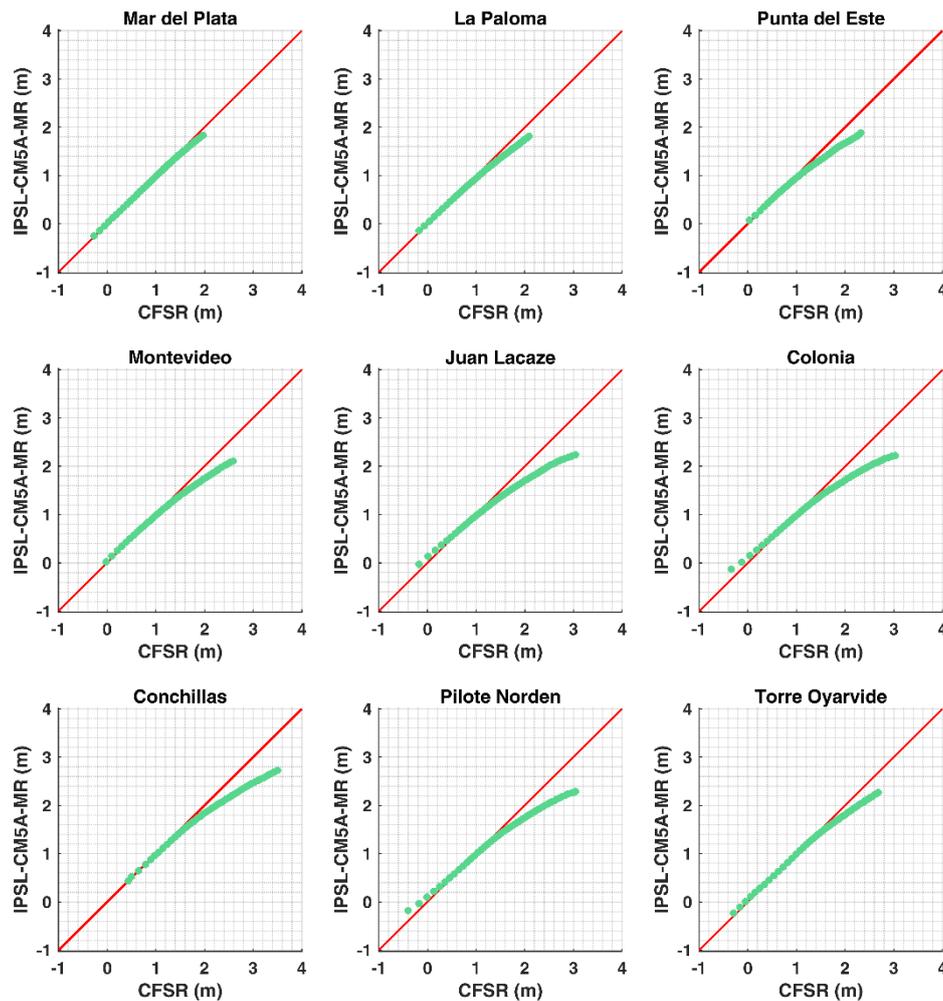


Figura 37- Gráficos cuantil-cuantil de nivel de mar resultado del modelo local forzado con vientos y presiones del modelo IPSL-CM5A-MR vs nivel de mar resultado del modelo local forzado con vientos CFSR en 9 estaciones seleccionadas del modelo local.

6.2.1.7 HadGEM2-ES

En la Figura 38 se muestran los gráficos cuantil-cuantil de los niveles de reanálisis y los niveles obtenidos del modelo local forzado con vientos y presiones del modelo HadGEM2-ES. Nuevamente se observa un buen comportamiento en la estación de Mar del Plata y un comportamiento bueno, pero subestimando los cuantiles más altos en La Paloma. En el resto de las estaciones el comportamiento no es bueno y se observa una gran rotación en sentido horario de la curva cuantil-cuantil respecto la línea identidad en la mayoría de las estaciones. En este caso se observan también grandes sobreestimaciones de los cuantiles más bajos, como por ejemplo en Juan Lacaze donde puede verse una subestimación de los cuantiles altos que superan los 60 cm y una sobre estimación de los más bajos de hasta 15 cm.

Los campos de cuantiles (Figura 40 a la 46) muestran patrones de distribución similares a los de reanálisis, aunque tanto en cuantiles bajos como altos las diferencias que muestran los contornos son altas. Mientras que en los cuantiles bajos se alcanza el 40% de diferencia para el cuantil 0.1%. En los cuantiles más altos las diferencias alcanzan el 40% a lo largo de la costa

uruguaya para el cuantil 95%, y superan el 70% para el cuantil 99% y el 99.9%. El cuantil asociado al 50% vuelve a mostrar buen compartimento respecto al reanálisis.

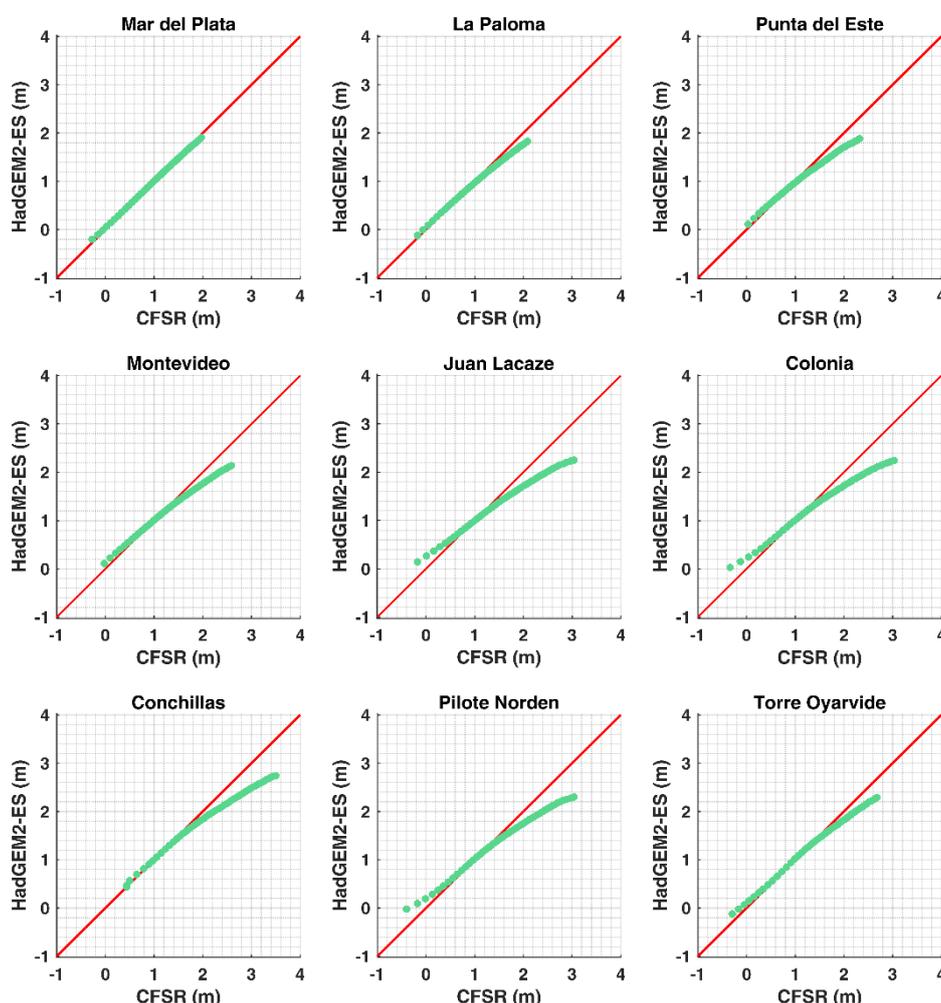


Figura 38- Gráficos cuantil-cuantil de nivel de mar resultado del modelo local forzado con vientos y presiones del modelo HadGEM2-ES vs nivel de mar resultado del modelo local forzado con vientos CFSR en 9 estaciones seleccionadas del modelo local.

6.2.1.8 Ensemble

En la Figura 39 se muestran los gráficos cuantil-cuantil de los niveles de reanálisis y los niveles obtenidos del ensemble del modelo local forzado con vientos y presiones de los 7 modelos atmosféricos globales. Se observa de forma clara el efecto de combinar resultados satisfactorios y no tan satisfactorios. Mientras que en las estaciones de la zona exterior el comportamiento no es malo, subestimando el ensemble los cuantiles más altos sobre todo en Punta del este, en las estaciones interiores el comportamiento empeora, producto de los miembros del ensemble con peor comportamiento en estas estaciones (HadGEM2-ES, GFDL-ESM2G y CNRM-CM5). En las estaciones interiores se observan subestimaciones de hasta 60 cm de los cuantiles más altos. Respecto a los cuantiles más bajos, los mismos son sobrestimados por menos de 15 cm en las estaciones de Juan Lacaze, Colonia y Pilote Norden.

Respecto a los campos de los niveles asociados a los cuantiles altos y bajos (Figura 40 a la 46), se tiene un comportamiento bueno en general. Para los cuantiles 0.1%, 1% las diferencias apenas superan el 20% de la desviación estándar del reanálisis, y para el cuantil 5% no superan el 10%. El campo asociado a la mediana muestra apenas una zona en el centro del dominio con diferencias respecto al reanálisis que alcanzan el 10% de su desviación. Los cuantiles altos no muestran un comportamiento tan bueno como los más bajos alcanzando diferencias más altas respecto al reanálisis que llegan al 50% de la desviación estándar de este último, a lo largo de la costa para el cuantil 99%.

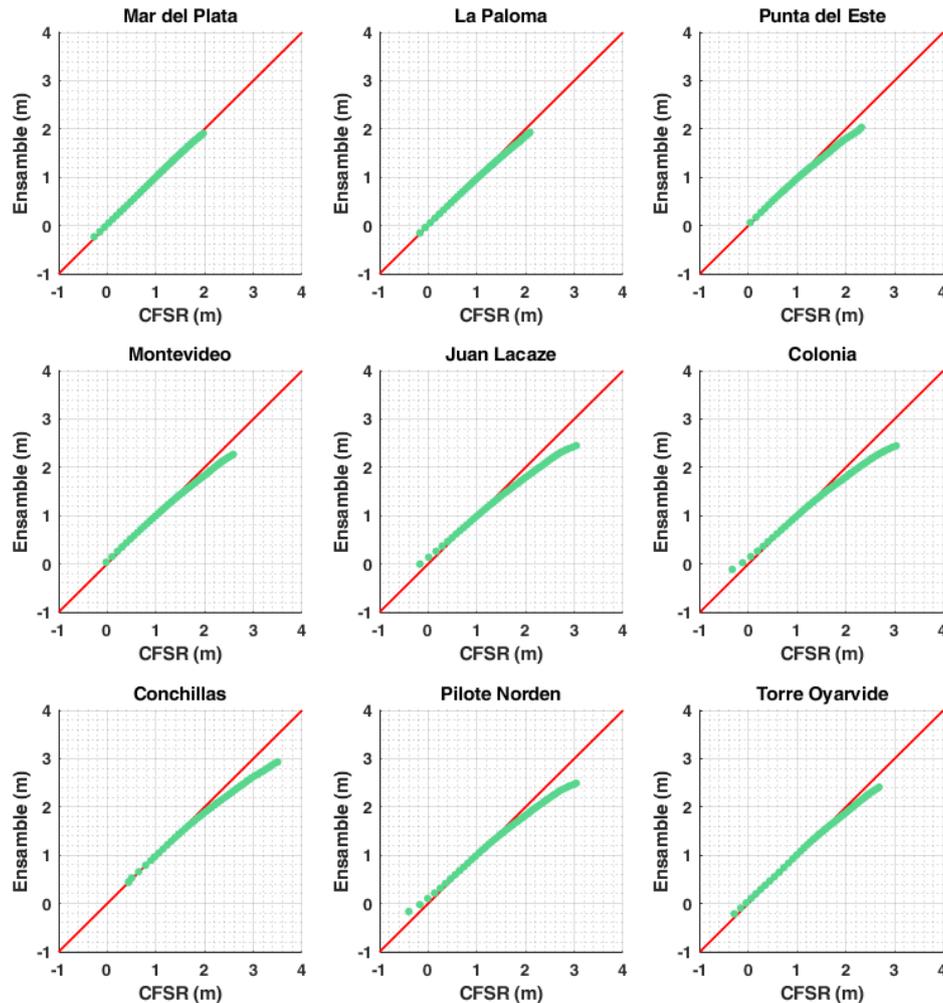


Figura 39- Gráficos cuantil-cuantil de nivel de mar resultado del ensamble del modelo forzado con los 7 modelos atmosféricos vs nivel de mar resultado del modelo local forzado con vientos CF SR en 9 estaciones seleccionadas del modelo local.

Cuantil 0.1%

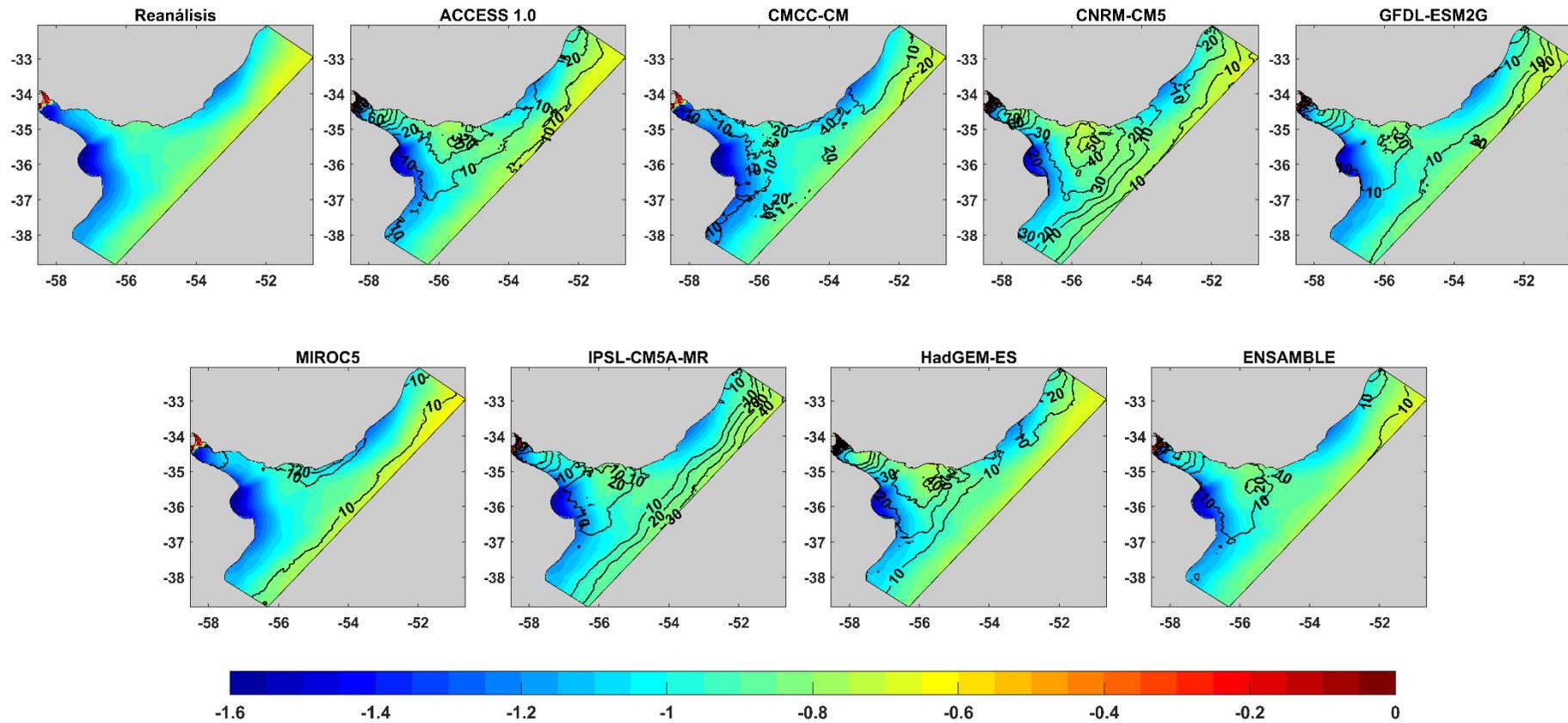


Figura 40- Distribución espacial del cuantil 0.1% de nivel de mar resultado del reanálisis (modelo local forzado con CFSR), del modelo local forzado con los 7 modelos atmosféricos globales y del ensamble. Los contornos indican el % (respecto a la desviación estándar) de diferencia entre el nivel de reanálisis y el modelado con los respectivos modelos.

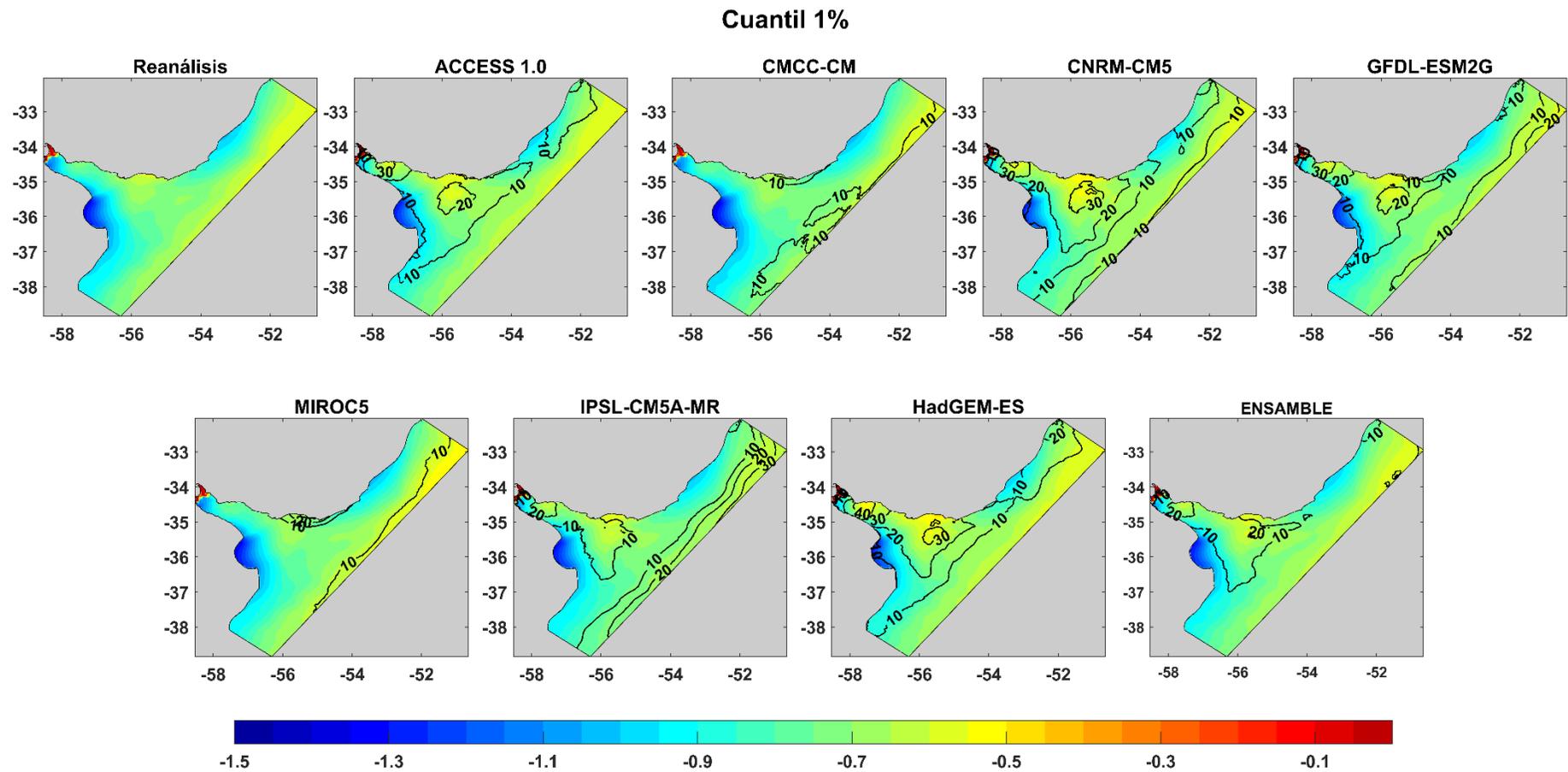


Figura 41- Distribución espacial del cuantil 1% de nivel de mar resultado del reanálisis (modelo local forzado con CFSR), del modelo local forzado con los 7 modelos atmosféricos globales y del ensamble. Los contornos indican el % (respecto a la desviación estándar) de diferencia entre el nivel de reanálisis y el modelado con los respectivos modelos.

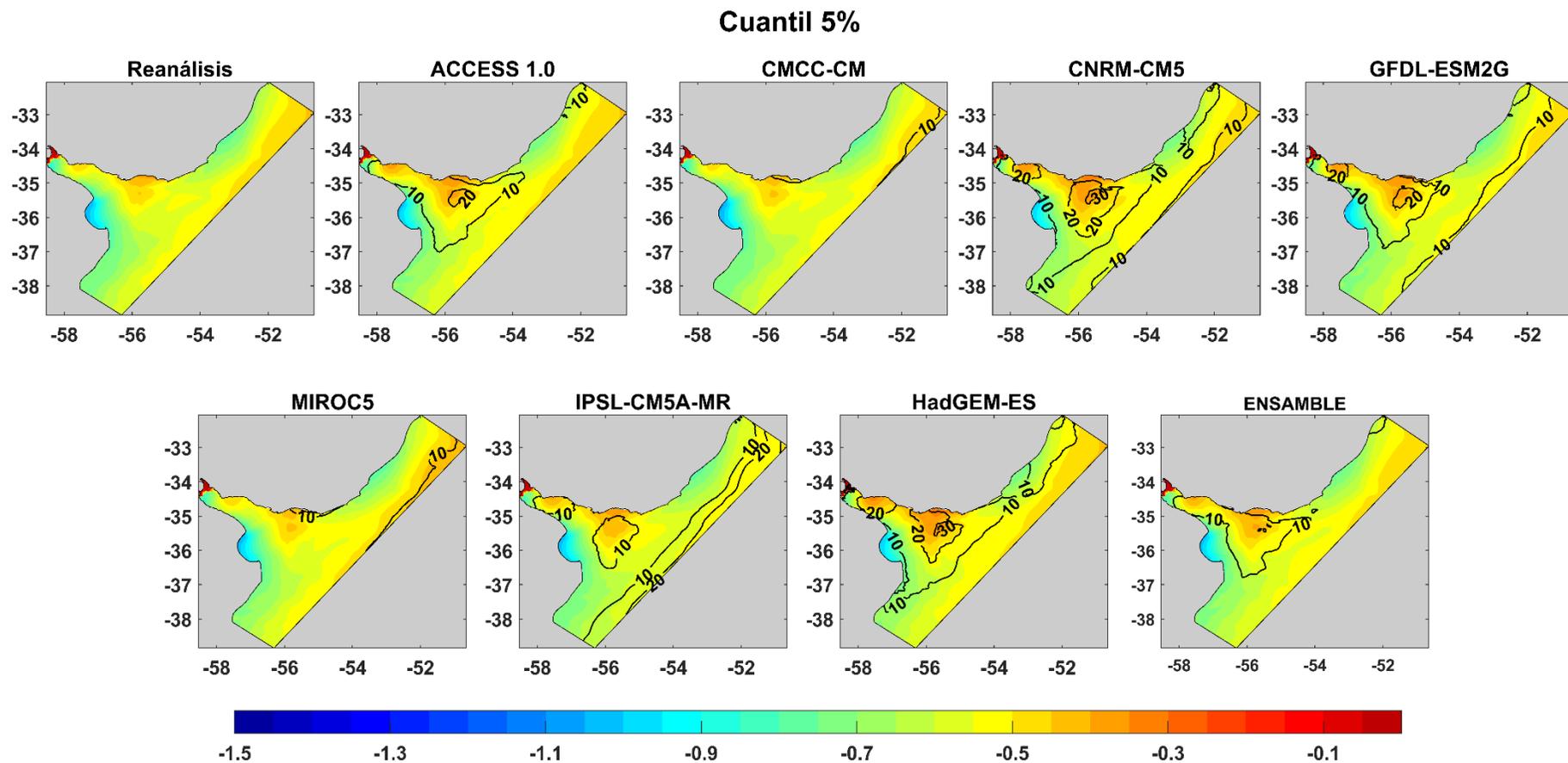


Figura 42- Distribución espacial del cuantil 5% de nivel de mar resultado del reanálisis (modelo local forzado con CFSR), del modelo local forzado con los 7 modelos atmosféricos globales y del ensamble. Los contornos indican el % (respecto a la desviación estándar) de diferencia entre el nivel de reanálisis y el modelado con los respectivos modelos.

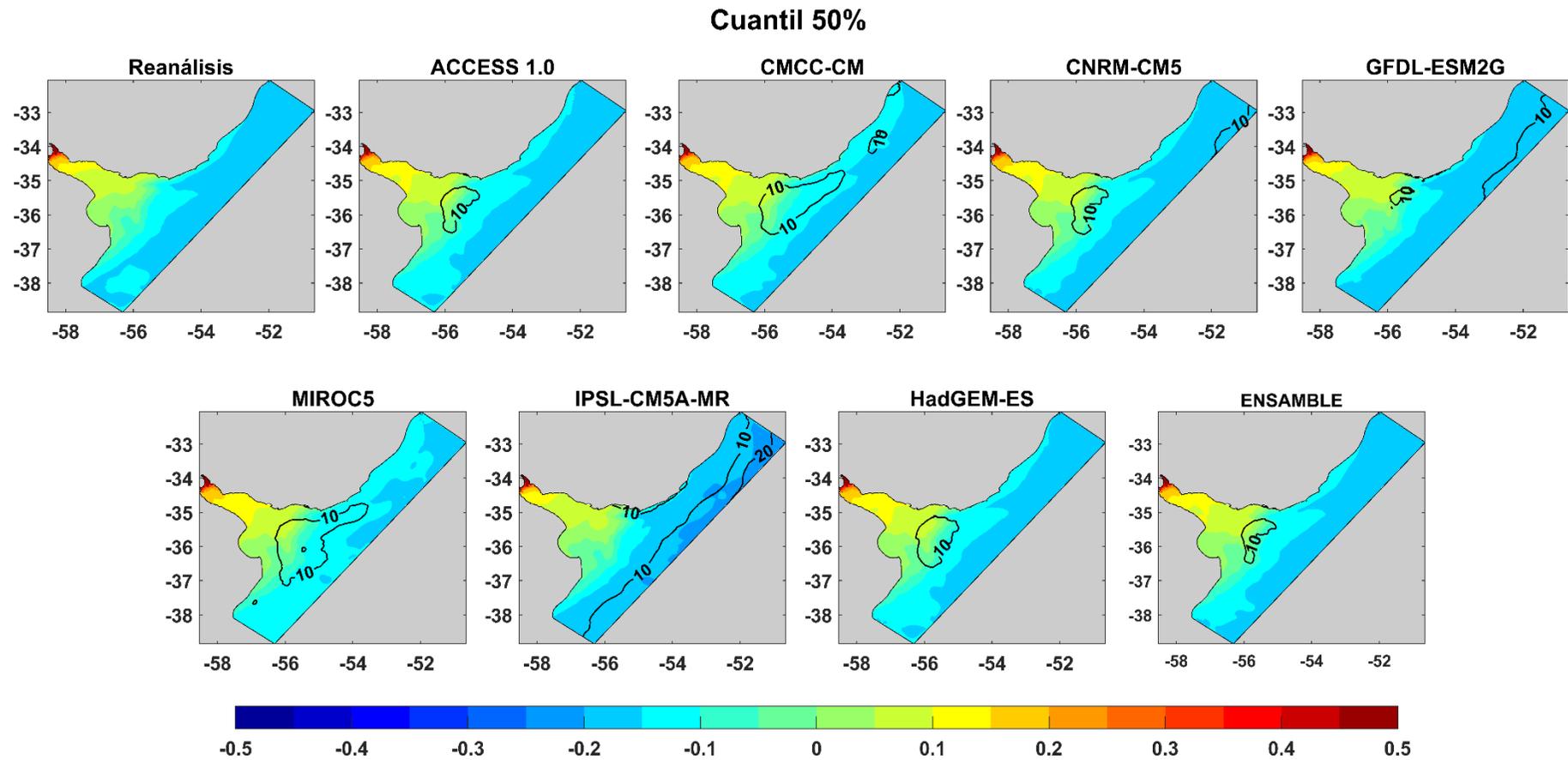


Figura 43- Distribución espacial del cuantil 50% de nivel de mar resultado del reanálisis (modelo local forzado con CFSR), del modelo local forzado con los 7 modelos atmosféricos globales y del ensamble. Los contornos indican el % (respecto a la desviación estándar) de diferencia entre el nivel de reanálisis y el modelado con los respectivos modelos.

Cuantil 95%

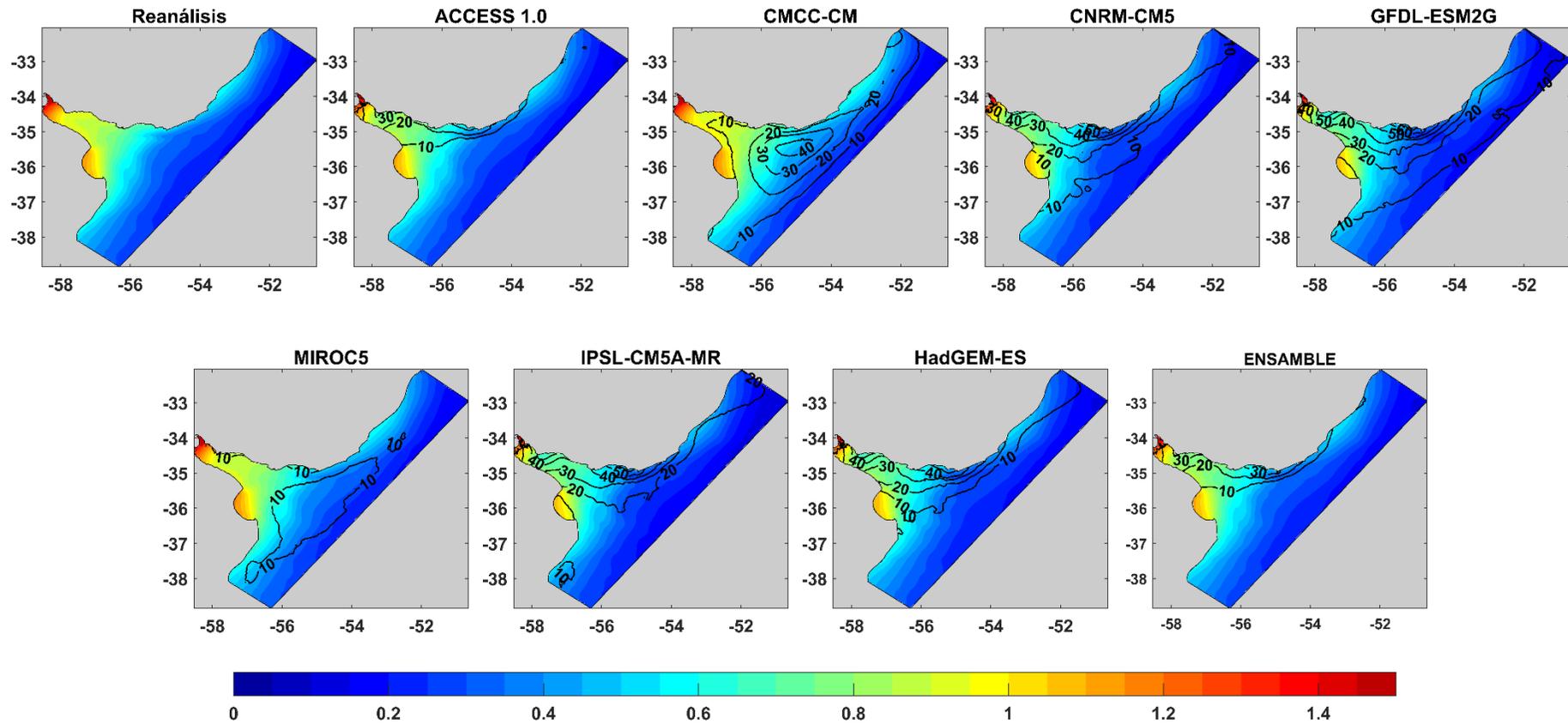


Figura 44- Distribución espacial del cuantil 95% de nivel de mar resultado del reanálisis (modelo local forzado con CFSR), del modelo local forzado con los 7 modelos atmosféricos globales y del ensamble. Los contornos indican el % (respecto a la desviación estándar) de diferencia entre el nivel de reanálisis y el modelado con los respectivos modelos.

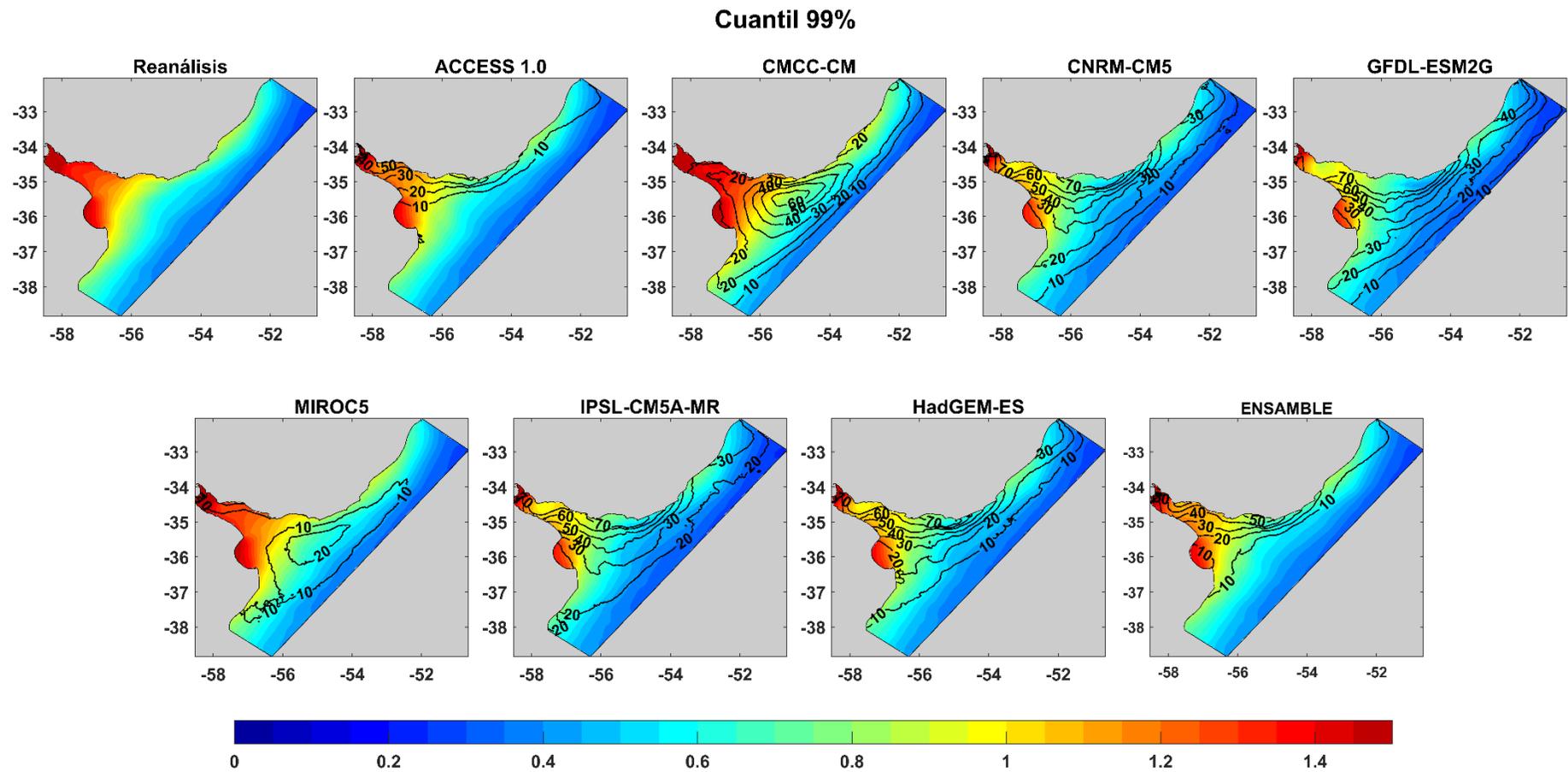


Figura 45- Distribución espacial del cuantil 99% de nivel de mar resultado del reanálisis (modelo local forzado con CFSR), del modelo local forzado con los 7 modelos atmosféricos globales y del ensamble. Los contornos indican el % (respecto a la desviación estándar) de diferencia entre el nivel de reanálisis y el modelado con los respectivos modelos.

Cuantil 99.9%

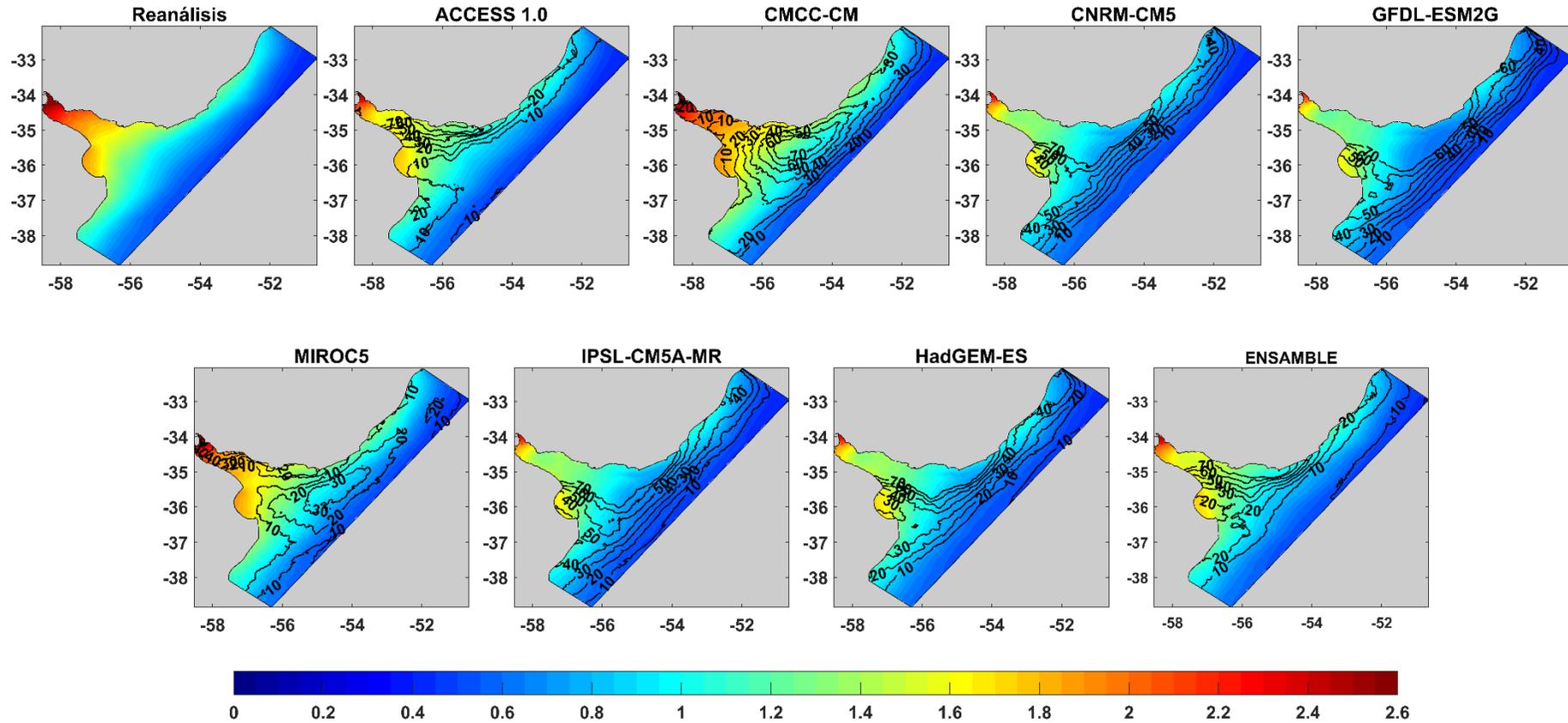


Figura 46- Distribución espacial del cuantil 0.1% de nivel de mar resultado del reanálisis (modelo local forzado con CFSR), del modelo local forzado con los 7 modelos atmosféricos globales y del ensamble. Los contornos indican el % (respecto a la desviación estándar) de diferencia entre el nivel de reanálisis y el modelado con los respectivos modelos.

6.2.1.9 Síntesis

La evaluación del modelo hidrodinámico local forzado con vientos y presiones de los siete modelos atmosféricos globales utilizados en este estudio muestra una calidad variable. Mientras que los resultados obtenidos al forzar con MIROC5 y CMCC-CM son ampliamente satisfactorios en todas las estaciones de comparación, los obtenidos con ACCESS 1.0 son muy satisfactorios en las estaciones situadas hacia el exterior del estuario y desmejoran hacia el interior, y los resultados obtenidos CNRM-CM5A, GFDL-ESM2G, IPSL-CM5A_MR y HadGEM-ES desmejoran notoriamente en la zona interior del estuario, alcanzando diferencias de hasta 80 cm en los cuantiles elevados.

A modo de síntesis, en la Figura 47 se muestran los boxplots de niveles obtenidos del modelo local forzando con los 7 modelos atmosféricos y el reanálisis, en tres puntos de la costa Uruguay: Colonia, Montevideo y La Paloma. Las cajas indican el intervalo intercuantil (desde el cuantil 25 hasta el cuantil 75) y en verde se indican los valores que superan (o están por debajo) del valor del cuantil 75 (cuantil 25) más (menos) dos veces el intervalo intercuantil, extendiéndose hasta los valores máximos y mínimos. En negro se indica el nivel medio y en rojo los cuantiles 0.95 y 0.05 para cada caso, que se unen de forma de poder percibir mejor la variabilidad de estos valores entre modelos. Consistentemente con los resultados que se desprenden de los gráficos cuantil-cuantil se observa que tanto la dimensión de la caja como la amplitud de valores entre mínimos y máximos de los modelos MIROC5 y CMCC-CM son los que más se asemejan al reanálisis. Este último a su vez, en Colonia alcanza máximos bastante más altos que cualquiera de los modelos atmosféricos globales. Respecto a los cuantiles 0.05 se observa que son muy similares para los 8 casos mientras que el cuantil 0.95 muestra una mayor variabilidad y se vuelve a notar que los más similares son los correspondientes al MIROC5, CMCC-CM y el reanálisis. En particular se observa que los diferentes modelos abarcan rangos de nivel muy distintos al considerar los valores extremos para una misma estación. Por ejemplo, en Montevideo GFDL-ESM2G abarca 2,5 m mientras que tanto MIROC5 como CMCC-CM alcanzan los 3,5 m.

De la comparación de los campos de cuantiles se desprenden importantes conclusiones respecto al comportamiento del modelo local forzado con los diferentes modelos atmosféricos. Se observa principalmente que los patrones de distribución de niveles para los diversos cuantiles son similares en todos los casos, aunque se observa un amplio rango de diferencias respecto a la desviación estándar de los niveles de reanálisis. En términos generales los cuantiles bajos (0.1%, 1% y 5%) muestran valores de nivel más bajos en la zona de bahía de Sanboronbón que se extiende hacia la costa oceánica y en la zona de desembocadura de los ríos afluentes Paraná y Uruguay. Los niveles más altos se encuentran alrededor de la zona de Montevideo aguas adentro. Por otra parte los cuantiles altos (95%, 99% y 99.9%) muestran niveles más altos en la zona interior del estuario (recta Montevideo-Punta Rasa hacia el interior) cubriendo completamente la bahía de Sanboronbón.

Respecto a las diferencias mostradas por cada modelo en los cuantiles bajos se observan diferencias que no superan el 30% alrededor de la costa uruguaya para ningún modelo, exceptuando el HadGEM2-ES. Los cuantiles altos pasan a mostrar diferencias más importantes. El mejor comportamiento se observa particularmente forzando con el modelo MIROC5 que muestra diferencias de hasta un 30%. Luego le siguen CMCC-CM y ACCESS 1.0 mostrando

diferencias de hasta 60%. El resto de los modelos muestran diferencias importantes que superan el 70% a lo largo de la costa uruguaya y en todo el dominio, para los cuantiles 99% y 99.9%.

Al evaluar el ensamble de los modelos se observa que el mismo subestima los cuantiles más altos en las diferentes estaciones. Al analizar los campos asociados a los diferentes cuantiles, las diferencias respecto al reanálisis son más altas en los cuantiles más altos. En particular se alcanza una diferencia del 50% de la desviación estándar a lo largo de la costa para el cuantil 99%.

Cabe destacar que la representación del cuantil 0.50 es muy buena por parte de todos los modelos y del ensamble, y no se observan diferencias respecto al reanálisis mayores a un 10% de su desviación estándar, dándose esto en la zona central del dominio. Por otra parte, debido a las particulares de la zona de la desembocadura de los ríos afluentes Paraná y Uruguay, y efectos de mojado y secado de las celdas del modelo en esa zona, se determina no analizar los resultados de las proyecciones desde la desembocadura de los ríos afluentes hasta la línea que une Conchillas con Buenos Aires.

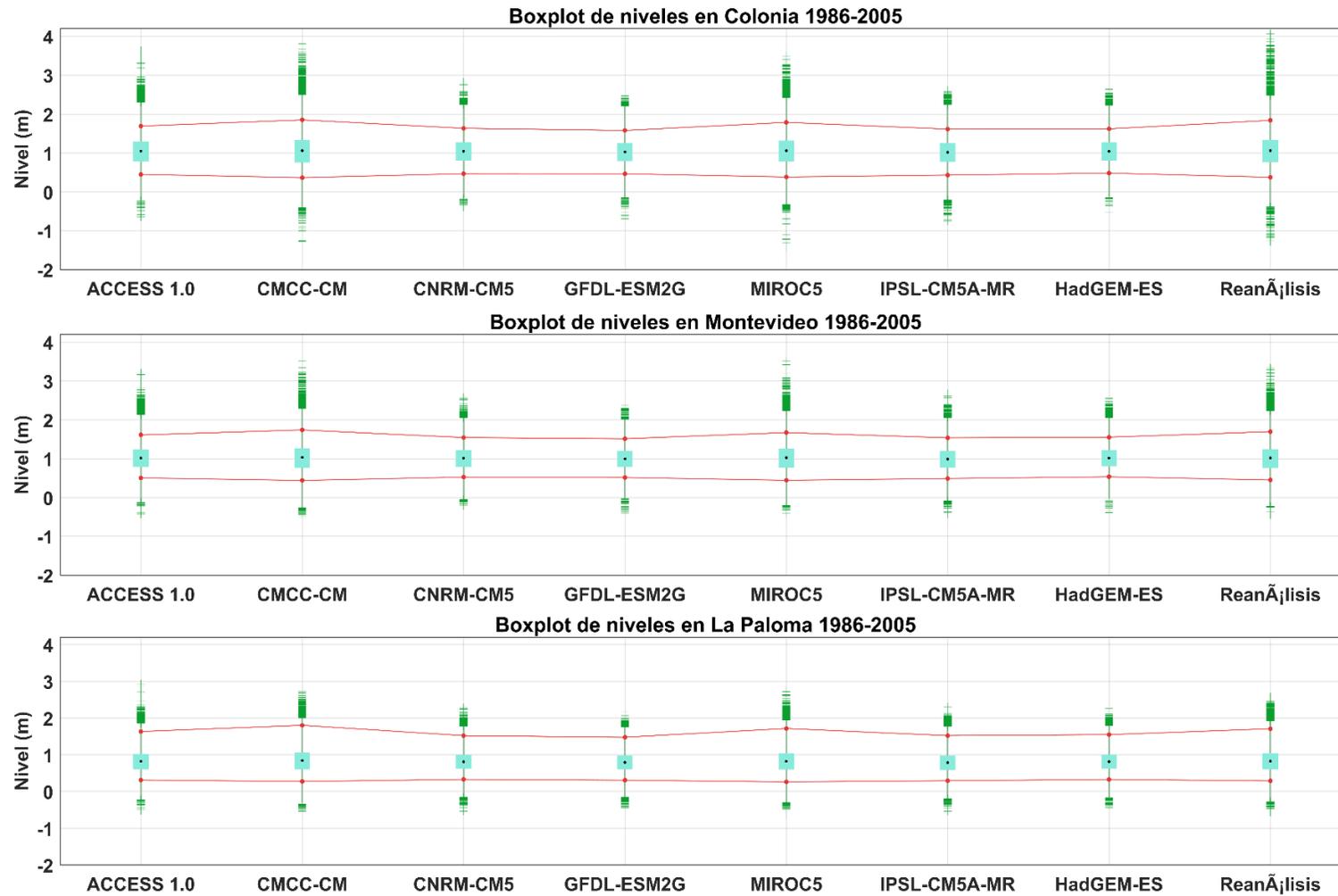


Figura 47- Boxplots de niveles de reanálisis y del modelo local forzado con los 7 modelos atmosféricos globales, en 3 estaciones del dominio de estudio: Colonia, Montevideo y La Paloma. En verde se muestran los valores que superan (o caen por debajo) del cuantil 75 (cuantil 25) más (menos) 2 veces el intervalo intercuantil ($q_{75}-q_{25}$). Los puntos rojos indican los cuantiles 5% y 95%.

6.3 Modelo local: períodos futuros

El análisis de resultados de las proyecciones de nivel de mar se realiza enfocándose en diferentes escalas tanto espaciales como temporales. El Nivel de Mar Total, al que notaremos como NMT de aquí en adelante, es el resultado del modelo, a efectos del análisis a realizar se considera compuesto por (ver ec.28):

- Nivel Medio del Mar Regional impuesto como condición de contorno e inicial en cada año simulado ($NMM_{impuesto}$), según lo indicado en la sección 5.5.
- La diferencia entre el $NMM_{impuesto}$ y el Nivel Medio del Mar calculado en cada punto ($NMM_{modelo} = NMM - NMM_{impuesto}$). Esta componente del nivel medio del mar es producto de la dinámica atmosférica propia de cada modelo.
- Las variaciones respecto al nivel medio, compuestas por la marea meteorológica (M_{met}) y la marea astronómica (M_{ast}), cuyo cálculo se presentan en las secciones 6.3.4 y 6.3.5 respectivamente.

A su vez llamaremos Nivel de Mar sin Aumento Regional $NMSR$ a la suma de las componentes NMM_{modelo} , M_{met} y M_{ast} , tal como indica la ecuación 29.

$$NMT = NMM_{impuesto} + NMSR$$

Ecuación 28

$$NMSR = NMM_{modelo} + M_{met} + M_{ast}$$

Ecuación 29

El interés principal desde el punto de vista de la gestión costera y el que condiciona principalmente obras y actividades es el NMT , sin embargo, parte del objetivo de este trabajo de tesis es conocer los cambios en la dinámica de las ondas de marea inducidas tanto por el aumento del nivel medio de mar como por el forzante atmosférico, es por esta razón que el análisis se realiza sobre las variables NMT , $NMSR$, NMM_{modelo} , M_{met} y M_{ast} .

El $NMM_{impuesto}$ es el mismo para toda la costa y no depende de los forzantes atmosféricos, razón por la cual se suprime del resultado del modelo, con el fin de analizar mejor los demás efectos. Por otra parte, el NMM_{modelo} si depende de los forzantes atmosféricos pero es de escala espacial similar a la de la región de análisis, es decir, aproximadamente uniforme en todo el dominio. Luego, las variaciones en la M_{met} y la M_{ast} se analizan por separado debido a que tienen distinto origen, mientras que M_{met} depende del forzante atmosférico, M_{ast} es esperable que no, a no ser que dependa del forzante atmosférico por influencia indirecta de la interacción entre M_{met} y NMM_{modelo} .

Debido a que la región de interés es la costa uruguaya, los resultados espaciales se muestran en un dominio reducido del modelo local que comprende toda la costa uruguaya, y la mayor parte del Río de la Plata interior e intermedio, estos solo se analizan para el $NMSR$. El resto de los resultados se extraen de nodos localizados cercanos a la costa que abarcan toda su longitud desde Conchillas hasta el Chuy.

Para analizar los cambios para cualquiera de las variables se calculan diferencias entre resultados asociados a los bloques temporales futuros e históricos. Todas las diferencias se

calculan restando los estadísticos correspondientes del bloque futuro menos los correspondientes al bloque histórico (obtenidos del modelo local forzado con el mismo modelo atmosférico en ambos bloques temporales) de forma que un valor positivo indica aumento y un valor negativo descenso.

Los cuantiles extremos analizados en todos los casos son el cuantil 1% y el cuantil 99%. Considerando una cantidad de datos mínima de 155.520 datos (un dato horario para el caso de años de 360 días considerando un bloque de 18 años), analizando el cuantil 0.01 se estarían dejando aproximadamente 1555 datos horarios sobre dicho umbral. Considerando eventos extremos de bajas de nivel de duración de 4 horas se estarían caracterizando más de 380 eventos extremos, lo cual resulta adecuado si se quieren caracterizar los eventos extremos del bloque futuro y no particularidades de los eventos extremos arrojadas por el modelo local forzado con cada modelo atmosférico. Con un razonamiento análogo se llega a que para el análisis que se busca en este trabajo de tesis es razonable analizar el cuantil 99%. Luego, para el *NMT* y el *NMSR* también se analiza la media, además de los cuantiles. Todos los estadísticos descriptos anteriormente se calculan también para el ensamble de los modelos, como la media de los estadísticos obtenidos a partir de cada modelo.

6.3.1 Significancia de los resultados obtenidos

Hoy día por obvios motivos no existe evidencia específica de qué tan bien representan el clima de nivel de mar futuro las proyecciones obtenidas de forzar modelos numéricos con resultados del CMIP5. Hasta el momento la metodología para conocer más acerca de la calidad de los resultados consta de evaluar los períodos históricos de los modelos utilizados para luego contrastarlos con resultados de referencia y así contar con una medida de qué tan alejados se encuentran los resultados, al menos durante un período de tiempo. Sin embargo, como el foco de este estudio es cuantificar cambios de nivel de mar para períodos futuros, resulta de interés introducir análisis que cuantifiquen si dichos cambios son significativos o no. De una amplia revisión bibliográfica se desprende que las diversas comunidades que trabajan con proyecciones dinámicas y estadísticas de nivel de mar y oleaje realizadas a partir de resultados de modelos atmosféricos del CMIP5, utilizan metodologías diferentes para considerar significativos o robustos los cambios obtenidos así como para cuantificar su incertidumbre. Además, se analiza de forma diferente la significancia de las variables medias del ensamble y de las variables obtenidas por cada modelo perteneciente al ensamble.

Una de las convenciones más utilizadas para evaluar la significancia de la media del ensamble de una variable es analizar si el cambio proyectado de dicha media, supera o no en valor absoluto a la desviación estándar inter-modelo (desviación estándar calculada a partir de la variable analizada obtenida de cada modelo). Mientras que algunos de los trabajos analizan este aspecto desde el coeficiente de variabilidad (CV) (Vousdouskas et al 2016, Vousdouskas et al 2017, Alfieri et al 2015), otros lo hacen analizando directamente si la media del ensamble en valor absoluto supera la desviación estándar (Camus et al 2017, Wang et al 2017). Por otra parte, Casas-Prat et al. (2017) analiza la significancia de la media del ensamble mediante la aplicación de un student t-test al 5% de significancia. Adicionalmente, en los estudios suelen determinar cuántos miembros del ensamble proyectan el cambio en la misma dirección (Wandres et al 2017, Camus et al 2017).

Respecto a la significancia de los cambios proyectados por cada miembro del ensamble, se observó que no todos los estudios analizan este aspecto. Dentro de los que sí lo hacen, el mismo suele tratarse realizando t-test para comparar si las medias de dos muestras con diferente varianza son iguales (Casas-Prat et al 2017, Hemer et al 2013), considerando el bloque histórico y futuro forzado con el mismo modelo atmosférico.

En este trabajo de tesis la significancia de los cambios obtenidos se analiza de dos maneras y solo para el *NMSR* y sus componentes. Por una parte se determina la significancia o no del cambio en un determinado estadístico considerando el conjunto (ensamble) de los modelos. Para esto se calcula, para cada modelo, la diferencia entre el estadístico calculado a partir de proyecciones y el calculado en el período histórico. Luego, si el valor medio de las diferencias es mayor a la desviación estándar de las mismas, se asume que el cambio de dicho estadístico es significativo. Complementariamente, también se verifica que al menos 6 de los 7 modelos proyecten el mismo sentido del cambio del estadístico (aumento o disminución).

Por otra parte, para analizar la significancia de los cambios proyectados por cada miembro del ensamble, se realizó el Student t-test a los valores medios anuales de los estadísticos analizados, de forma de asegurar la independencia estadística de las muestras usadas en cada test, considerando como hipótesis nula que el estadístico correspondiente al bloque histórico es igual al del bloque futuro. El resultado de este test realizado a las series correspondientes a los nodos costeros fue el de rechazar la hipótesis nula en todos los nodos para todos los modelos y escenarios futuros, considerándose de esta forma significativos todos los cambios mostrados. Debido a lo anterior, de forma de no ser redundante en el análisis, solo se muestran los análisis de significancia de los cambios mostrados por el ensamble.

6.3.2 Cambios en el *NMT*

Primero se analizan los resultados obtenidos del *NMT* a través de boxplots modificados y con ciertos valores agregados para ayudar en la comprensión de los resultados obtenidos. Luego, se analiza el cambio para los diferentes escenarios y períodos futuros en la media y los cuantiles 1% y 99% del *NMT* a lo largo de la costa de forma de analizar la variabilidad espacial de los estadísticos a lo largo de la misma.

En la Figura 48 y 49 se muestran los boxplots asociados a los niveles obtenidos del modelo local forzado con cada modelo atmosférico global, para los 3 bloques temporales analizados y escenario RCP 4.5 y RCP 8.5 respectivamente, en 3 localidades situadas a lo largo de la costa uruguaya, Colonia, Montevideo y La Paloma. Las cajas se encuentran limitadas por el cuantil 75 y el cuantil 25 del correspondiente conjunto de datos, los bigotes se extienden hasta dos veces el intervalo intercuantil, por sobre (debajo) de los cuantiles anteriores y las cruces verdes indican valores que superan (o están por debajo) el rango abarcado por los bigotes. Los puntos negros indican el valor medio de los datos y los puntos rojos indican los cuantiles 5% y 95% (estos últimos se muestran unidos para mostrar la tendencia).

Se observa que el cambio en la media y los cuantiles 5% y 95% entre los diferentes bloques temporales de un mismo modelo viene dado principalmente por el aumento en el nivel medio regional, pues las tendencias de aumento observadas en estos estadísticos son muy similares para los 7 modelos atmosféricos y para las 3 estaciones analizadas. A modo de ejemplo, para el

escenario RCP 8.5 los cambios a largo plazo en la media en Colonia van desde 0.58 m hasta 0.61 m, en Montevideo desde 0.60 m hasta 0.63 m y en La Paloma desde 0.60 m hasta 0.62 m. Esta observación refuerza la idea que se discute al principio de la sección, de analizar por separado las diferentes componentes del nivel medio suprimiendo el aumento del nivel de mar regional.

Por otra parte, se observa como era de esperar a partir del boxplot obtenido para el período histórico (Figura 47), la variabilidad en el rango de nivel abarcado por los diferentes modelos también para los bloques futuros. Observando separadamente cada modelo, para un mismo escenario RCP, se puede ver que para algunos modelos el rango de variación de niveles se conserva más que para otros en los diferentes períodos simulados, si se considera el rango abarcado por los valores extremos. Si se observan los resultados obtenidos para los 3 períodos para ACCESS 1.0 se puede ver un rango más amplio de niveles abarcado para el período histórico que para los bloques futuros, en casi todos los casos (cualquiera de los dos escenarios y en las 3 estaciones). Luego, CMCC-CM por ejemplo, muestra un comportamiento totalmente diferente, pues los rangos de niveles abarcados se conservan o hasta tienden a crecer a mayor horizonte futuro. Lo mismo sucede para MIROC5. Otros modelos no presentan un comportamiento tan marcado, como el caso de IPSL-CM5A-MR.

BOXPLOT DE NIVELES RCP 4.5 : Histórico - Corto Plazo - Largo Plazo

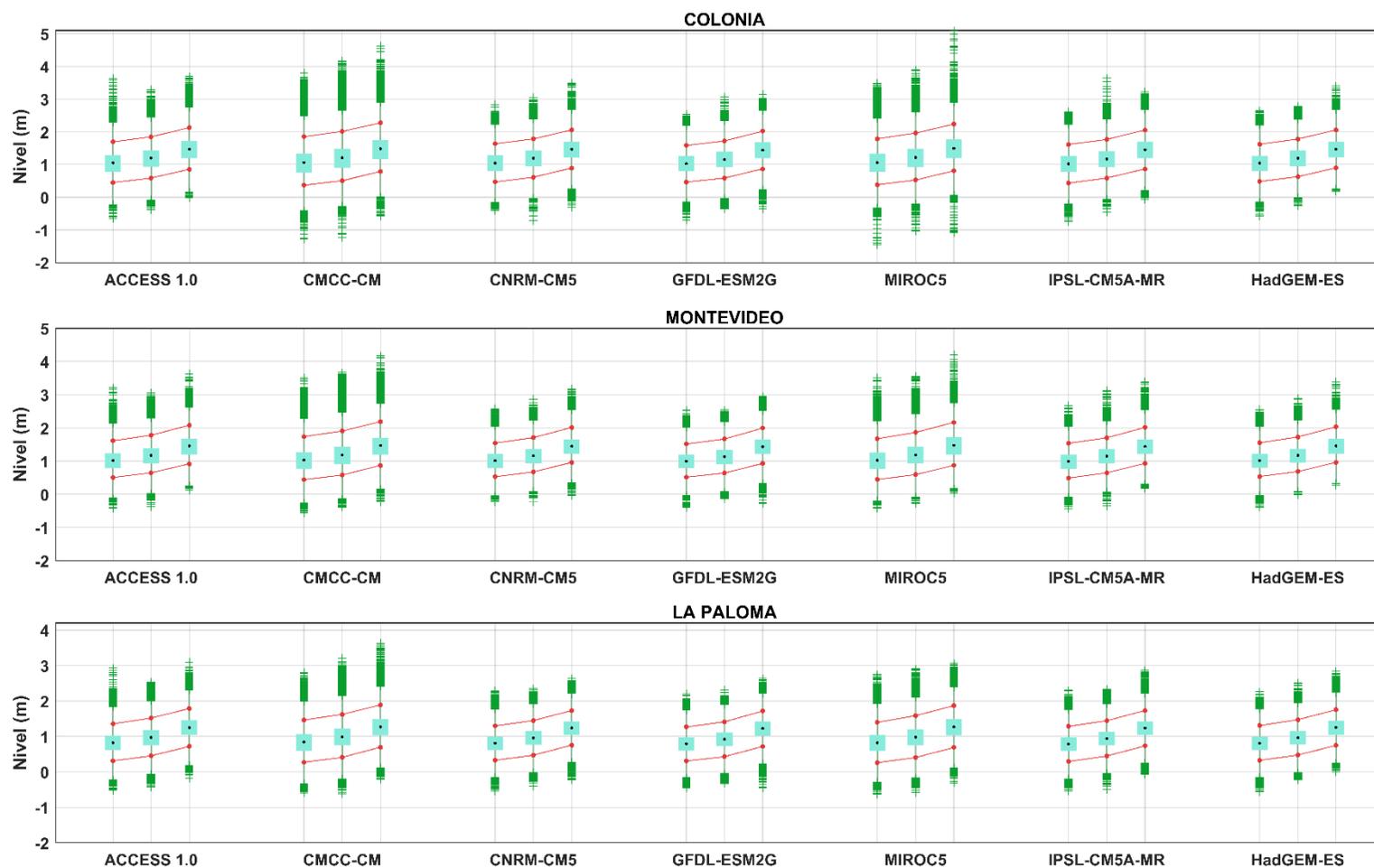


Figura 48- Boxplot de niveles obtenidos del modelo local forzado con cada modelo atmosférico global para el periodo histórico, corto plazo y largo plazo para el escenario RCP 4.5. Los puntos negros indican la media de cada período. En verde se muestran los valores que superan (o caen por debajo) del cuantil 75 (cuantil 25) más (menos) 2 veces el intervalo intercuantil ($q75-q25$). Los puntos rojos indican los cuantiles 5% y 95%.

BOXPLOT DE NIVELES RCP 8.5 : Histórico - Corto Plazo - Largo Plazo

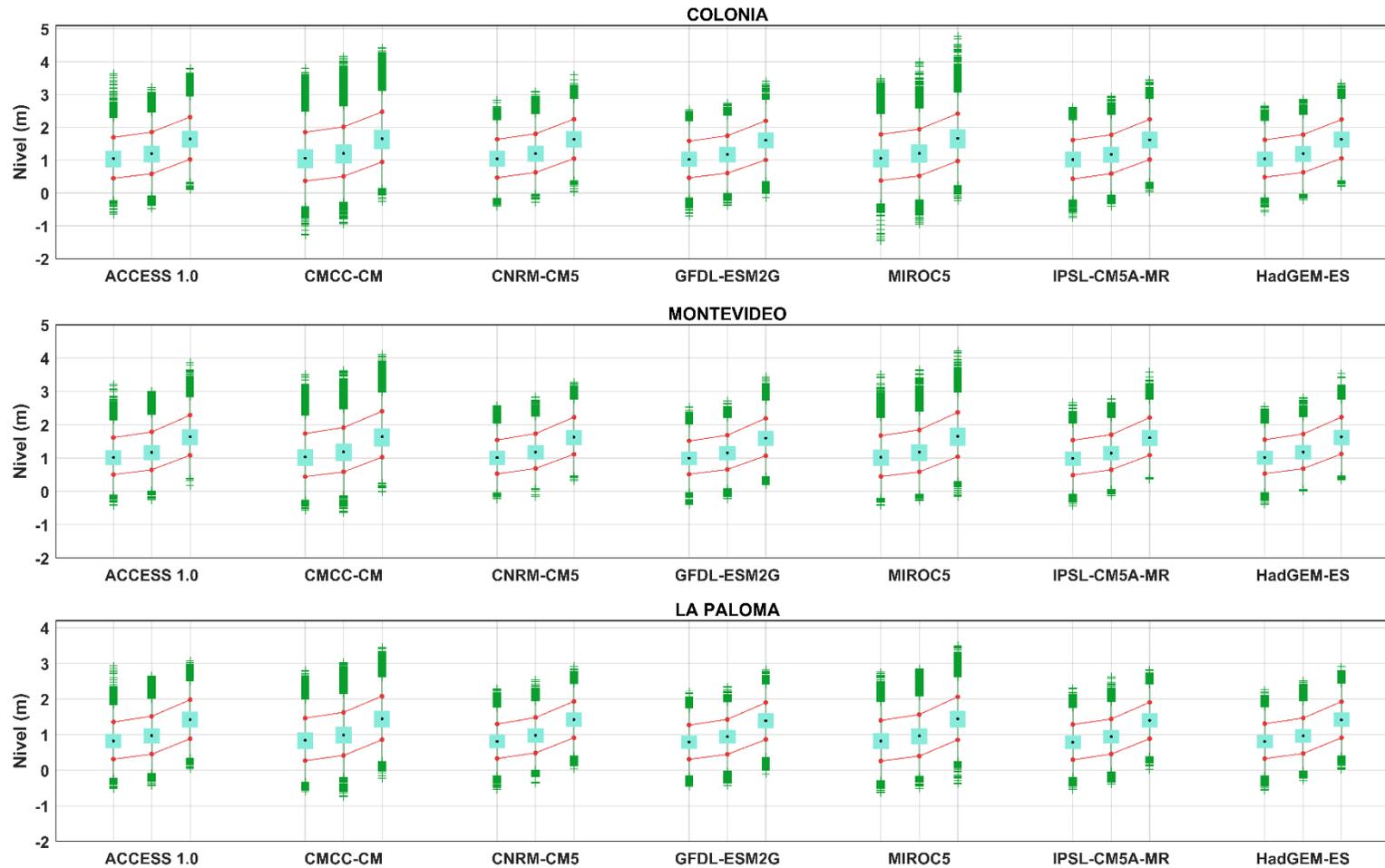


Figura 49- Boxplot de niveles obtenidos del modelo local forzado con cada modelo atmosférico global para el periodo histórico, corto plazo y largo plazo para el escenario RCP 8.5. Los puntos negros indican la media de cada período. En verde se muestran los valores que superan (o caen por debajo) del cuantil 75 (cuantil 25) más (menos) 2 veces el intervalo intercuantil (q75-q25). Los puntos rojos indican los cuantiles 5% y 95%.

En la Figura 50 se muestra el cambio en la media del *NMT* a corto y largo plazo y para ambos escenarios RCP, obtenidos de forzar el modelo local con los 7 modelos atmosféricos, en negro se muestran los respectivos ensambles. A corto plazo, el ensamble de los resultados muestra un cambio en la media constante a lo largo de la costa (exceptuando el punto más interior del estuario donde el cambio es mínimo) próximo a los 15 cm para el escenario RCP 4.5, y para el RCP 8.5 próximo a 15,5 cm. Lo mismo se observa a largo plazo, donde se tiene valores entre 43 cm y 45 cm para el escenario RCP 4.5 y entre 61 cm y 62 cm para el escenario RCP 8.5.

En general todos los modelos muestran un cambio básicamente constante a lo largo de la costa, alguno con un leve aumento hacia el Este, como puede verse a corto plazo para el escenario RCP 8.5 para el modelo CNRM-CM5 o a corto plazo para el escenario RCP 4.5 para MIROC5. Por otra parte, se observa a corto plazo para el escenario RCP 4.5 y a largo plazo para el escenario RCP 8.5 que el modelo GFDL-ESM2G se despegaba del resto de los modelos mostrando los menores cambios. Luego a corto plazo para el escenario RCP 8.5 se despegaba del resto de los modelos el modelo CNRM-CM5 mostrando los mayores cambios.

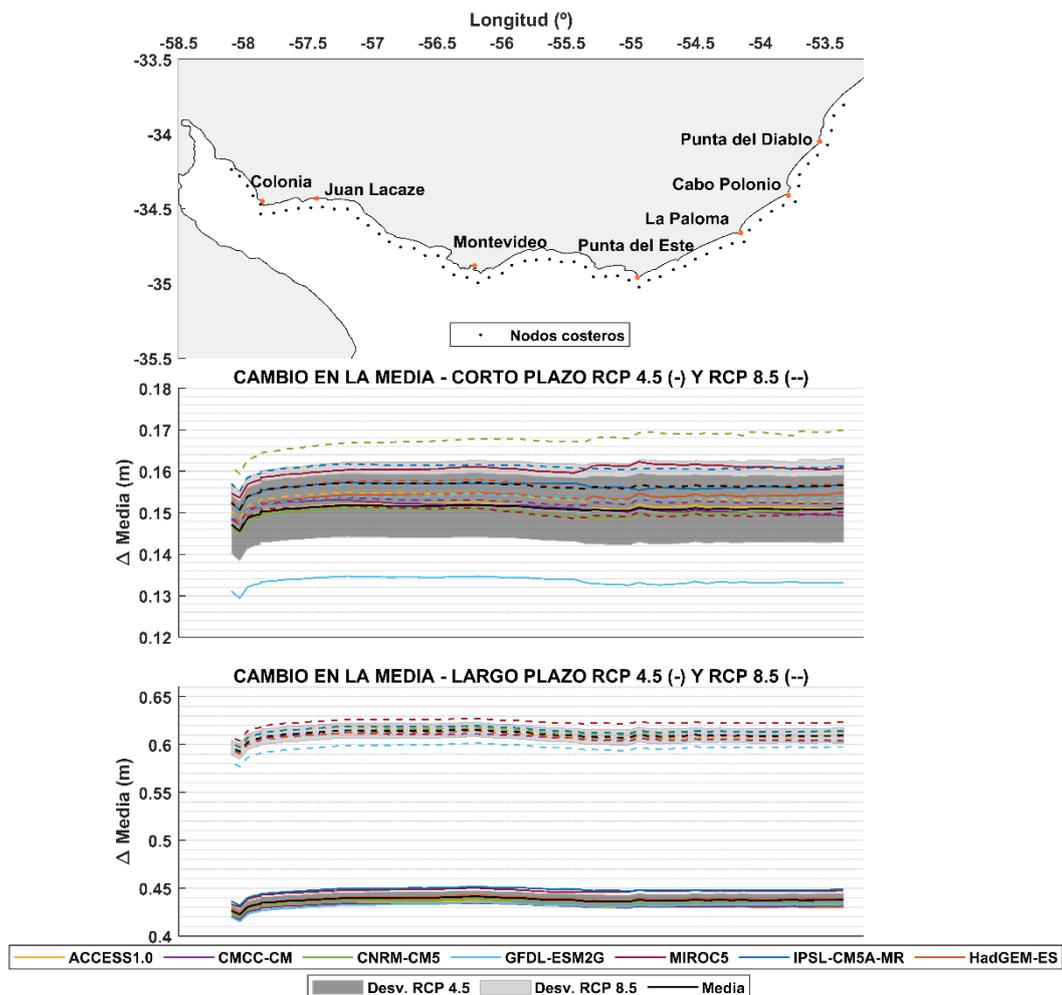


Figura 50- Cambio en la media del *NMT* obtenidos forzando el modelo local con cada modelo atmosférico global y ensamble de los resultados anteriores (negro), a lo largo de la costa a corto y largo plazo para los escenarios RCP 4.5 (líneas continuas) y RCP 8.5 (líneas punteadas). Panel superior: Nodos de cálculo. Panel intermedio: cambio a corto plazo. Panel inferior: cambio a largo plazo.

Pasando a analizar los valores extremos, en la Figura 51 se observa el cambio en el cuantil 1% del *NMT* para todos los casos. En este caso se observa la influencia de las componentes distintas al aumento del nivel medio del mar regional en el cambio del *NMT*, con una variabilidad espacial más marcada a lo largo de la costa. A corto plazo, los cambios observados para ambos escenarios abarcan rangos similares, que se desprende al ver el cambio mostrado por ambos ensambles en negro, que se ven casi superpuestos (RCP 4.5 línea continua y RCP 8.5 punteada). El ensamble de los resultados muestra cambios mínimos en la zona interior del estuario que llegan a los 0.10 m, un máximo relativo a la altura de Colonia de aproximadamente 0.15 m y un mínimo relativo entre Juan Lacaze y Montevideo donde el cambio mostrado por ambos ensambles ronda los 0.14 m. También se observa que el cambio en el cuantil 1% desciende hacia la costa Este.

A largo plazo se observa la misma distribución espacial aunque con máximos y mínimos relativos más notorios. Se destaca que en este caso todos los modelos muestran la misma distribución espacial con mayores o menores cambios, a diferencia del corto plazo donde algunos modelos no presentan de forma tan marcada la tendencia que muestra el ensamble. A largo plazo los máximos parecen ser más intensos para el escenario más severo. Para el escenario RCP 4.5 el ensamble muestra un mínimo en la zona interior del estuario con un cambio de aproximadamente 0.32 m, un máximo relativo a la altura de colonia que supera los 0.43 m y entre Montevideo y Punta del Este donde alcanza el mismo cambio. A partir de Punta del Este los cambios disminuyen mostrando el ensamble un cambio de 0.40 m en el nodo situado más al Este. Para el escenario RCP 8.5 el ensamble muestra un aumento de 0.48 m en la zona interior del estuario, 0.59 m a la altura de Colonia y 0.58 m aproximadamente entre Montevideo y Punta del Este, disminuyendo el cambio hasta 0.54 m en el nodo más al Este.

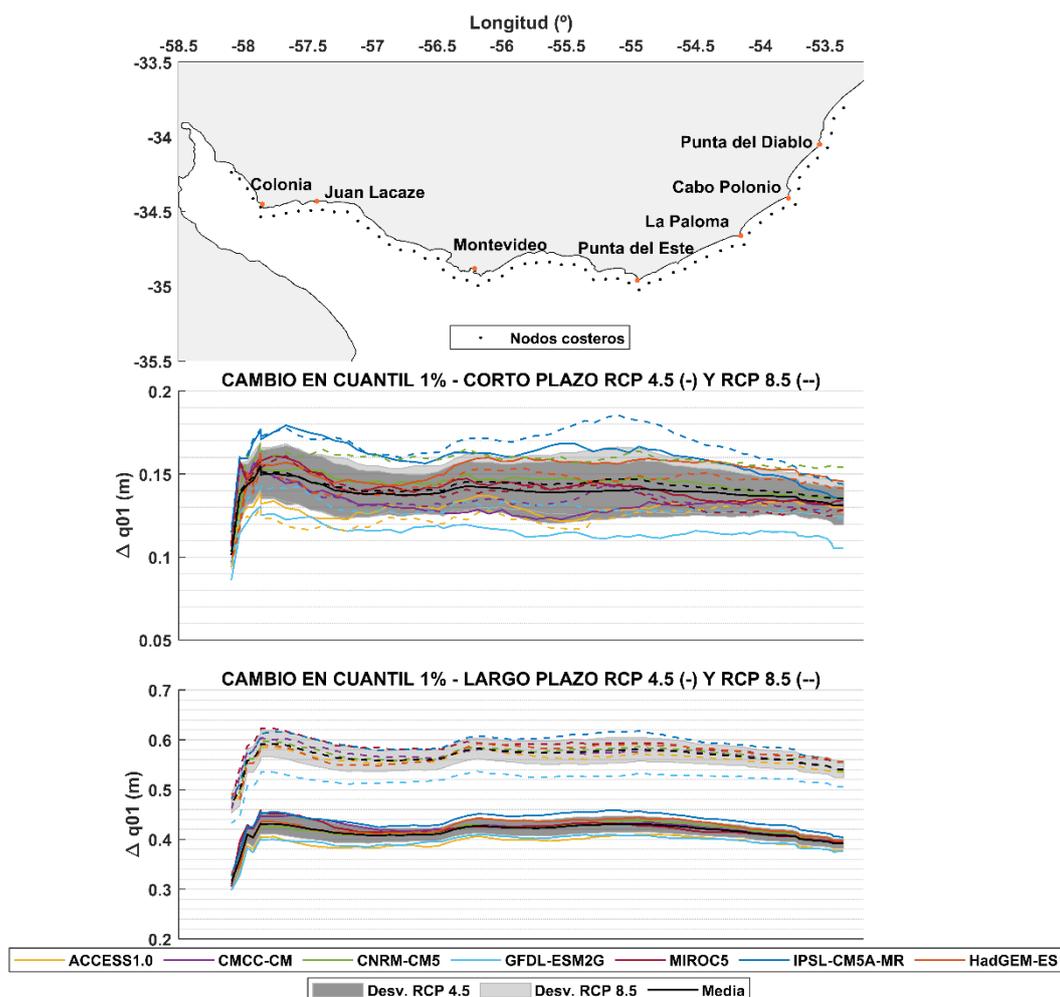


Figura 51- Cambio en el cuantil 1% del NMT obtenidos forzando el modelo local con cada modelo atmosférico global y ensamble de los resultados anteriores (negro), a lo largo de la costa a corto y largo plazo para los escenarios RCP 4.5 (líneas continuas) y RCP 8.5 (líneas punteadas). Panel superior: Nodos de cálculo. Panel intermedio: cambio a corto plazo. Panel inferior: cambio a largo plazo.

Por último, en la Figura 52 se muestra el cambio en el cuantil 99% del *NMT* a corto y largo plazo para ambos escenarios RCP. A corto plazo una vez más el rango de los cambios observados a lo largo de la costa es muy similar para ambos escenarios. El máximo cambio se da en la zona interior del estuario donde el ensamble muestra un aumento de casi 0.18 m para el escenario RCP 4.5 y de 0.20 m para el RCP 8.5. Por otra parte, a largo plazo se observa para ambos escenarios una clara distribución espacial no constante a lo largo de la costa, un cambio del cuantil 99% máximo en la zona interior del estuario y un máximo relativo alrededor de Montevideo. Se observa además que a largo plazo todos los modelos siguen la tendencia mostrada por el ensamble de forma clara. Para el escenario RCP 4.5 el cambio del ensamble del cuantil 99% en el interior del estuario es de 0.52 m y alrededor de Montevideo alcanza los 0.50 m. Para el escenario RCP 8.5 los cambios del ensamble alcanzan los 0.76 m en el interior del estuario y los 0.71 m aproximadamente en la zona de Montevideo.

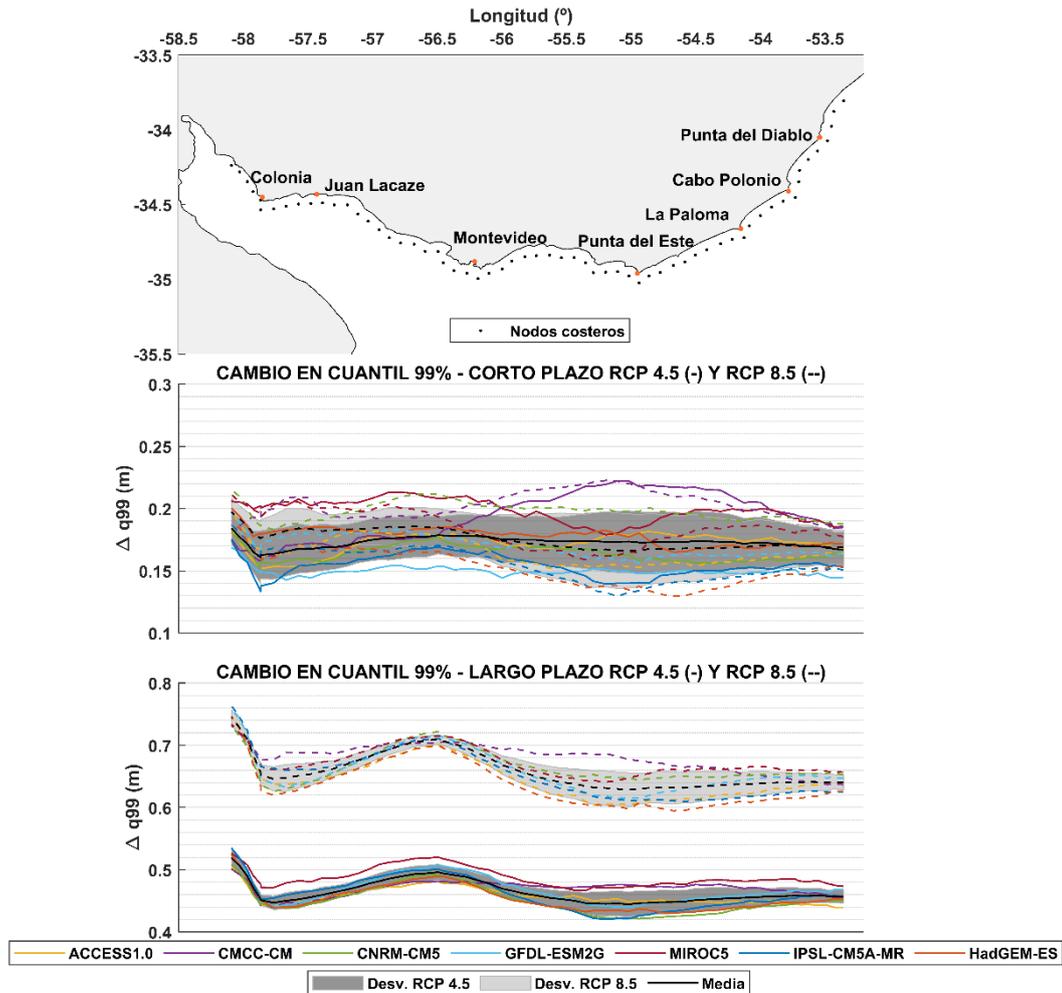


Figura 52- Cambio en el cuantil 99% del NMT obtenidos forzando el modelo local con cada modelo atmosférico global y ensamble de los resultados anteriores (negro), a lo largo de la costa a corto y largo plazo para los escenarios RCP 4.5 (líneas continuas) y RCP 8.5 (líneas punteadas). Panel superior: Nodos de cálculo. Panel intermedio: cambio a corto plazo. Panel inferior: cambio a largo plazo.

6.3.3 Cambios en el *NMSR*

Para estudiar los cambios del *NMSR* se analiza la distribución espacial de los cambios en un dominio que abarca ahora a toda la costa uruguaya y parte del Río de la Plata interior e intermedio y también se analizan los cambios en los nodos distribuidos a lo largo de la costa. Se analizan los cambios en la media del *NMSR*, definido anteriormente como NMM_{modelo} y los cambios en los cuantiles 1% y 99%.

De la Figura 53 a la 56 se muestra el cambio del NMM_{modelo} a corto plazo y a largo plazo para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Como primera observación se tiene que los cambios no superan en ninguna zona los 2 cm y que los cambios en el ensamble son no significativos en prácticamente todo el dominio. Además, a corto plazo se observa que el cambio en la media es menor a medio centímetro en la mayoría de los casos (Figura 53 y Figura 55). A lo largo de los escenarios y bloques futuros algunos modelos muestran gran variabilidad temporal. A modo de ejemplo, ACCESS 1.0 muestra para el escenario RCP 4.5 a corto plazo un mínimo aumento (Figura 53), para mostrar luego disminuciones de nivel medio en todo el dominio a largo plazo para este escenario (Figura 54). Luego para el escenario RCP 8.5 muestra para ambos horizontes

analizados zonas de aumento y disminución de nivel medio (Figura 55 y 56). Existen por otra parte modelos que mantienen mayormente el signo de cambio para ambos horizontes y escenarios, como el HadGEM2-ES que muestra mayormente aumentos, o el GFDL-ESM2G que muestra descensos de nivel. Por otra parte, los cambios mostrados por el ensamble de modelos no superan en ningún caso el centímetro. De la Figura 65, que muestra el cambio en el NMM_{modelo} a lo largo de la costa para todos los escenarios y horizontes futuros analizados, se desprende que los cambios son pequeños, muy cercanos a 0 (como se observaba también en los campos) y que prácticamente no hay variabilidad espacial a lo largo de la costa.

Desde la Figura 57 a la 60 se muestran los campos de nivel asociados al cuantil 1% en el siguiente orden: a corto plazo y largo plazo para el escenario RCP 4.5 y a corto plazo y largo plazo para el escenario RCP 8.5. Se observan algunos patrones característicos de cambio, que no superan los 8 cm en ninguna zona del dominio. A corto plazo el comportamiento entre modelos es variable, mostrando consistencia en el signo de cambio solo en la costa desde Punta del Diablo hacia el Este. Los modelos CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR muestran aumentos de nivel en la mayor parte del dominio, exceptuando la costa Este y mostrando IPSL-CM5A-MR mayores incrementos en la zona costera que rodea Punta del Este mar adentro, aunque estos no superan los 4 cm. La Figura 66 muestra el cambio en el cuantil 1% a lo largo de nodos costeros para todos los escenarios y horizontes futuros. Se observa claramente los diferentes sentidos de cambio (línea continua indica el RCP 4.5) y la dispersión de los cambios arrojados por cada modelo. A largo plazo para ambos escenarios se encuentra un patrón característico en la mayoría de los casos que indica mayores cambios hacia la zona interior del estuario y la costa atlántica, principalmente desde La Paloma hacia el este. Luego se observa una zona que presenta un comportamiento particular en la zona interior rodeando Colonia y Juan Lacaze (zona que también puede observarse a corto plazo para el escenario RCP 4.5 principalmente (Figura 57)). Esta última zona presenta un comportamiento particular y diferente para cada modelo en todos los escenarios, lo cual se hace evidente al analizar la significancia del ensamble (los resultados son no significativos debido a los diferentes signos de cambio entre modelos). Mientras que algunos modelos muestran un foco de aumento de nivel (CMCC-CM, MIROC5, IPSL-CM5A), el resto de modelos muestran un foco que se caracteriza por presentar una disminución de nivel menor que el resto del dominio. Para ambos escenarios, los resultados indican gran consistencia mostrando una disminución del cuantil 1% desde Montevideo hacia el interior del estuario (exceptuando la zona entre Colonia y Juan Lacaze) y en toda la zona costera desde antes de La Paloma hacia el Este y mar adentro. Además, a largo plazo, IPSL-CM5A-MR y HadGEM2-ES se despegan del comportamiento del resto de los modelos mostrando cambios positivos en la costa que abarca desde Montevideo hasta unos km antes de La Paloma y hacia la zona central del dominio.

La Figura 66 ayuda en la comprensión de la tendencia observada a lo largo de la costa para el cuantil 1%, de donde se desprende que los mayores cambios se dan en la zona interior del Río de la Plata, disminuyendo hacia Colonia, para luego aumentar levemente hasta Montevideo y volver a disminuir hasta Punta del Este donde vuelven a aumentar. Esta tendencia se observa claramente para ambos escenarios, con mayores o menores cambios y a corto plazo puede observarse levemente, aunque con cambios menores muy cercanos a 0 a lo largo de la costa. Es importante recordar siempre que los cambios analizados en esta sección, como lo indica el título, son relativas al nivel medio de mar regional impuesto.

Desde la Figura 61 a la 64 se muestran los campos de nivel asociados al cuantil 99% en el siguiente orden: a corto plazo y largo plazo para el escenario RCP 4.5 y a corto plazo y largo plazo para el escenario RCP 8.5. Además, la Figura 67 muestra el cambio del mismo cuantil para todos los escenarios y horizontes futuros analizados a lo largo de la costa. Se observan en esta instancia en la mayoría de los casos cambios positivos, que llegan a alcanzar los 12 cm (Figura 64). A corto plazo la dirección de cambio es consistente en la mayor parte del dominio para el escenario RCP 4.5 mientras que en el escenario RCP 8.5 solo lo es en la zona intermedia del estuario, hasta Montevideo, debido a que IPSL-CM5A-MR y HadGEM2-ES muestran zonas con descenso del cuantil 99% desde Montevideo hacia el exterior (Figura 63). A largo plazo en ambos escenarios los modelos son consistentes en el signo del cambio en la zona interior y parte de la zona intermedia del Río de la Plata y en la costa desde Cabo Polonio hacia el este. Los cambios no superan los 8 centímetros de aumento ni 2 cm de descenso relativo a corto plazo para ninguno de los escenarios y a largo plazo alcanzan los mayores cambios, siendo hasta de 12 cm hacia la zona interior del estuario pasando Colonia e intermedia alrededor de Montevideo (Figura 64). Al analizar la variabilidad del cambio del cuantil 99% a largo plazo a lo largo de la costa (Figura 67) se observa nuevamente un patrón claro de mayor aumento hacia la zona interior/intermedia del estuario que disminuye hacia Colonia y comienza a aumentar nuevamente alcanzando un máximo relativo alrededor de Montevideo para luego descender hasta valores cercanos a cero desde Punta del Este en adelante. Además se observa una tendencia del cambio que se intensifica para el escenario más severo (RCP 8.5). Este patrón no existe al analizar los resultados a corto plazo, aunque es importante notar que a pesar de que los cambios sean pequeños, la consistencia y la cercanía en los cambios mostrados por los diferentes modelos hacen que sean significativos.

CAMBIOS EN LA MEDIA A CORTO PLAZO RCP 4.5

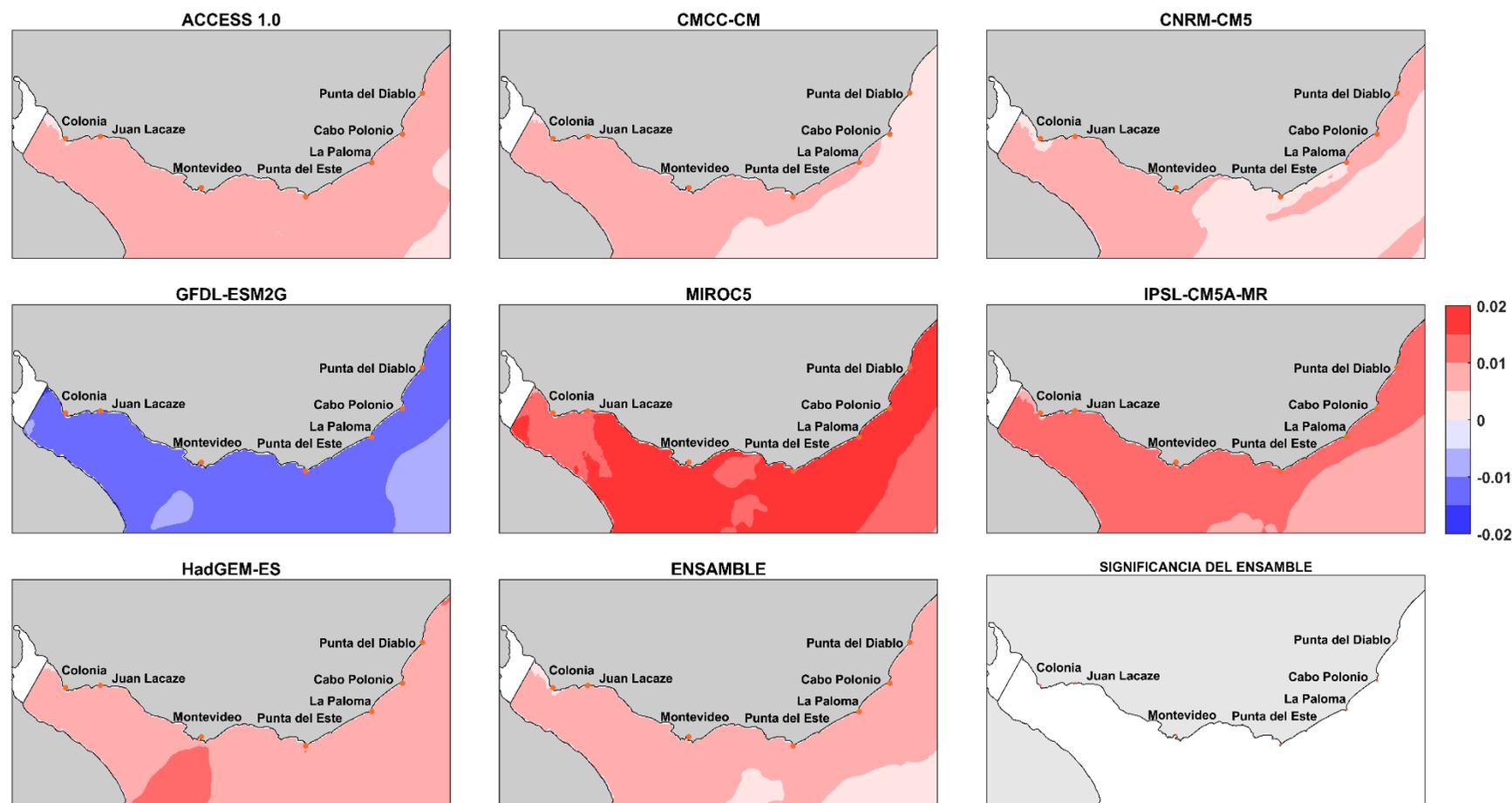


Figura 53- Campos de cambio del NMM_{modelo} del bloque futuro a corto plazo (2027-2045) respecto del bloque histórico para el escenario RCP 4.5 obtenidos del modelo local forzado con cada modelo atmosférico global. Diferencias en m.

CAMBIOS EN LA MEDIA A LARGO PLAZO RCP 4.5

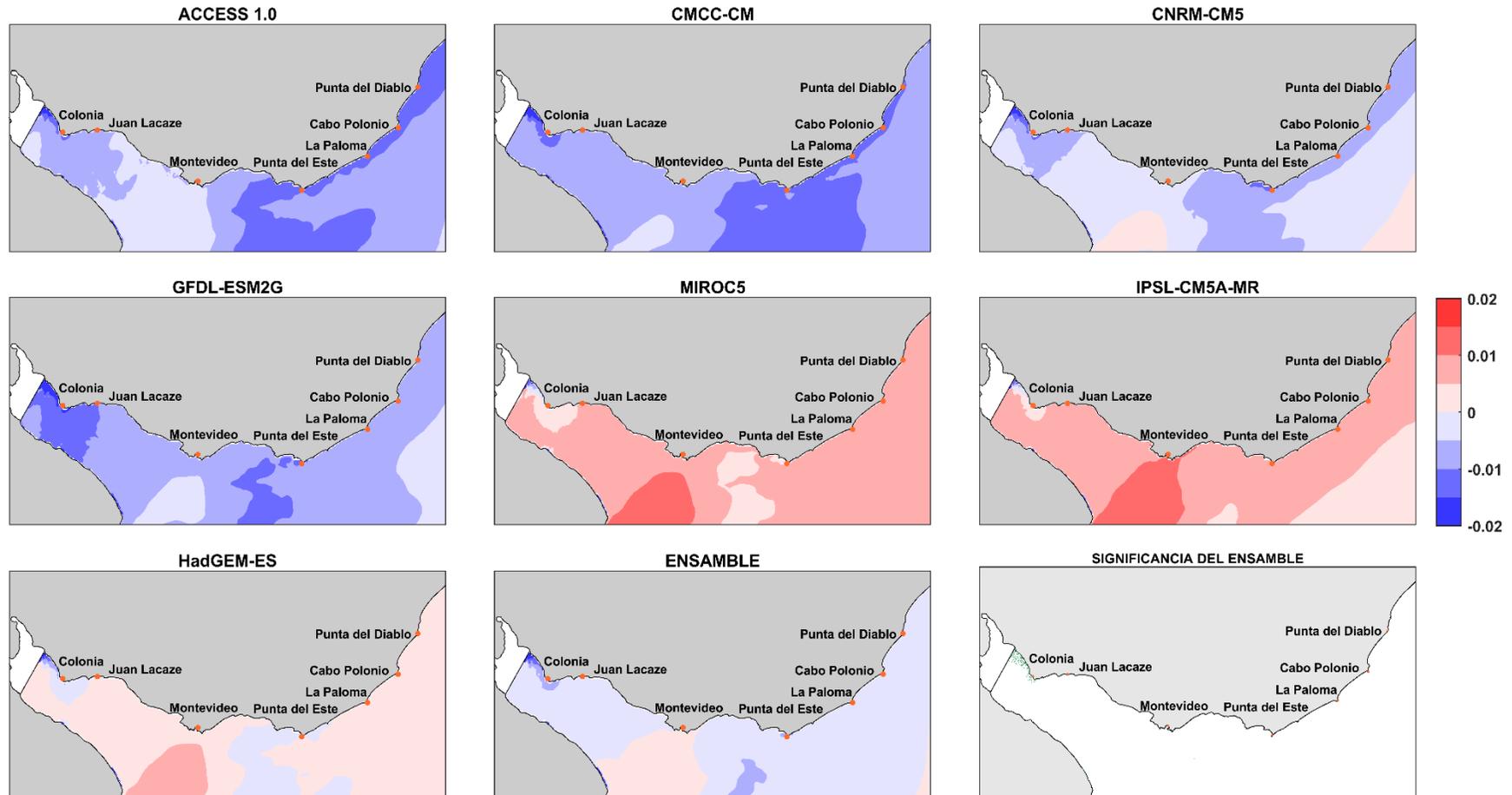


Figura 54- Campos de cambio del NMM_{modelo} del bloque futuro a largo plazo (2027-2045) respecto del bloque histórico para el escenario RCP 4.5 obtenidos del modelo local forzado con cada modelo atmosférico global, ensemble de los resultados anteriores y significancia del ensemble. Diferencias en m.

CAMBIOS EN LA MEDIA A CORTO PLAZO RCP 8.5

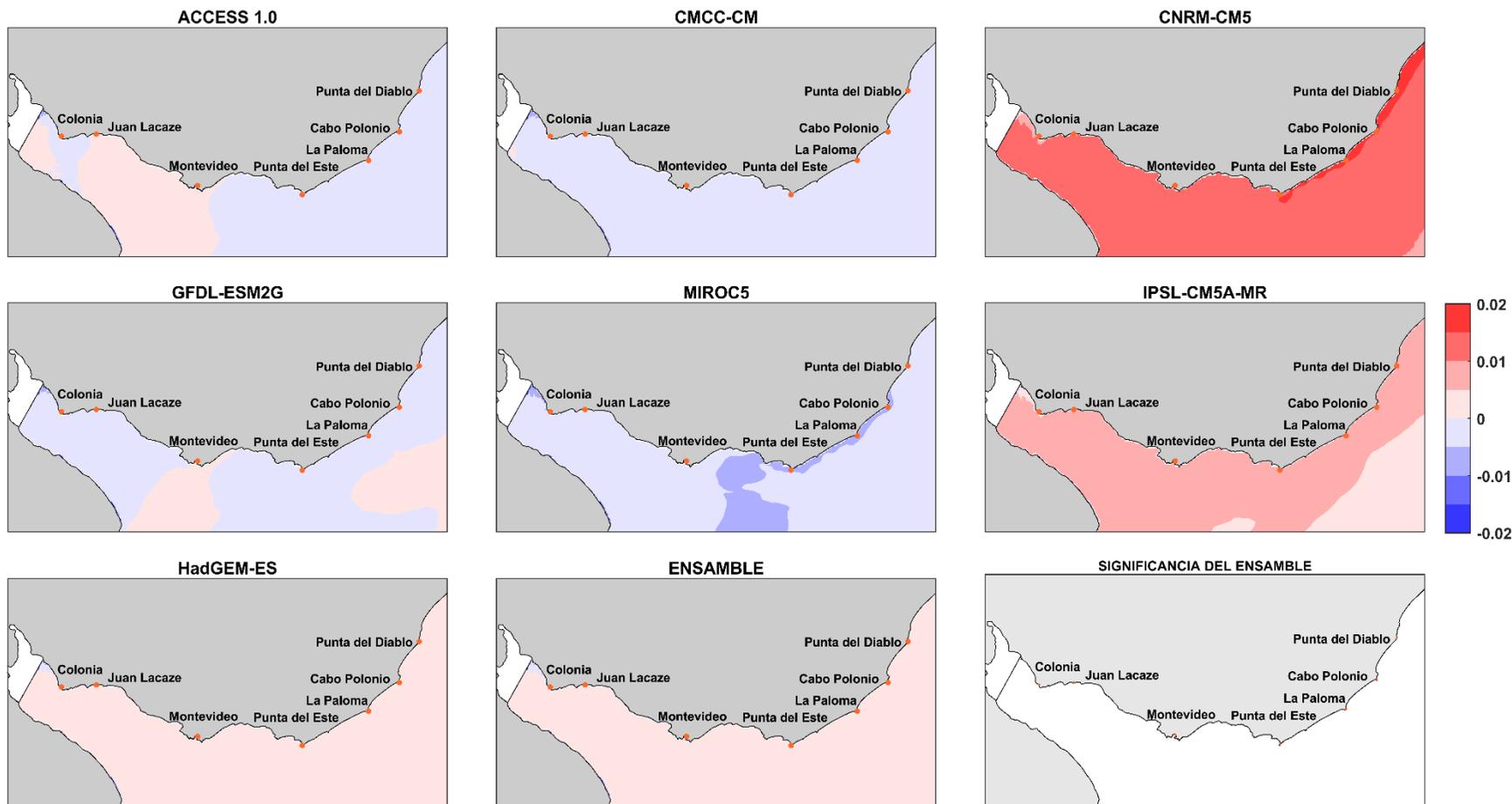


Figura 55- Campos de cambio del NMM_{modelo} del bloque futuro a corto plazo (2027-2045) respecto del bloque histórico para el escenario RCP 8.5 obtenidos del modelo local forzado con cada modelo atmosférico global, ensamble de los resultados anteriores y significancia del ensamble. Diferencias en m.

CAMBIOS EN LA MEDIA A LARGO PLAZO RCP 8.5

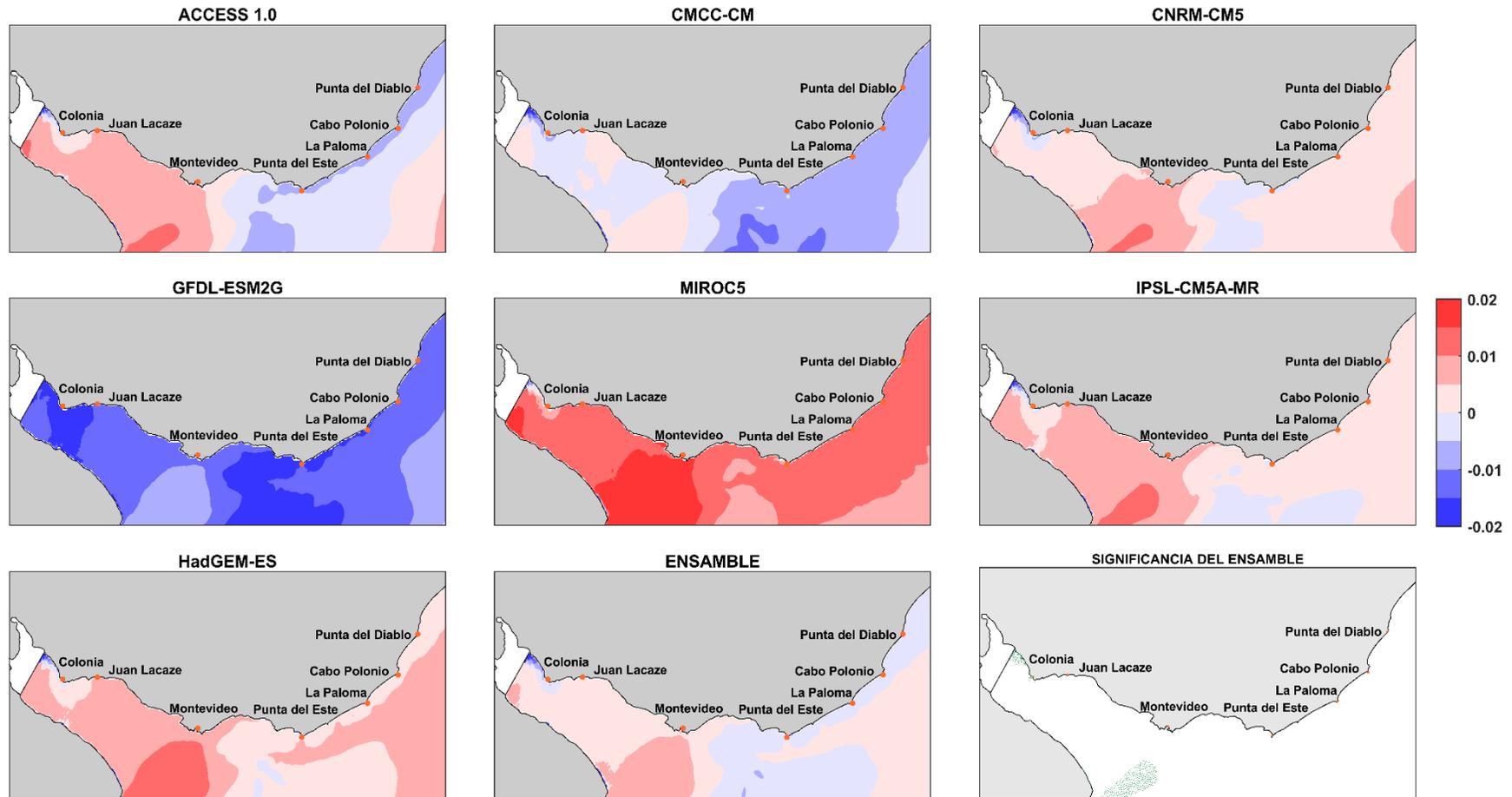


Figura 56- Campos de cambio del NMM_{modelo} del bloque futuro a largo plazo (2082-2100) respecto del bloque histórico para el escenario RCP 8.5 obtenidos del modelo local forzado con cada modelo atmosférico global, ensamble de los resultados anteriores y significancia del ensamble. Diferencias en m.

CAMBIOS EN EL CUANTIL 1% A CORTO PLAZO RCP 4.5

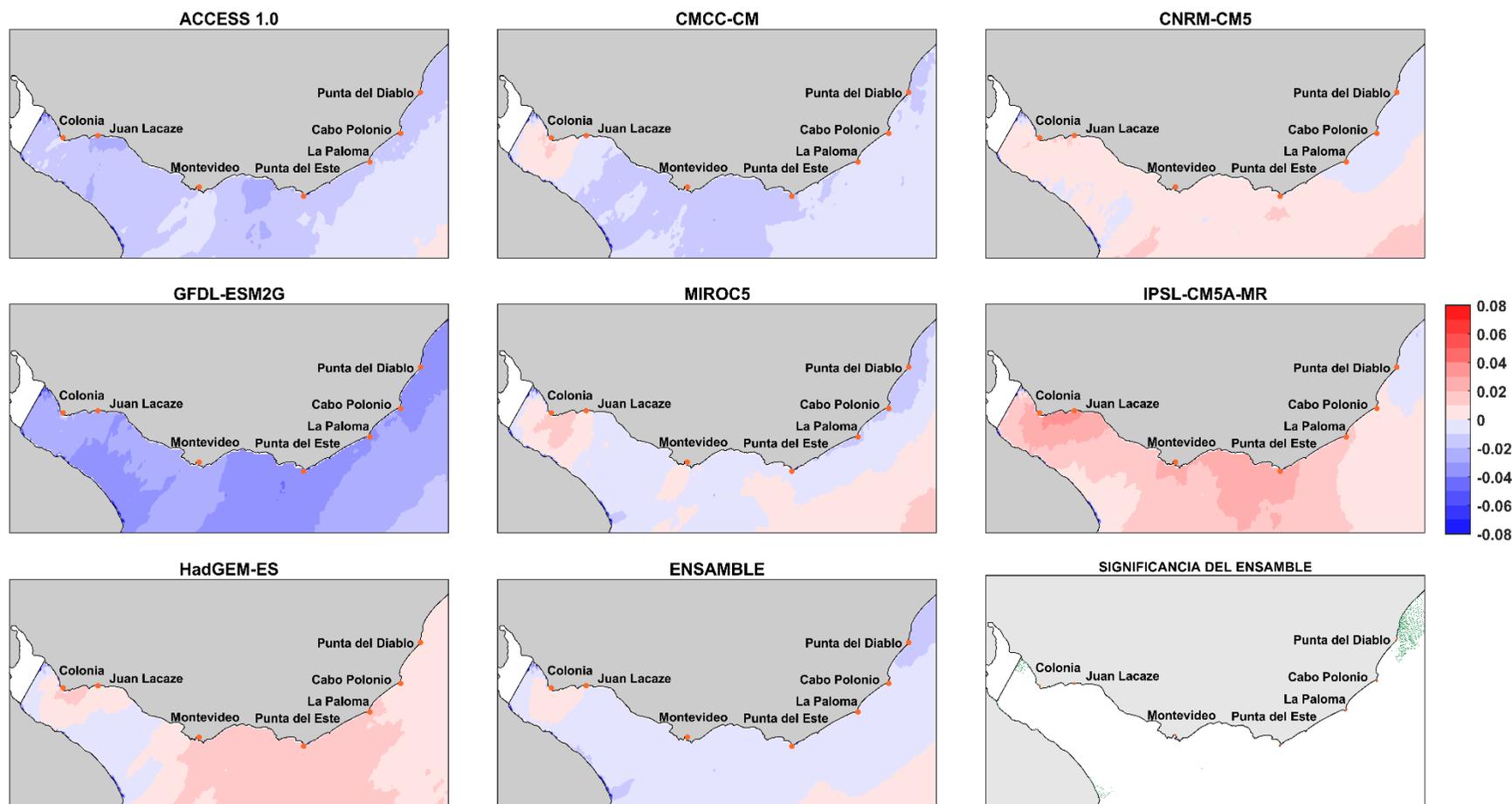


Figura 57- Campos de cambio de nivel de mar asociados a la diferencia entre el cuantil 1% del bloque futuro a corto plazo (2027-2045) y el del bloque histórico para el escenario RCP 4.5 obtenidos del modelo local forzado con cada modelo atmosférico global, ensemble de los resultados anteriores y significancia del ensemble. Diferencias en cm.

CAMBIOS EN EL CUANTIL 1% A LARGO PLAZO RCP 4.5

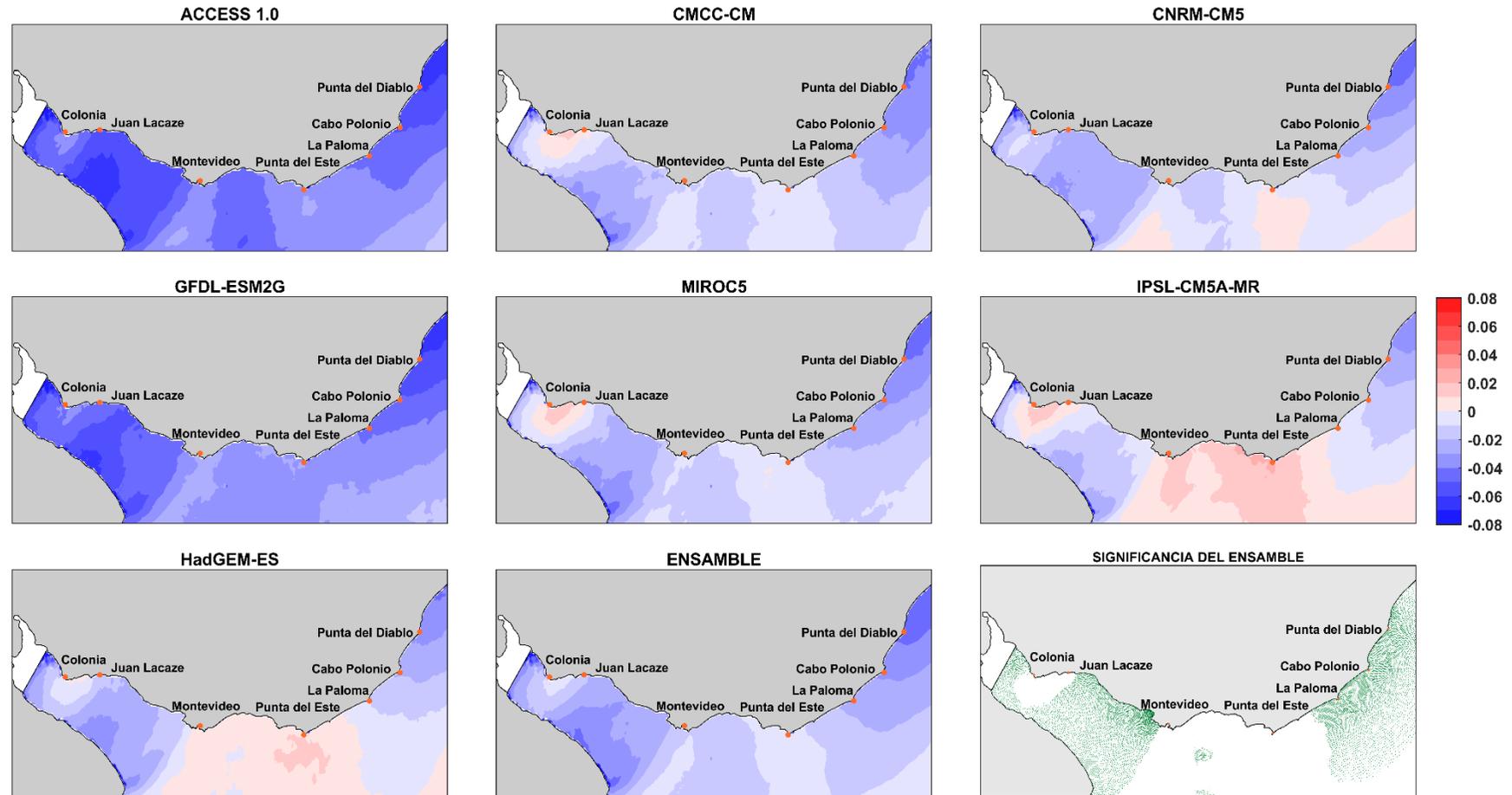


Figura 58- Campos de cambio de nivel de mar asociados a la diferencia entre el cuantil 1% del bloque futuro a largo plazo (20820-2100) y el del bloque histórico para el escenario RCP 4.5 obtenidos del modelo local forzado con cada modelo atmosférico global, ensamble de los resultados anteriores y significancia del ensamble. Diferencias en m.

CAMBIOS EN EL CUANTIL 1% A CORTO PLAZO RCP 8.5

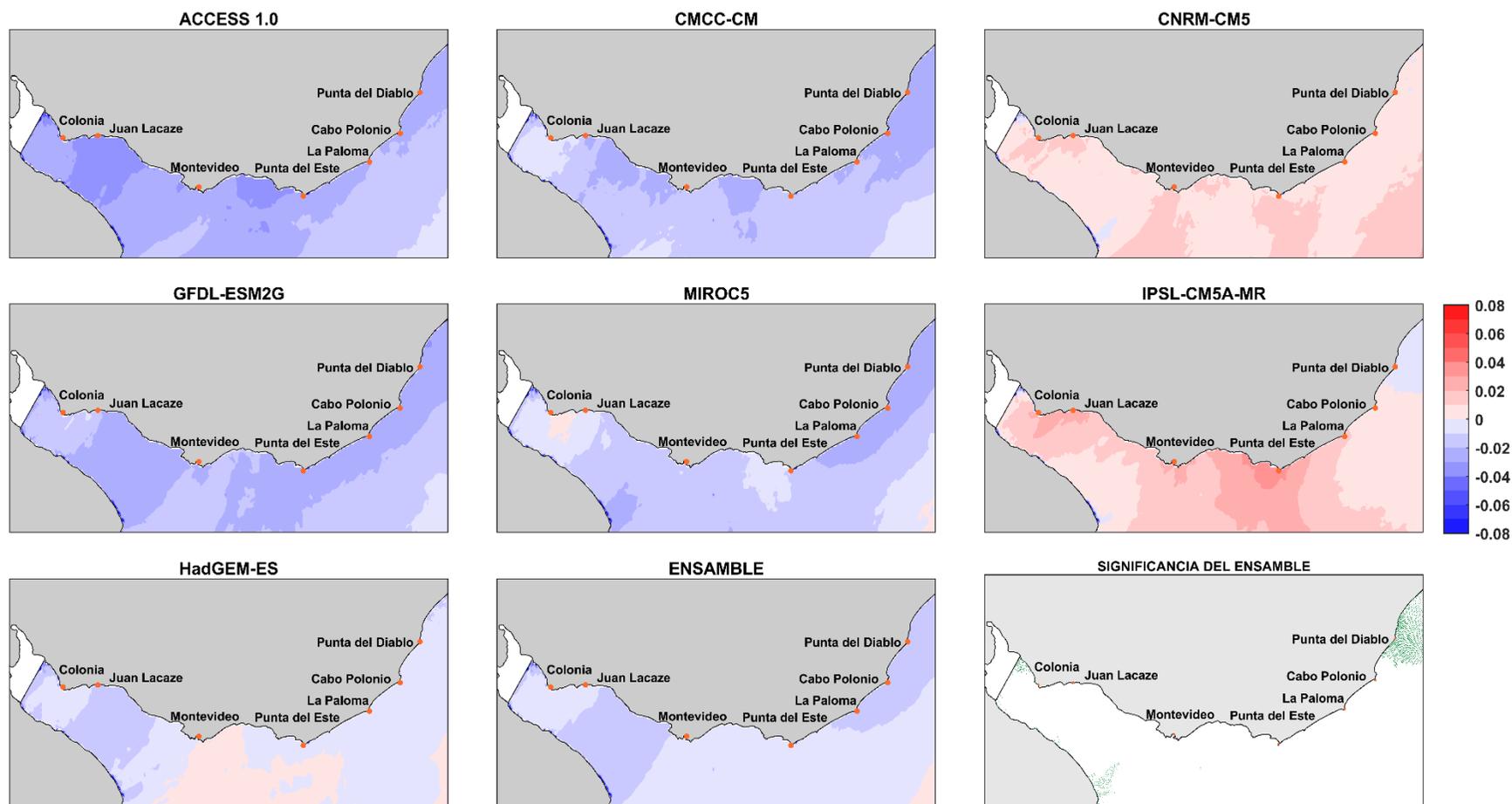


Figura 59- Campos de cambio de nivel de mar asociados a la diferencia entre el cuantil 1% del bloque futuro a corto plazo (2027-2045) y el del bloque histórico para el escenario RCP 8.5 obtenidos del modelo local forzado con cada modelo atmosférico global, ensamble de los resultados anteriores y significancia del ensamble. Diferencias en m.

CAMBIOS EN EL CUANTIL 1% A LARGO PLAZO RCP 8.5

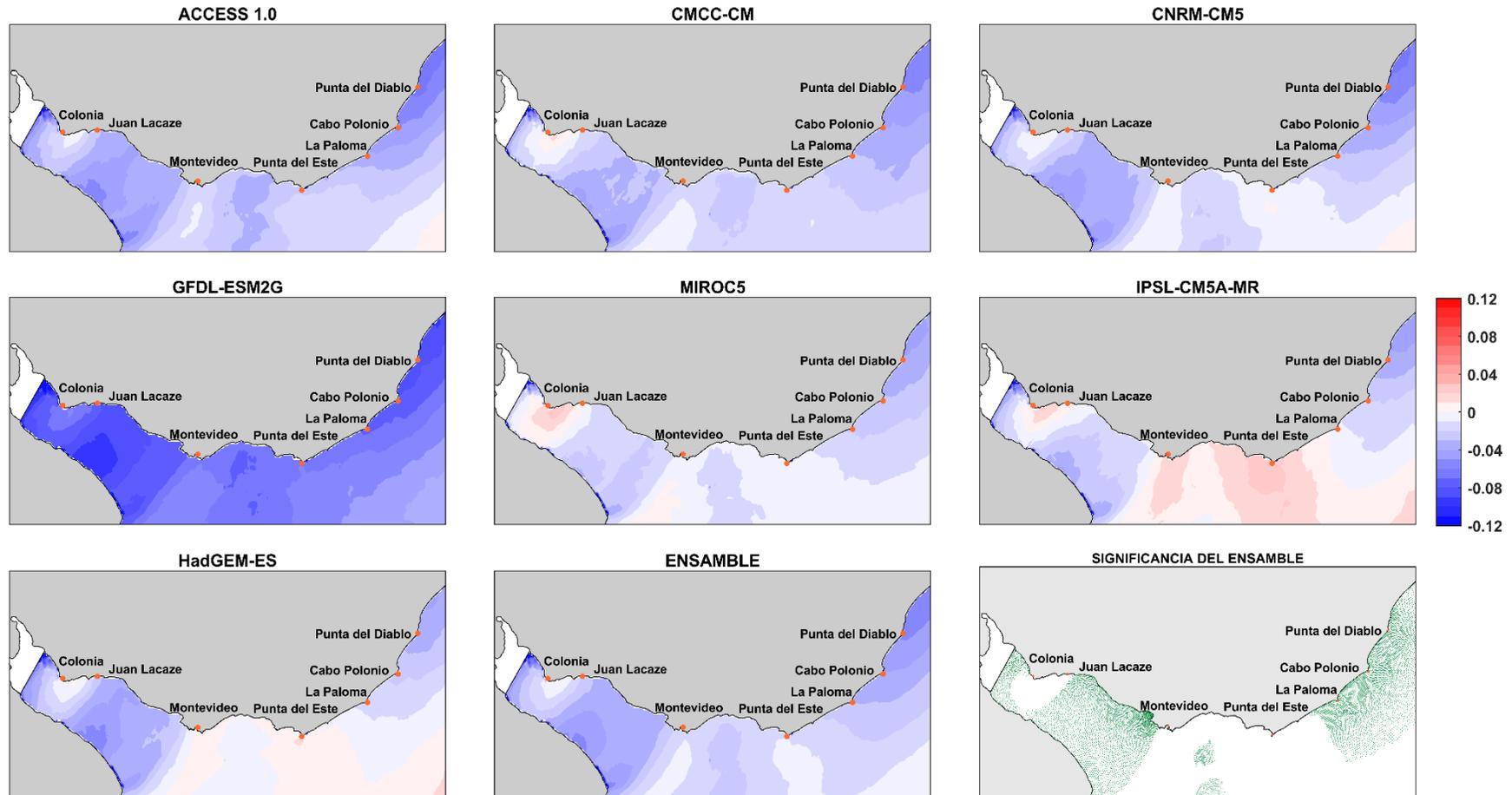


Figura 60- Campos de cambio de nivel de mar asociados a la diferencia entre el cuantil 1% del bloque futuro a largo plazo (2082-2100) y el del bloque histórico para el escenario RCP 8.5 obtenidos del modelo local forzado con cada modelo atmosférico global, ensemble de los resultados anteriores y significancia del ensemble. Diferencias en m.

CAMBIOS EN EL CUANTIL 99% A CORTO PLAZO RCP 4.5

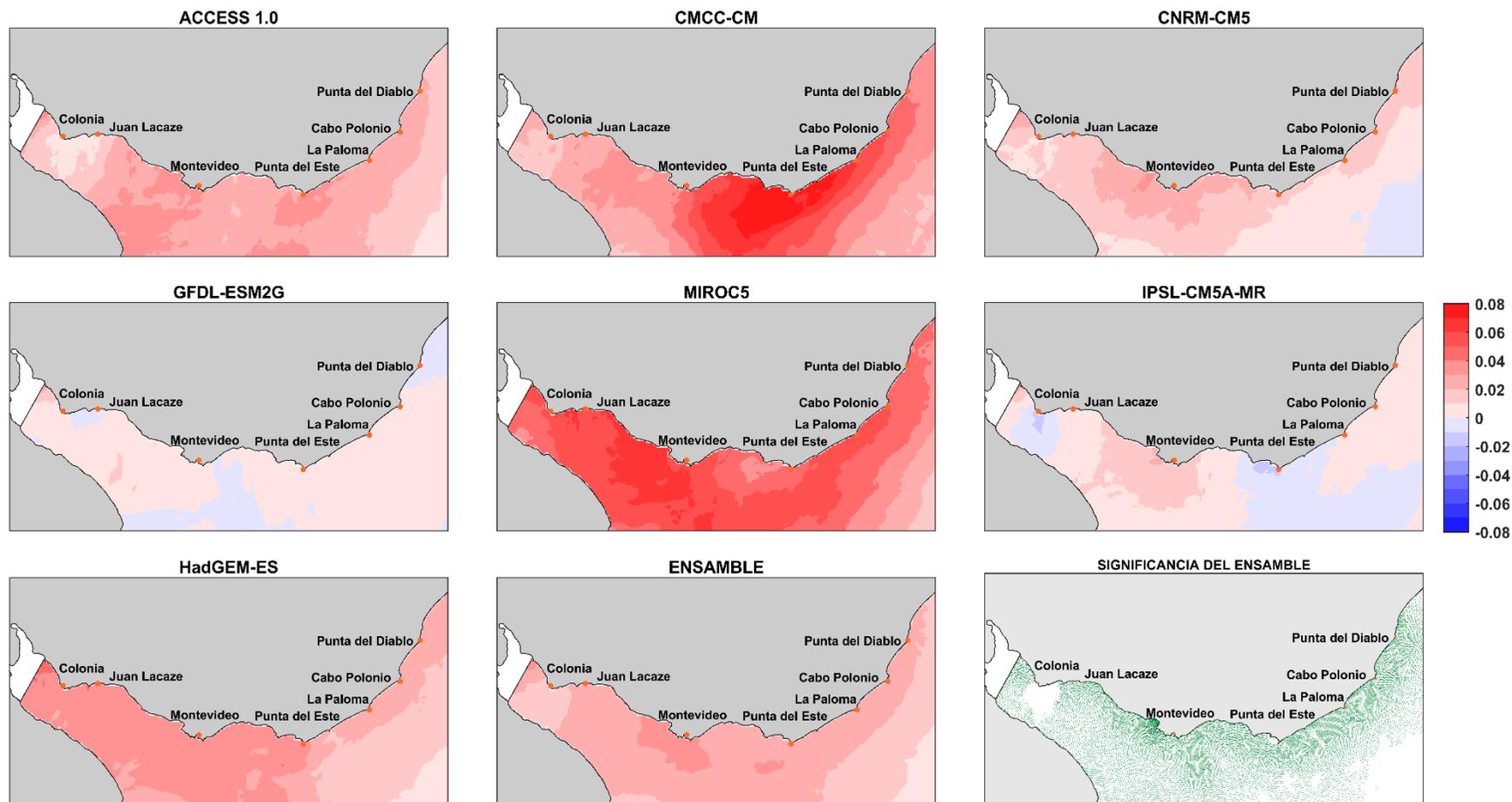


Figura 61- Campos de cambio de nivel de mar asociados a la diferencia entre el cuantil 99% del bloque futuro a corto plazo (2027-2045) y el del bloque histórico para el escenario RCP 8.5 obtenidos del modelo local forzado con cada modelo atmosférico global, ensemble de los resultados anteriores y significancia del ensemble. Diferencias en m.

CAMBIOS EN EL CUANTIL 99% A LARGO PLAZO RCP 4.5

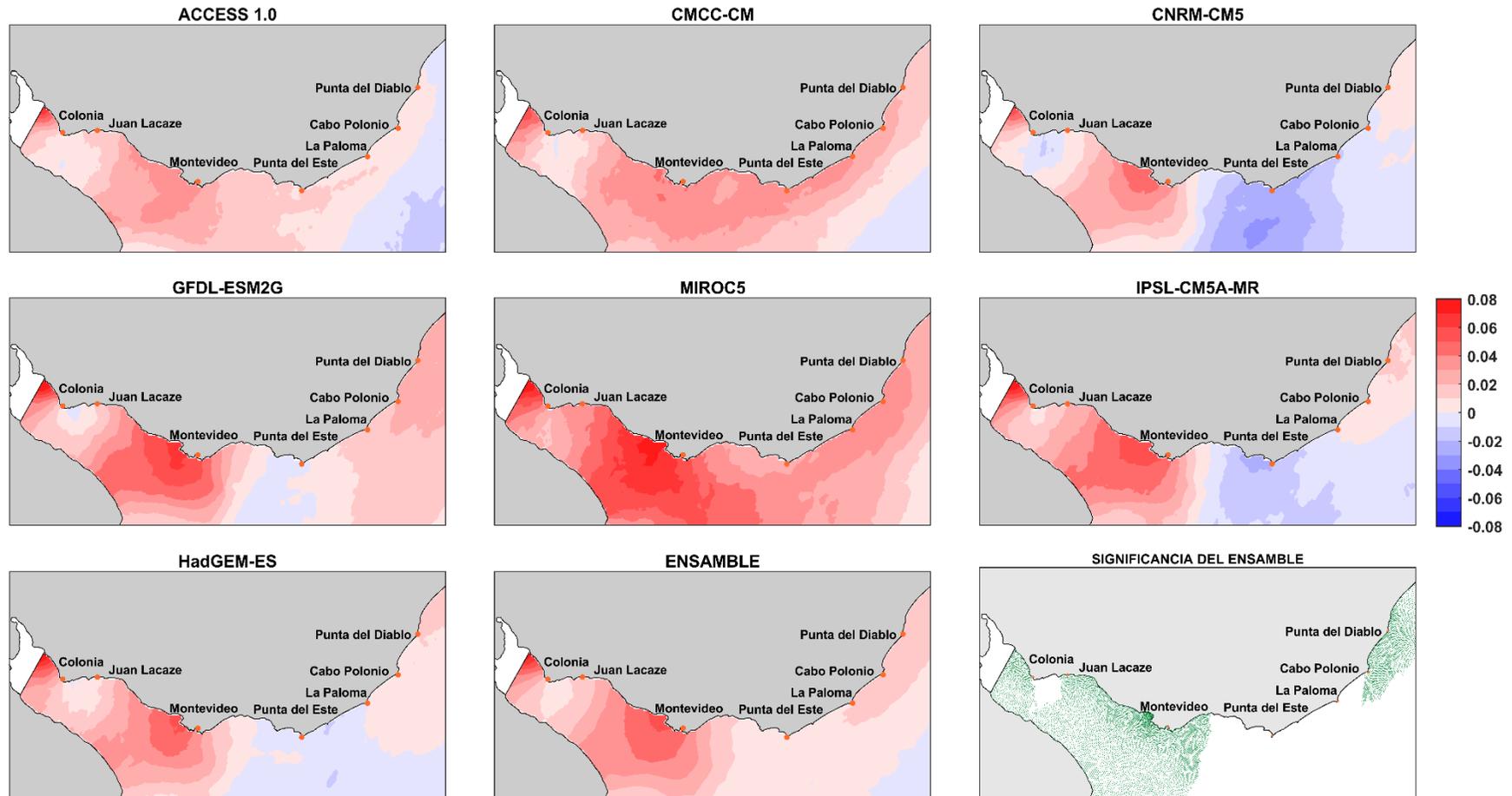


Figura 62- Campos de cambio de nivel de mar asociados a la diferencia entre el cuantil 99% del bloque futuro a largo plazo (2082-2100) y el del bloque histórico para el escenario RCP 4.5 obtenidos del modelo local forzado con cada modelo atmosférico global, ensamble de los resultados anteriores y significancia del ensamble. Diferencias en m.

CAMBIOS EN EL CUANTIL 99% A CORTO PLAZO RCP 8.5

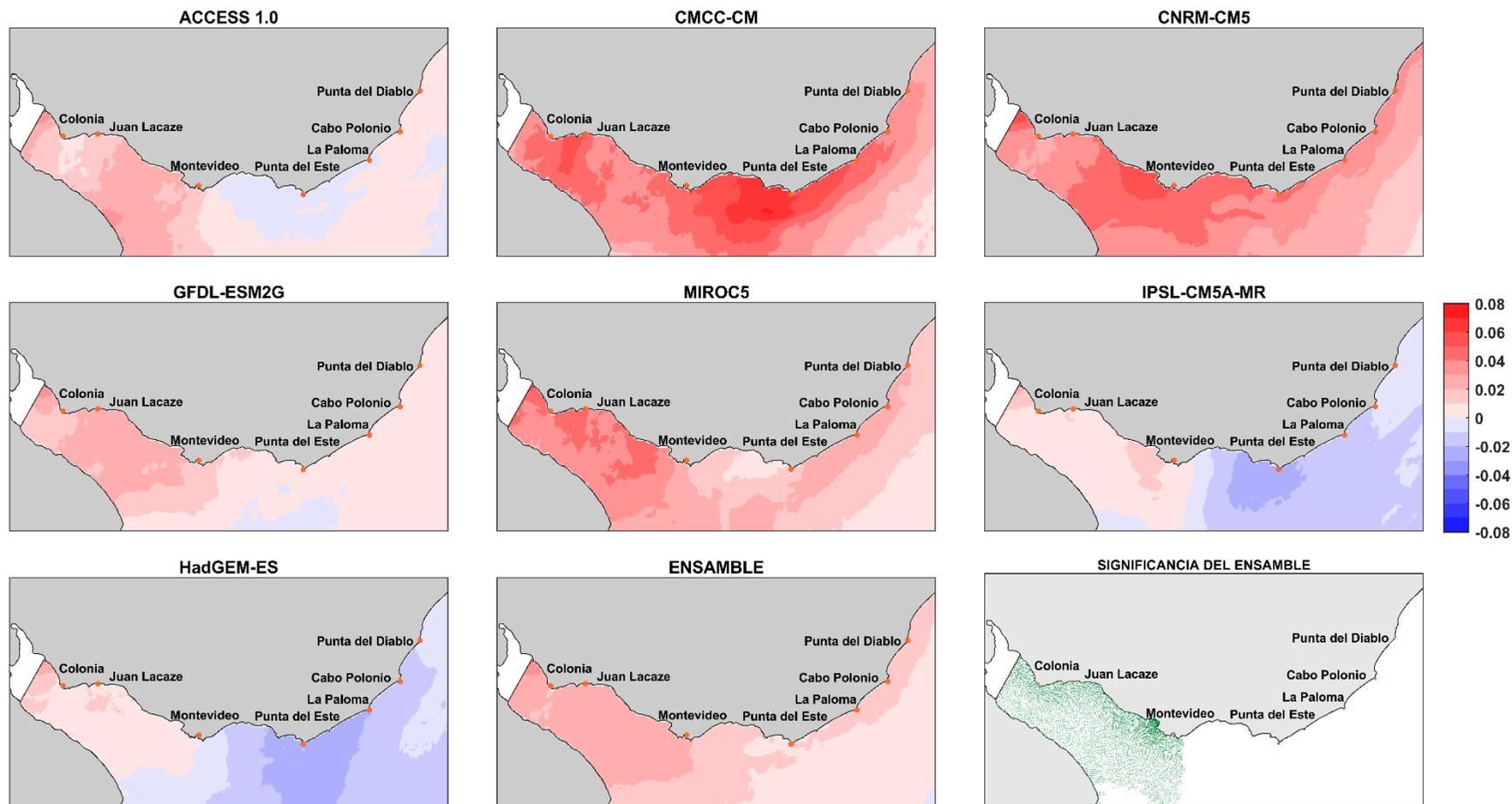


Figura 63- Campos de cambio de nivel de mar asociados a la diferencia entre el cuantil 99% del bloque futuro a corto plazo (2027-2045) y el del bloque histórico para el escenario RCP 8.5 obtenidos del modelo local forzado con cada modelo atmosférico global, ensamble de los resultados anteriores y significancia del ensamble. Diferencias en m.

CAMBIOS EN EL CUANTIL 99% A LARGO PLAZO RCP 8.5

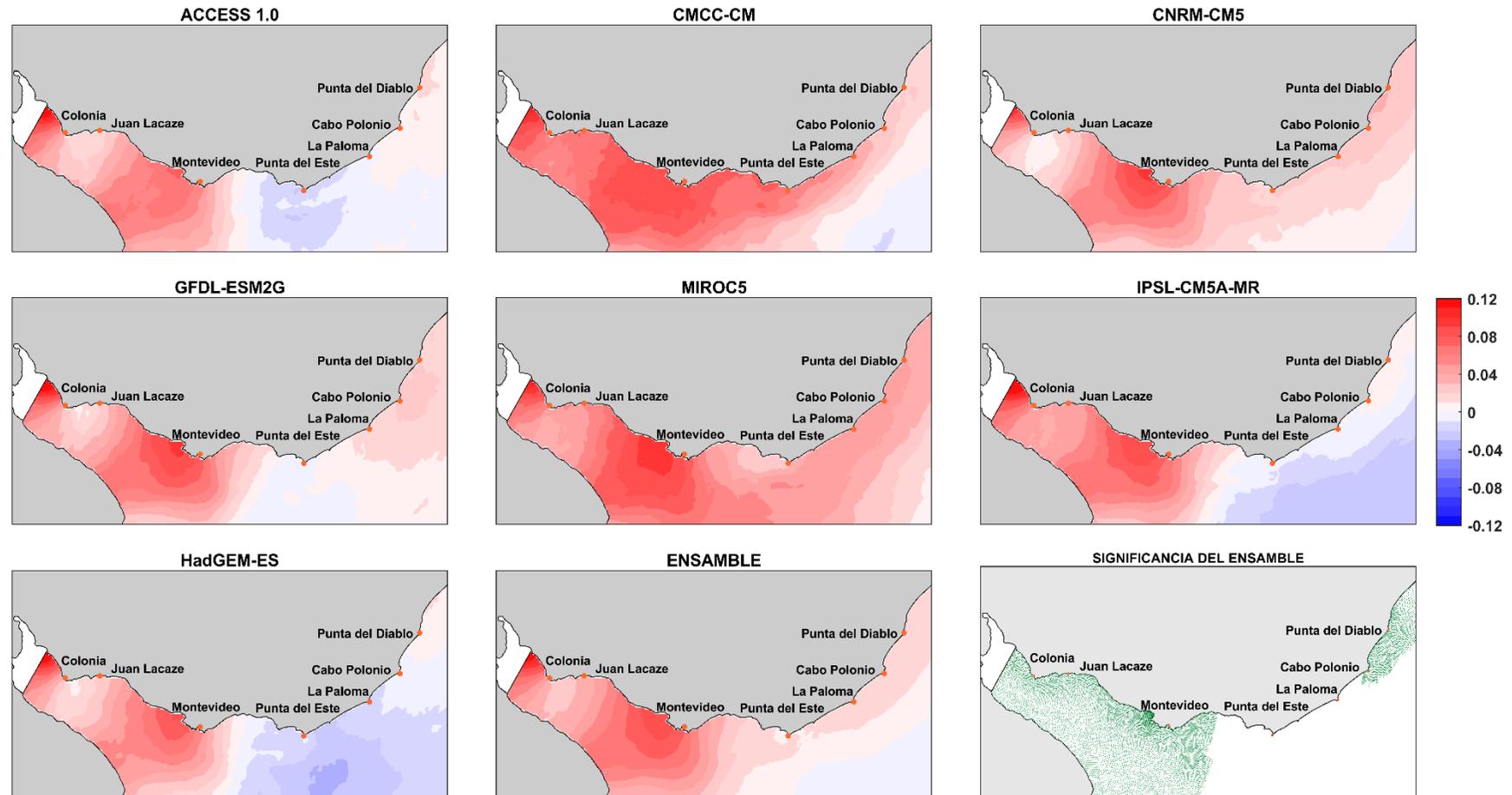


Figura 64- Campos de cambio de nivel de mar asociados a la diferencia entre el cuantil 99% del bloque futuro a largo plazo (2082-2100) y el del bloque histórico para el escenario RCP 8.5 obtenidos del modelo local forzado con cada modelo atmosférico global, ensamble de los resultados anteriores y significancia del ensamble. Diferencias en m.

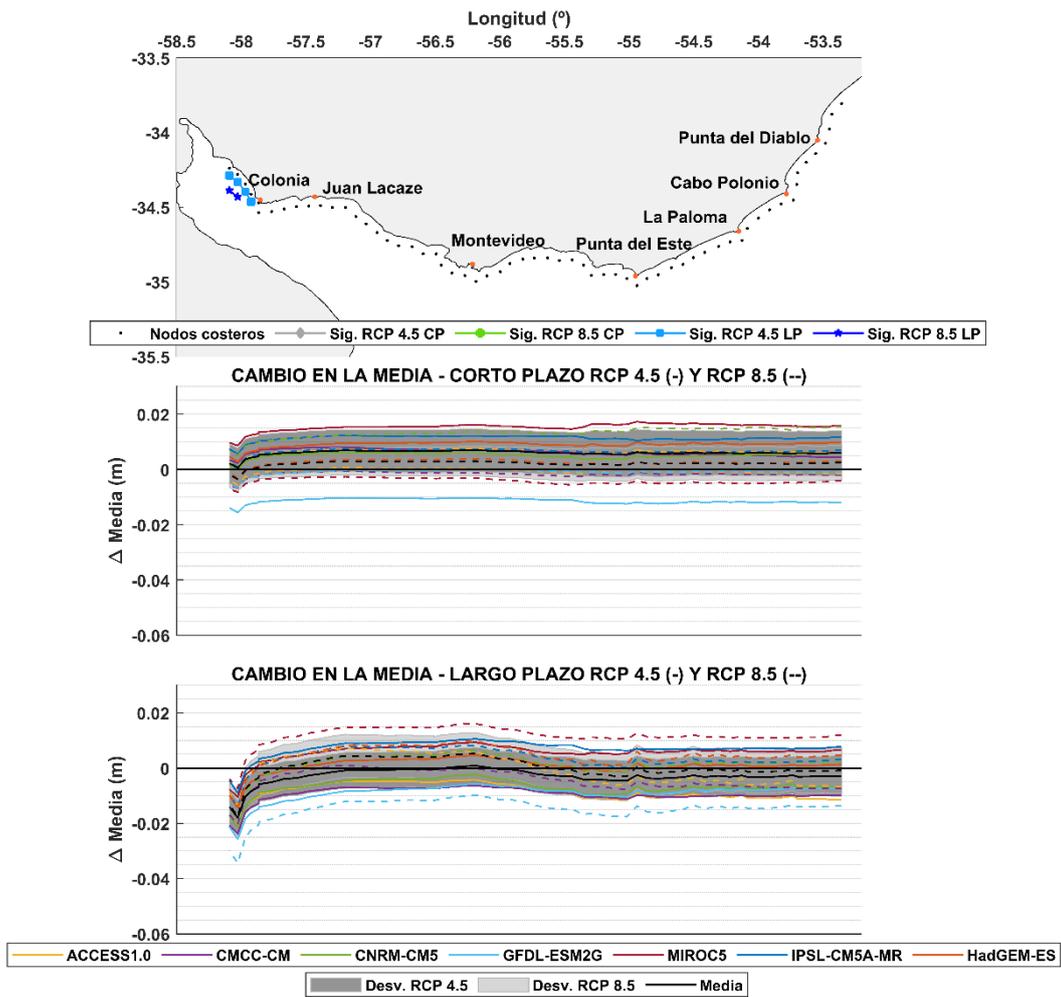


Figura 65- Cambio en el NMM_{modelo} obtenidos forzando el modelo local con cada modelo atmosférico global y ensamble de los resultados anteriores (negro), a lo largo de la costa a corto y largo plazo para los escenarios RCP 4.5 (líneas continuas) y RCP 8.5 (líneas punteadas). Panel superior: Nodos de cálculo y significancia del cambio del ensamble para cada escenario. Panel intermedio: cambio a corto plazo. Panel inferior: cambio a largo plazo.

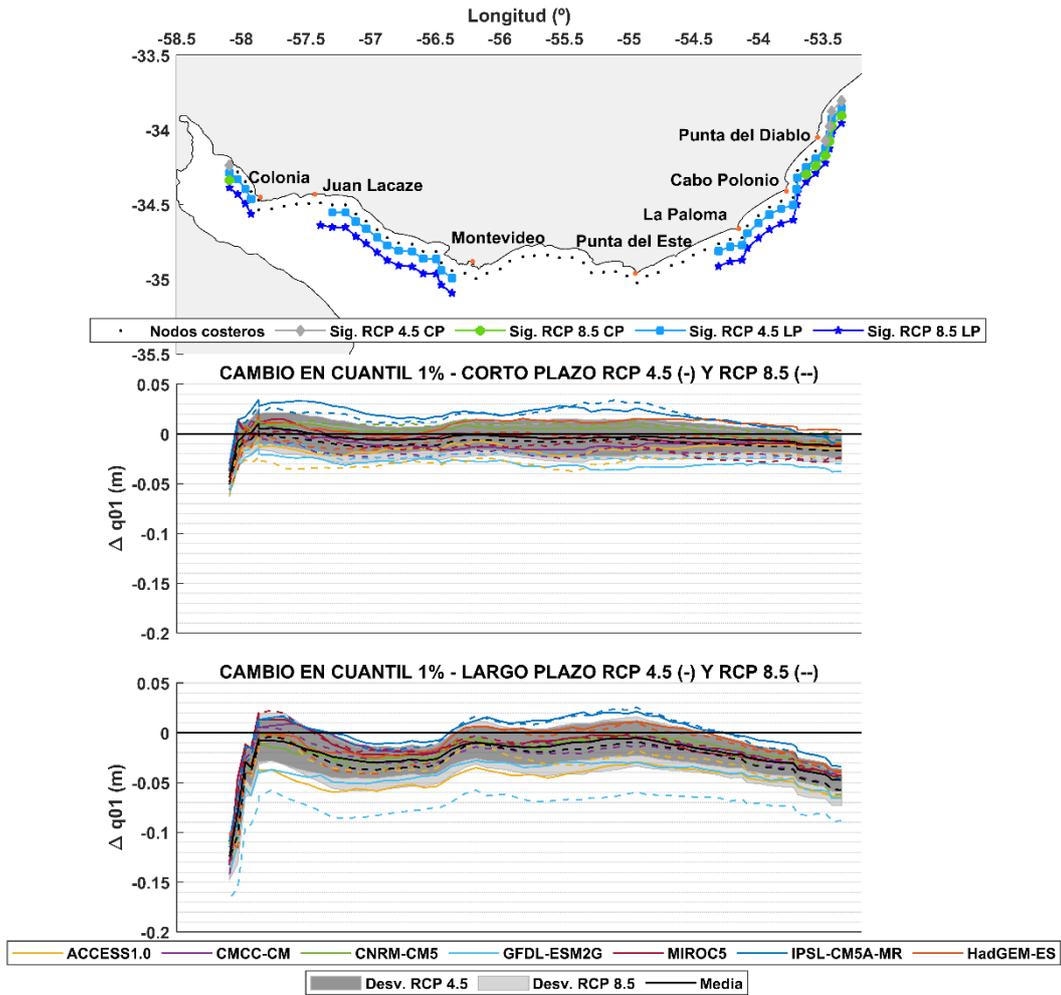


Figura 66- Cambio del cuantil 1% del NMSR obtenidos forzando el modelo local con cada modelo atmosférico global y ensamble de los resultados anteriores (negro), a lo largo de la costa a corto y largo plazo para los escenarios RCP 4.5 (líneas continuas) y RCP 8.5 (líneas punteadas). Panel superior: Nodos de cálculo y significancia del cambio del ensamble para cada escenario. Panel intermedio: cambio a corto plazo. Panel inferior: cambio a largo plazo.

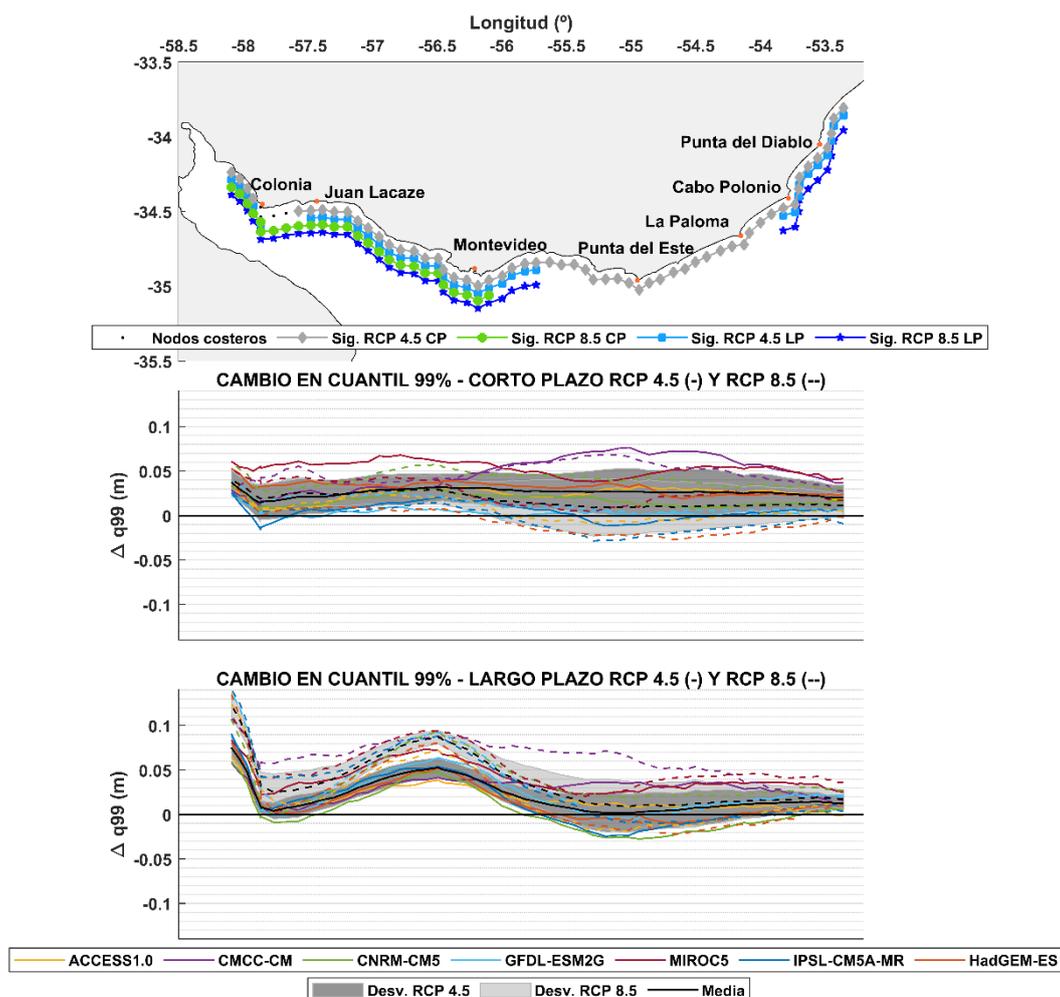


Figura 67- Cambio del cuantil 99% del NMSR obtenidos forzando el modelo local con cada modelo atmosférico global y ensamble de los resultados anteriores (negro), a lo largo de la costa a corto y largo plazo para los escenarios RCP 4.5 (líneas continuas) y RCP 8.5 (líneas punteadas). Panel superior: Nodos de cálculo y significancia del cambio del ensamble para cada escenario. Panel intermedio: cambio a corto plazo. Panel inferior: cambio a largo plazo.

6.3.4 Cambios en la componente meteorológica

El objetivo de analizar la marea meteorológica es enfocar la atención en la influencia que sus cambios puedan tener en el cambio del nivel de mar total. Debido al costo computacional de los cálculos implicados en el análisis y al principal interés de este trabajo de tesis, el análisis se realiza solamente a las series de nivel correspondientes a los nodos costeros. Para obtener la componente meteorológica de nivel en cada nodo se parte del *NMSR*, se le extrae el nivel medio y a la componente restante se le aplica el filtro de Doodson (Pugh, 1987) y se obtiene de esta forma lo que se denomina el residuo meteorológico M_{met} .

En la Figura 68 se muestra el cambio en el cuantil 1% del residuo meteorológico obtenido para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 a corto y largo plazo. El cambio observado, forzando con cualquiera de los modelos atmosféricos, es mínimo a lo largo de toda la costa, apenas superando el centímetro a corto plazo y los dos centímetros a largo plazo de cambio para cualquiera de los escenarios RCP. La máxima disminución alcanzada para el escenario RCP 8.5, por el modelo GFDL-ESM2G, indica una disminución del cuantil 1% del residuo meteorológico de apenas dos centímetros. Es importante notar que debido a la dispersión de los resultados arrojados por los

modelos, y por las diferentes direcciones de cambio, el resultado del ensamble que no se aleja más de 4 mm del no cambio a corto plazo y 2 mm a largo plazo, no es significativo.

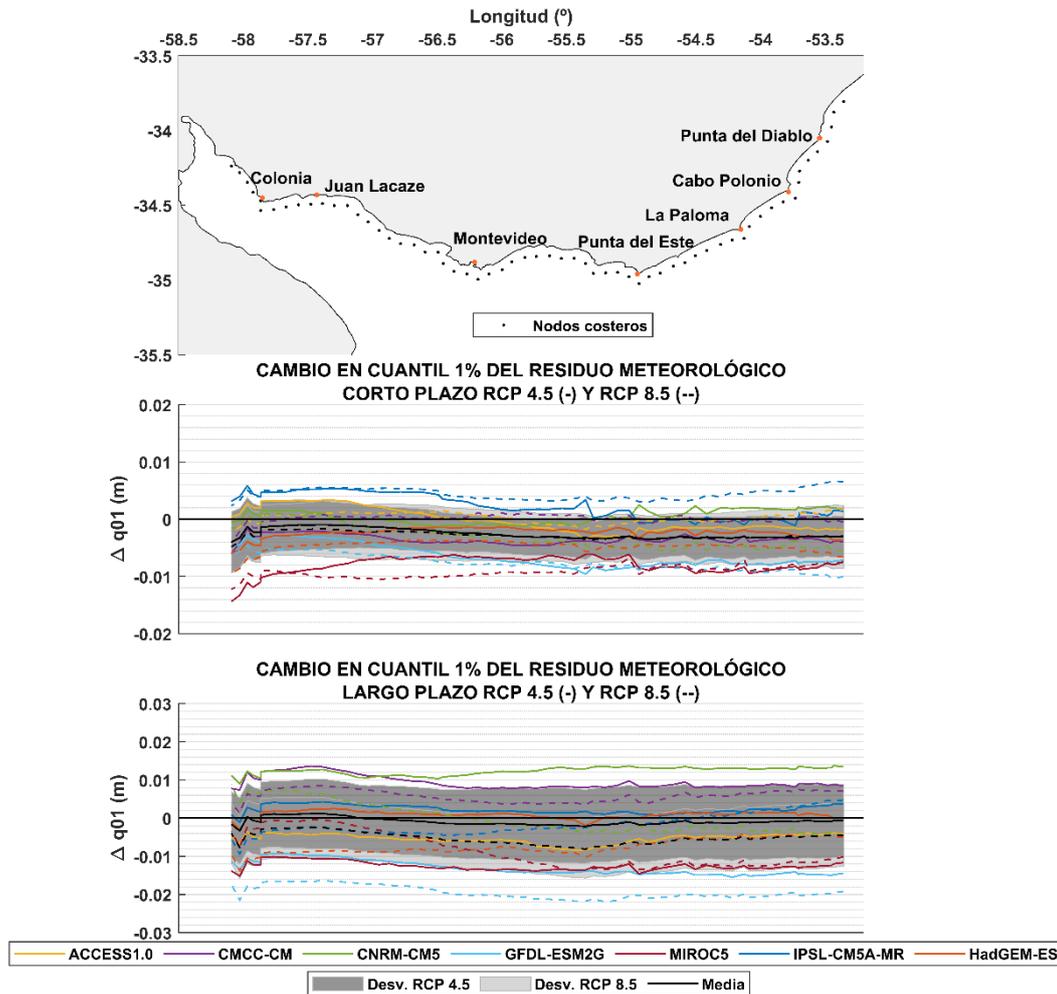


Figura 68- Cambio en el cuantil 1% del residuo meteorológico obtenido forzando el modelo local con cada modelo atmosférico global y ensamble de los resultados anteriores (negro), a lo largo de la costa a corto y largo plazo para los escenarios RCP 4.5 (líneas continuas) y RCP 8.5 (líneas punteadas). Panel superior: Nodos de cálculo y significancia del cambio del ensamble para cada escenario. Panel intermedio: cambio a corto plazo. Panel inferior: cambio a largo plazo.

En la Figura 69 se muestra el cambio en el cuantil 99% del residuo meteorológico obtenido para los escenarios RCP 45 y RCP 8.5 a corto y largo plazo. En términos generales los cambios son pequeños, aunque se observa una leve tendencia de cambio que parece aumentar a lo largo de la costa hacia el este, alcanzando valores que superan los 5 cm a corto y largo plazo para algún modelo. En la zona interior del estuario los cambios mostrados por todos los modelos son mínimos. El modelo que sobresale mostrando los mayores cambios es el CMCC-CM en todos los casos. La tendencia de aumento se puede ver claramente a través del ensamble de modelos (líneas negras, continuas (RCP 4.5) y punteada (RCP 8.5)), aunque no supera los 2 cm de cambio a lo largo de la costa en ningún caso. Al igual que en el caso anterior los cambios son no significantes debido a la gran dispersión de los resultados.

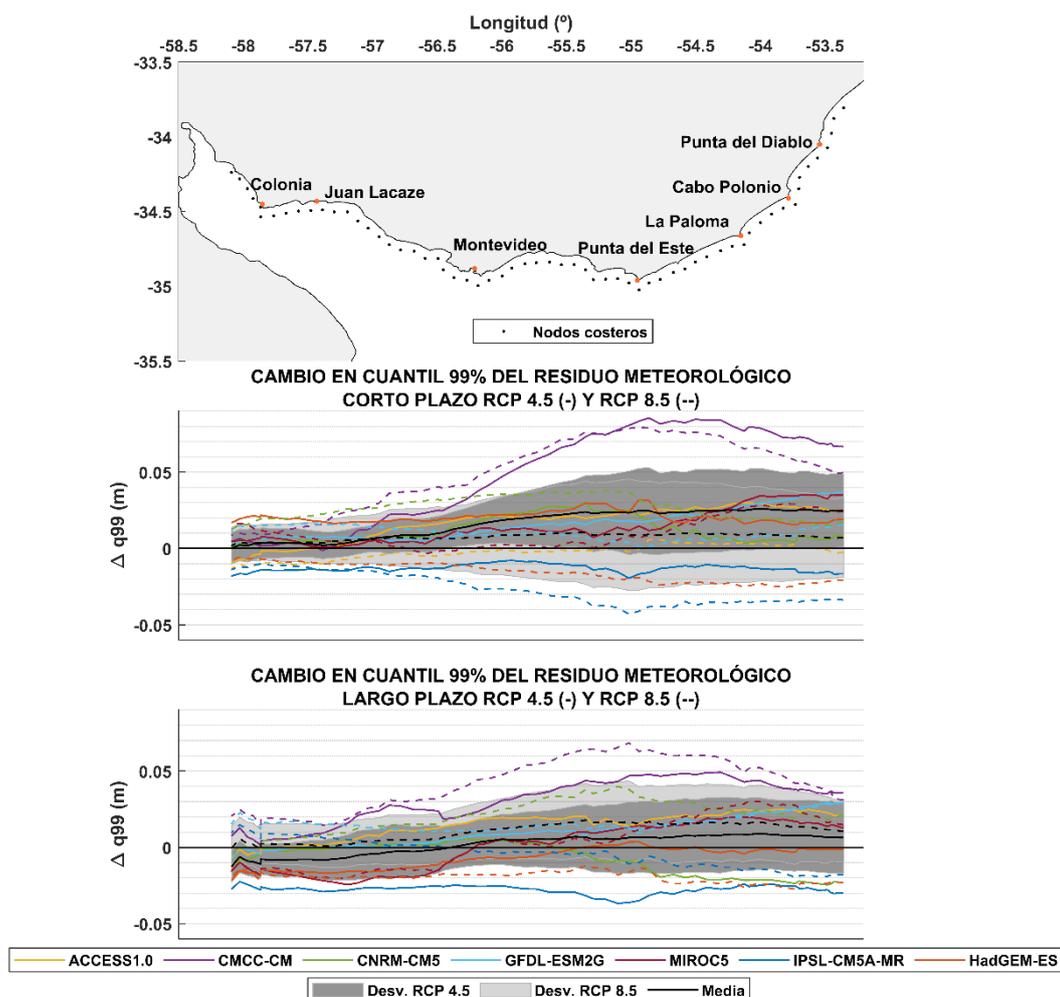


Figura 69- Cambio en el cuantil 99% del residuo meteorológico obtenidos forzando el modelo local con cada modelo atmosférico global y ensamble de los resultados anteriores (negro), a lo largo de la costa a corto y largo plazo para los escenarios RCP 4.5 (líneas continuas) y RCP 8.5 (líneas punteadas). Panel superior: Nodos de cálculo y significancia del cambio del ensamble para cada escenario. Panel intermedio: cambio a corto plazo. Panel inferior: cambio a largo plazo.

6.3.5 Cambios en la componente astronómica

Para obtener las componentes astronómicas de la marea se hace un análisis de armónicos utilizando la herramienta T-Tide en MATLAB (Pawlowicz et al, 2002) y se analiza solamente la amplitud de las dos componentes más relevantes a lo largo de la costa, M2 y O1 (Fernández, 2011).

En la Figura 70 se muestra el cambio en la amplitud de la componente semidiurna M2 a lo largo de la costa. Se observa principalmente que la variación espacial del cambio a lo largo de la costa se repite a corto y a largo plazo. A modo de complemento se agrega a la figura en este caso la amplitud de la componente obtenida de cada modelo durante el periodo histórico. Se puede ver que tanto la amplitud como el cambio tienen la misma tendencia, con máximos y mínimos relativos casi coincidentes en el espacio. Se tiene un mínimo relativo entre Colonia y Juan Lacaze, con un cambio nulo tanto a corto como a largo plazo para una amplitud de aproximadamente 15 cm. Luego se tiene otro mínimo que en la amplitud se da entre Montevideo y Punta del Este, más cercano a Punta del Este y en el cambio a corto y largo plazo el mínimo se acerca a Punta

del Este. El cambio es menor a un centímetro en este último caso, para una amplitud menor a 10 cm.

Por otra parte, el máximo cambio se da para las mayores amplitudes, en la costa interior del estuario, donde el máximo cambio a corto plazo alcanza 1,5 cm y a largo plazo supera los 4 cm para el RCP 4.5 y los 6 cm para el RCP 8.5. Entre Juan Lacaze y Montevideo se tiene un máximo relativo en la amplitud de la componente M2 que supera los 30 cm, los cambios para ambos horizontes temporales también presentan un máximo relativo en esta zona que a corto plazo apenas alcanza el centímetro y a largo plazo supera los 2 cm para el RCP 4.5 y los 4 cm para el RCP 8.5.

Cabe destacar que dentro de cada escenario y horizonte temporal la dispersión de los resultados entre modelos es muy pequeña, observándose para cada escenario y horizonte los gráficos asociados a cada modelo casi superpuestos. Debido a lo anterior los resultados de cambio son significantes a lo largo de toda la costa (no se muestra en la figura). En el cambio a corto plazo además no hay prácticamente diferencia entre ambos escenarios mientras que a largo plazo existen diferencias entre cada escenario en las zonas que presentan el mayor cambio.

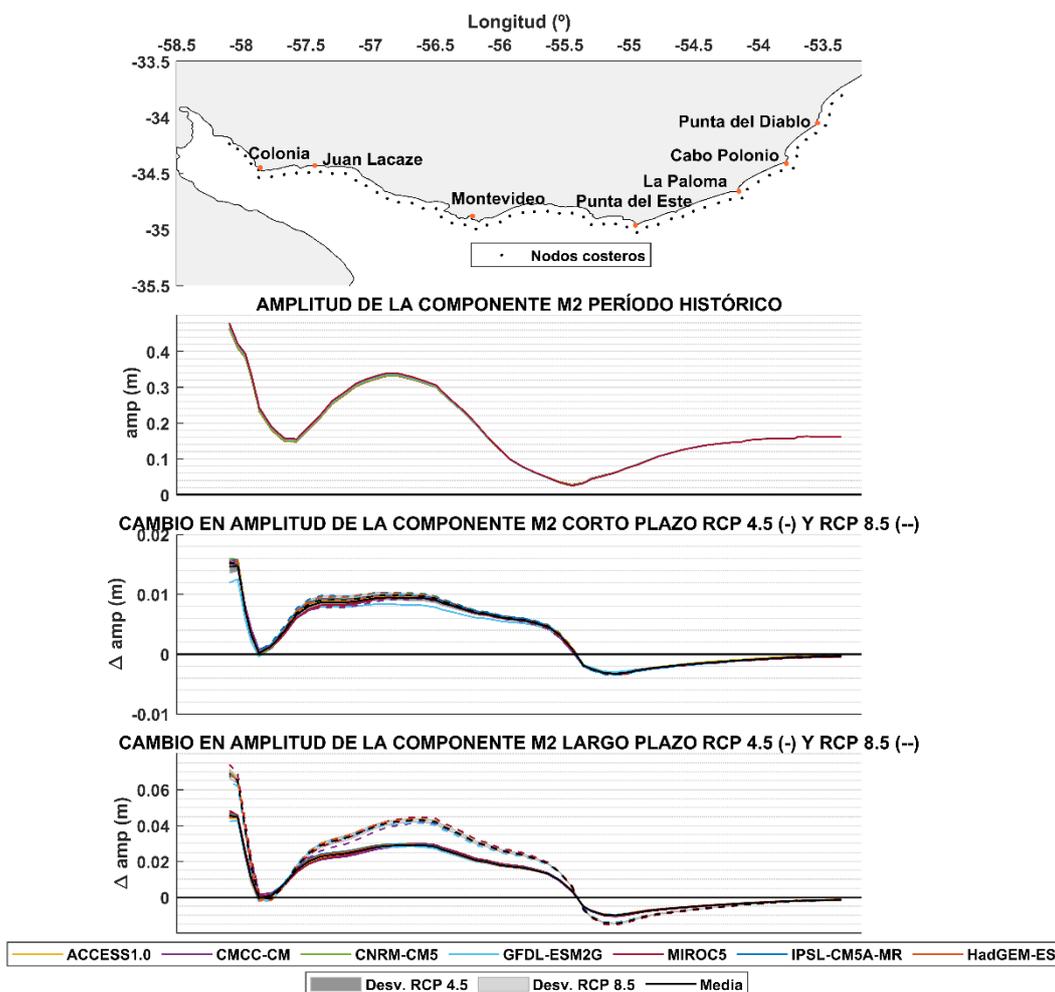


Figura 70- Cambio en la amplitud de la componente M2 de la marea astronómica obtenidos forzando el modelo local con cada modelo atmosférico global y ensamble de los resultados anteriores (negro), a lo largo de la costa a corto y largo plazo para los escenarios RCP 4.5 (líneas continuas) y RCP 8.5 (líneas punteadas). Panel superior:

Nodos de cálculo. Panel intermedio 1: amplitud de la componente M2. Panel intermedio 2: cambio en la amplitud a corto plazo. Panel inferior: cambio en la amplitud a largo plazo.

En la Figura 71 se muestran la amplitud y su cambio a corto y largo plazo para la componente diurna O1. Se observa al igual que para la componente M2 que la tendencia de cambio sigue la de la amplitud, con mayores cambios a mayor amplitud. Los cambios a corto plazo muestran mayor dispersión entre modelos (respecto a lo observado en la M2), aunque no superan el centímetro en ningún caso. A largo plazo se observa una leve diferencia entre escenarios, aunque muy pequeña, y el máximo cambio no alcanza los 4 cm para el escenario RCP 4.5 y apenas los supera para el escenario RCP 8.5, donde la amplitud de la componente es de aproximadamente 20 cm. Al igual que para la componente M2 los cambios son significantes a largo de la costa.

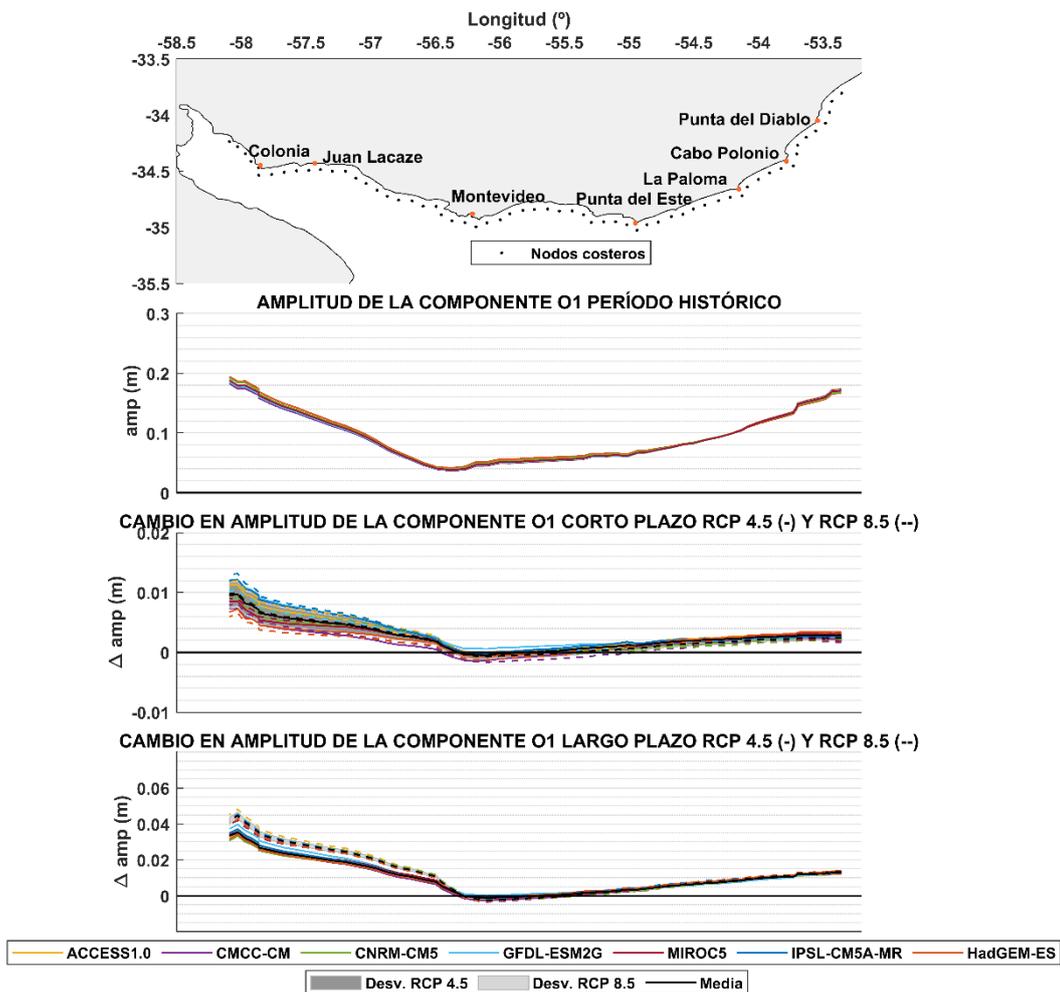


Figura 71- Cambio en la amplitud de la componente O1 de la marea astronómica obtenidos forzando el modelo local con cada modelo atmosférico global y ensamble de los resultados anteriores (negro), a lo largo de la costa a corto y largo plazo para los escenarios RCP 4.5 (líneas continuas) y RCP 8.5 (líneas punteadas). Panel superior: Nodos de cálculo. Panel intermedio 1: amplitud de la componente M2. Panel intermedio 2: cambio en la amplitud a corto plazo. Panel inferior: cambio en la amplitud a largo plazo.

6.4 Discusión

Se analizaron los cambios en el nivel de mar para cuatro escenarios futuros (corto plazo y largo plazo, RCP 4.5 y RCP 8.5) obtenidos de forzar el modelo local con proyecciones de vientos y presiones de los 7 modelos atmosféricos globales evaluados en el capítulo 4. Para analizar estos cambios, se calcularon estadísticos, tanto en un dominio espacial como a lo largo de la costa, y se determinó el cambio a corto y a largo plazo de dichos estadísticos. También se analizaron los cambios mostrados por el ensamble, calculado para cada estadístico analizado, como la media de los 7 estadísticos obtenidos con los 7 modelos atmosféricos globales.

Con el objetivo de determinar si los modelos hidrodinámicos, tanto regional como el local, forzados con los vientos y presiones de los modelos atmosféricos globales lograban reproducir correctamente la climatología de niveles en el dominio de estudio, se controlaron los resultados de los modelos hidrodinámicos forzados con los diferentes forzantes atmosféricos. Como resultados de referencia en esta instancia se utilizaron los modelos hidrodinámicos forzados con vientos de CFSR evaluados en la sección 5.3.4 (modelo regional) y 5.4.4 (modelo local). El modelo regional forzado con los modelos atmosféricos globales en términos generales mostró reproducir correctamente la climatología de nivel en todos los casos, aunque para algunos modelos se observaron subestimaciones del orden de 20 cm en los cuantiles extremos (por ejemplo IPSL-CM5A-MR en La Paloma (Figura 28)). Por otra parte el modelo local mostro un comportamiento más variable al ser forzado con los vientos y presiones de los 7 modelos atmosféricos. En particular, la climatología de niveles se reproduce correctamente al forzar con vientos y presiones de MIROC5 (Figura 36) y CMCC-CM (Figura 33), sin embargo los resultados no son tan buenos al forzar con el resto de los modelos, sobre todo al momento de reproducir los cuantiles más altos, donde se alcanzan diferencias de hasta 80 cm. Es importante notar que el campo del cuantil 50% es muy similar al obtenido del reanálisis en todos los casos (Figura 43).

Resulta de interés contrastar estos últimos resultados con los obtenidos de la evaluación de los modelos atmosféricos globales (capítulo 4). De esta última se obtuvo que el MIROC5 se destacaba notoriamente al representar las situaciones sinópticas de presión obtenidas en un dominio un tanto mayor al dominio del modelo hidrodinámico regional (el dominio utilizado para la evaluación de los modelos atmosféricos globales es: lat [10°S; 65°S], lon [70°W; 10°W] mientras que el dominio del modelo hidrodinámico regional es: lat [22°S; 54.4°S], lon [70°W; 45.5°W]). Se obtuvo que este modelo representaba de forma satisfactoria tanto las situaciones sinópticas más probables como las menos probables, al igual que la variabilidad anual de dichas situaciones. Siguiendo a este modelo en términos de buena pericia al representar las situaciones sinópticas de presión se obtuvieron CMCC-CM y CNRM-CM5, aunque con un desempeño notoriamente peor que MIROC5. Lo anterior conduce a creer que, dentro de los modelos atmosféricos utilizados en este trabajo, el MIROC5 es el que mejor representa las condiciones atmosféricas de vientos y presiones en nuestra zona de estudio. Aun así, el desconocimiento respecto a qué tan acertadas son las proyecciones futuras realizadas por cada modelo, hacen que la mejor opción para obtener posibles escenarios de cambio en el clima de niveles de mar siga siendo trabajar con todos los modelos y su ensamble. Por otra parte, la coherencia entre los resultados obtenidos de la evaluación y la calidad de los resultados obtenidos del modelo local al forzar con los diferentes modelos atmosféricos indica que la metodología utilizada para evaluar los modelos en nuestra región de estudio es acertada.

Los gráficos de boxplots del *NMT* (Figura 48 y 49) en tres localidades de la costa Uruguay (Colonia, Montevideo y La Paloma) ponen en evidencia el comportamiento variable del modelo local forzado con los diferentes modelos atmosféricos. En estos se observa que el rango de niveles de mar abarcado por algunos modelos es notoriamente menor que el de otros, a modo de ejemplo, mientras que en Colonia el GFDL-ESM2G abarca un rango de variación de niveles de poco más de 3 m, MIROC5 y CMCC-CM alcanzan casi los 5 m, aunque esta diferencia se hace menos notoria en La Paloma. Sin embargo, este rango no se mantiene ni crece precisamente a futuro para todos los modelos, por ejemplo para ACCESS1.0. Lo anterior refuerza la idea de que a pesar de que algunos modelos arrojen mejores resultados durante el periodo histórico al ser utilizados como forzantes del modelo local, con el objetivo de abarcar el mayor rango de posibles proyecciones futuras de cambio en el clima de nivel de mar es mejor trabajar con la mayor cantidad de modelos atmosféricos posibles. Por otro lado, los valores correspondientes a la media del *NMT*, al igual que los cuantiles 5% y 95%, muestran principalmente la tendencia en el aumento del nivel medio del mar regional, lo cual conduce a analizar las interacciones entre las dinámicas existentes sin considerar el aumento impuesto.

Al analizar los cambios en el *NMT* para todos los escenarios y períodos futuros a lo largo de la costa, se observa que la media del cambio es constante a lo largo de la misma dominada principalmente por el aumento del nivel medio de mar regional. Al analizar los cambios en los cuantiles 1% y 99% se observa la influencia de otras componentes diferentes al aumento del nivel medio del mar, con una distribución espacial que varía a lo largo de la costa. El cambio en el cuantil 1% es mínimo en los nodos más interiores del estuario y máximo a la altura de Colonia, tanto a largo como a corto plazo para ambos escenarios (Figura 51). El cuantil 99% muestra principalmente un máximo en los nodos más interiores del estuario a corto plazo y a largo plazo también muestra un máximo relativo alrededor de Montevideo (Figura 52). Esta distribución espacial a lo largo de la costa para los cuantiles 1% y 99% se observa también al analizar dichos cuantiles del *NMSR*. Al analizar este último, se puede centrar la atención en los cambios inducidos en las dinámicas de ondas de marea por el aumento del nivel medio del mar regional. Mientras que la distribución del cuantil 1% (Figura 66) no arroja información adicional a lo observado en la distribución del cuantil 1% del *NMT* (el *NMSR* muestra cambios casi superpuestos para ambos escenarios tanto a corto como a largo plazo), el análisis del cuantil 99% del *NMSR* (Figura 67) permite ver que a largo plazo para el escenario más severo RCP 8.5 el cambio se intensifica, obteniéndose diferencias de más de 5 cm entre los cambios máximos obtenidos por el ensamble para cada escenario RPC.

Respecto al residuo meteorológico, el mismo se analizó solamente en los nodos costeros. El cuantil 1% no muestra cambios relevantes; prácticamente en ninguna parte de la costa los resultados de los modelos superan los 2 cm de cambio (Figura 68). El ensamble, tanto a corto como a largo plazo muestra mayormente descensos (del orden de mm), aunque en ningún nodo costero el cambio es significativo. Por otra parte, el cuantil 99% (Figura 69) muestra mayores cambios, que alcanzan los 4 cm para algún modelo, observándose que el mismo crece hacia la costa Este. El resultado del ensamble de los 7 modelos muestra a corto plazo cambios positivos que apenas superan los 2 cm hacia la costa Este y a largo plazo muestra descensos de hasta 1 cm hasta antes de Montevideo donde pasa a mostrar aumentos que no llegan a 1 cm. Tanto a corto como a largo plazo los resultados son no significantes debido a la falta de consenso entre modelos y a la gran desviación estándar intermodelo. A diferencia de los resultados obtenidos

en este trabajo, las proyecciones realizadas del residuo meteorológico mediante downscaling estadístico por IH-Cantabria (IH-Cantabria, 2018) utilizando proyecciones de 30 modelos atmosféricos mostraron un descenso de hasta 1,5 cm en el cuantil 95% a lo largo de toda la costa, aunque tampoco existe consenso en los resultados obtenidos.

Por otra parte, los cambios en la amplitud de las componentes astronómicas M2 y O1 (Figura 70 y 71) a lo largo de la costa mostraron ser muy similares entre modelos. La tendencia observada indica mayores cambios a mayor amplitud de marea en general, y el cambio relativo a la amplitud es mayor para la componente O1, que muestra un cambio que alcanza los 4 cm en una amplitud de 20 cm. La M2 muestra cambios a corto plazo que no superan 1,5 cm y a largo plazo alcanzan los 4,2 cm y 6 cm en la zona interior del estuario para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 respectivamente. Principalmente se observa que el cambio en las componentes astronómicas no está influenciado por el forzante atmosférico, pues para los 7 forzantes el cambio es prácticamente igual. Lo anterior implica que las variaciones en la marea astronómica se deben al aumento del nivel medio del mar regional impuesto.

De todos los resultados analizados se desprende que el principal aporte al cambio en el nivel de mar total es el cambio en el nivel de mar regional. Luego la dinámica de las ondas de marea obtenida restando este aporte muestran que es especialmente importante el cambio de la marea astronómica producto del aumento del nivel medio del mar regional y que mayormente de esta interacción es que nace la distribución espacial a lo largo de la costa que se observa en los cuantiles 1% y 99% (principalmente en este último). Dado que la media del NMM_{modelo} es constante a lo largo de la costa se entiende que este no aporta significativamente al patrón de distribución encontrado. Por otra parte, el cuantil 99% del cambio de la componente meteorológica no presenta la distribución espacial observada para el NMT o $NMSR$, sino que muestra valores mínimos en la costa hacia la zona interior del estuario y crece hacia el Este. El cambio a lo largo de la costa en las componentes astronómicas analizadas sí presenta una distribución que es congruente con la distribución espacial observada del $NMSR$, sobre todo en la zona interior del estuario donde el cambio para la componente M2 y O1 son máximos. En particular la componente M2 presenta un máximo relativo que abarca la zona de máximo cambio alrededor de Montevideo presentada en el NMT y $NMSR$, lo cual conduce a pensar que puede estar también aportando significativamente, aunque para la componente M2 la zona de cambio se extiende casi hasta Punta del Este, a diferencia del $NMSR$. Todo lo anterior es congruente con el hecho de que los cambios en el cuantil 99% se intensifiquen a largo plazo con el escenario más severo, dado que la diferencia en el aumento del nivel medio del mar regional entre escenarios incrementa a largo plazo.

Los resultados anteriores hacen cuestionarse qué tanta información aporta el utilizar varios modelos atmosféricos globales para obtener proyecciones de cambio de nivel de mar si es que el principal aporte al cambio en el nivel de mar luego del aumento en el nivel medio regional es la interacción entre este último aumento y la marea astronómica. Los resultados obtenidos por el IMFIA (IMFIA, 2018b) a partir de modelar con el modelo hidrodinámico local un escenario con aumentos de nivel de mar de 57.9 cm y 85.4 cm, utilizando el forzante atmosférico para el periodo 1986-2005 del CFSR, son congruentes con lo observado en este trabajo. A pesar de que no son exactamente comparables con los resultados obtenidos en este trabajo, principalmente porque los aumentos de nivel medio del mar introducidos como condición de borde e inicial no

son los mismos, el patrón de distribución espacial de cambios a lo largo de la costa para el cuantil 95% muestra las mismas zonas con máximos de cambio en el nivel de mar, al igual que el cambio en la amplitud de las componentes astronómicas M2 y O1. Estos resultados también muestran la relevancia de la aplicación de un método de downscaling que tome en cuenta la interacción de las dinámicas marinas con el aumento del nivel medio del mar, como es el downscaling dinámico.

7 CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo de tesis era cuantificar los efectos del cambio climático en el nivel de mar a lo largo de la costa uruguaya, a corto y largo plazo para dos escenarios futuros RCP 4.5 y RCP 8.5. Para lograr dicho objetivo se utilizaron proyecciones históricas y futuras de vientos y presiones de modelos atmosféricos globales correspondientes al CMIP5, presentados en el quinto reporte del IPCC (IPCC, 2013), una de las herramientas más utilizadas hoy en día para estudiar efectos del cambio climático. La metodología utilizada para analizar a escala local la variable nivel de mar fue una metodología de downscaling dinámico a través de modelos anidados, utilizando como punto de partida dos modelos hidrodinámicos implementados previamente en el grupo de trabajo del IMFIA, denominados en este trabajo modelo regional y modelo local.

El modelo regional, cuyo objetivo es el de generar la onda de marea relevante que luego es impuesta al modelo local, es la implementación en su versión 2D del modelo número MOHID a un dominio que comprende al Océano Atlántico Sur (Martínez et al. 2015) y es forzado por ondas de marea astronómica en los bordes oceánicos, caudal medio de los ríos Paraná y Uruguay y por vientos y presiones en la superficie libre. El comportamiento del modelo fue evaluado comparando sus resultados con datos medidos en Mar del Plata y La Paloma donde mostró correlaciones de 0.84 y 0.71 respectivamente. El modelo local, cuyos resultados fueron los utilizados para cuantificar los cambios en el nivel medio del mar, es la implementación en su versión 2D del modelo TELEMAC a un dominio que abarca al Río de la Plata y su Frente Marítimo (IMFIA, 2018a), y es forzado por vientos y presiones en la superficie libre y caudales correspondientes a los ríos Uruguay, Paraná y Santa Lucía, además de la condición de borde del modelo regional. El comportamiento de este último fue evaluado en este trabajo comparando sus resultados con datos medidos en 6 estaciones distribuidas a lo largo de la costa observándose correlaciones superiores a 0.77 exceptuando la estación de Punta del Este donde fue de 0.65. Debido a las particulares de la zona de la desembocadura de los ríos afluentes Paraná y Uruguay, y efectos de mojado y secado de las celdas del modelo en esa zona, no se analizaron los resultados desde la desembocadura de los ríos afluentes hasta la línea que une Conchillas con Buenos Aires.

Debido a la falta de antecedentes respecto a la calidad de los vientos y presiones de los modelos atmosféricos globales del CMIP5 en la zona del Océano Atlántico Sur se realizó una evaluación de los modelos cuyas variables cumplieran con las frecuencias necesarias para forzar los modelos hidrodinámicos a utilizar, los cuales son: ACCESS 1.0, CMCC-CM, CNRM-CM5, MIROC5, IPSL-CM5A-MR y HadGEM2-ES. La evaluación se realizó siguiendo una metodología similar a la presentada por Pérez et al. (2014), basada en la clasificación en 100 tipos de tiempo del campo de presión diarios del reanálisis, en este caso el del NCEP-CFSR durante el periodo histórico. Luego se realizó una comparación entre las probabilidades de ocurrencia de los tipos de tiempo para el reanálisis (considerando a este como datos medidos) y para cada uno de los modelos atmosféricos evaluados. Los resultados de la clasificación del reanálisis en los tipos de tiempo mostraron que no existe un conjunto de patrones que se destaque por ser dominantes durante el periodo histórico, observándose que la mayor frecuencia relativa no supera el 2%. De la evaluación se desprendió que los modelos atmosféricos globales en general presentan menor variabilidad que el reanálisis, excepto por el MIROC5 que logra representar correctamente las

situaciones menos probables y más probables. MIROC5 también se destacó en términos de representar la variabilidad interanual de las probabilidades de ocurrencia. Al controlar los resultados del modelo hidrodinámico local forzado con los vientos provenientes de los modelos atmosféricos globales utilizando como referencia los resultados del modelo local forzado con vientos de CFSR se obtuvo que MIROC5 y CMCC-CM son los que representan mejor la climatología de niveles en el dominio de estudio. Se concluye de esto que la evaluación de los modelos atmosféricos globales mediante la metodología implementada es acertada. Aun así, la metodología puede mejorarse de cara a evaluar los nuevos modelos atmosféricos globales del CMIP6 (Eyring et al. 2016) cuyos nuevos resultados se están publicando actualmente, y obtener una evaluación más robusta. Las mejoras de la metodología podrían incluir un análisis de sensibilidad para la cantidad de tipos de tiempo, análisis de sensibilidad en la ventana temporal utilizada para obtener las medias de las variables utilizadas, profundizar en las variables óptimas para realizar la clasificación, entre otras.

Para obtener las proyecciones de nivel de mar se realizaron en total 1382 simulaciones de un año de duración, considerando el modelo regional y el modelo local. Se consideró un período histórico que va desde 1986 hasta el 2005 (20 años), un bloque futuro a corto plazo que va desde 2027 a 2045 (19 años) y un bloque futuro a largo plazo que va desde 2082 a 2100 (19 años). Ambos bloques futuros fueron simulados para dos escenarios; RCP 4.5 y RCP 8.5. Los resultados obtenidos para el período histórico forzando con los modelos atmosféricos globales fueron controlados mediante la comparación de cuantiles, utilizando como resultados de referencia los obtenidos de los modelos forzados con vientos de reanálisis del CFSR. El modelo regional mostró reproducir correctamente la climatología de niveles en la región al ser forzado por cualquiera de los modelos atmosféricos globales mientras que el modelo local mostró comportamientos más disímiles. Los modelos destacados por su buen comportamiento resultaron en este caso MIROC5 y CMCC-CM principalmente, luego ACCESS 1.0 que presentó un mejor comportamiento en las estaciones situadas hacia el exterior del estuario. El resultado obtenido con el resto de los modelos desmejora notoriamente hacia la zona interior del estuario.

Las simulaciones de los bloques futuros se realizaron imponiendo en ambos modelos el correspondiente aumento de nivel medio del mar regional, basado en información extraída del capítulo 13 del quinto reporte del IPCC (IPCC, 2013). Analizando las variaciones espaciales de los aumentos del nivel medio del mar en el dominio regional se concluye que, a efectos de analizar su efecto sobre el clima de niveles en la costa de Uruguay, este aumento puede ser correctamente representado por la media espacial dentro del dominio. Los aumentos determinados de esta forma para cada horizonte son para el RCP 4.5 desde 0.11 m a 0.19 m entre 2027 a 2045, y desde 0.39 m a 0.49 entre 2082 a 2100. Para el RCP 8.5 los aumentos de nivel medio regional son desde 0,11 m a 0.20 m entre 2027 a 2045 y desde 0.51 m a 0,73 m entre 2082 a 2100.

Al analizar las proyecciones obtenidas del nivel de mar total (*NMT*) se observó que el aumento en la media era constante a lo largo de la costa (Figura 50), dominada principalmente por el aumento del nivel de mar regional, mientras que el cuantil 1% y 99% (Figura 51 y 52) presentaban una variabilidad espacial a lo largo de la misma. Al analizar el cambio en el nivel de mar del *NMT* al restar el aumento de nivel medio de mar regional (*NMSR*) (Figura 66 y 67) se observó la misma distribución espacial y se identifica que los cambios en el cuantil 1% tanto a

corto como a largo plazo y en el cuantil 99% a corto plazo no se intensifican con el escenario más severo (RCP 8.5) a diferencia del cambio a largo plazo para el cuantil 99%. Se concluye que a corto plazo no existen importantes diferencias en los cambios obtenidos en torno al nivel medio regional impuesto entre ambos escenarios, pero a largo plazo los cambios se intensifican con el escenario futuro más severo para los extremos superiores de nivel. El ensamble del cuantil 1% del cambio en el *NMSR* a corto y largo plazo muestra un mínimo en los nodos más interiores del estuario y luego es muy cercano a 0 en el resto de la costa. El ensamble en el cuantil 99% muestra un máximo en la zona interior del estuario que a largo plazo alcanzan los 7 cm para el escenario RCP 4.5 y los 13 cm para el escenario RCP 8.5, y un máximo relativo alrededor de Montevideo que alcanza los 5 cm para el escenario RCP 4.5 y los 8 cm para el RCP 8.5. Además a largo plazo los cambios en el *NMSR* son consistentes para la mayor parte de la costa desde Montevideo hacia el interior del estuario y desde Cabo Polonio hacia el Este.

Al analizar los resultados del cambio en el cuantil 1% y 99% del residuo meteorológico a lo largo de la costa (Figura 68 y 69) se pudo observar, que además de presentar cambios mínimos muy cercanos a 0 que aumentan hacia el Este, el mismo no conserva el patrón de distribución espacial que se observó al analizar los cambios del del *NMT* y *NMSR* a lo largo de la costa. Por otra parte los cambios en las componentes M2 y O1 de la marea astronómica mostraron una tendencia a ser máximas donde las amplitudes de dichas componentes son máximas a lo largo de la costa (Figura 70 y 71). Además, se observaron cambios muy similares entre modelos, dependiendo principalmente del escenario RCP y el horizonte temporal. La M2 muestra mayores cambios en la zona interior, con cambios de hasta 4 cm (RCP 4.5) y 6 cm (RCP 8.5) a largo plazo en una amplitud de aproximadamente 45 cm, y en la zona comprendida entre Juan Lacaze y Montevideo, con cambios de 2 cm (RCP 4.5) y 4 cm (RCP 8.5) a largo plazo, para una amplitud que supera los 30 cm. La O1 mostro cambios máximos en la zona interior del estuario de hasta 4 cm en una amplitud de 20 cm a largo plazo para el escenario RCP 8.5.

La conclusión principal del análisis del cambio en las diferentes componentes del nivel de mar es que los cambios no están en los eventos de marea meteorológica, es decir tormentas, siendo que el cambio en los cuantiles analizados de esta componente es muy pequeño. La principal componente del cambio del nivel de mar total es el aumento de nivel de mar regional siguiéndole el efecto que este aumento tiene sobre la marea astronómica. Lo anterior indica que la metodología implementada en este trabajo, un downscaling dinámico, es la correcta y necesaria para poder determinar el cambio en el nivel de mar total debido a que esta, a diferencia de los downscaling estadísticos, son capaces de resolver las interacciones que pueden surgir entr las diferentes componentes de la marea y el aumento del nivel medio de mar.

De lo anterior se concluye que para complementar el presente trabajo, no debería aportar información agregar nuevos miembros al ensamble del modelo local forzado con los diferentes modelos atmosféricos globales, de hecho IMFIA (2018b) modificó solamente el nivel medio del mar en las condiciones iniciales y de borde para llegar a los mismos resultados, forzando con vientos correspondientes al período histórico. Sin embargo, los esfuerzos sí pueden ponerse en simular escenarios con valores anuales de aumento de nivel medio del mar correspondientes a la franja superior del intervalo de confianza además del valor medio. Por otra parte, también se pueden introducir al modelo aumentos de nivel medio del mar regional actualizados, (Carson et al (2016) presenta resultados más detallados de aumento del nivel medio del mar) siendo que

es un ámbito de la investigación que avanza constantemente, y si estos llegaran a tener una mayor resolución a futuro introducir la condición variable en el espacio.

Finalmente, a partir de toda la información obtenida de este trabajo de tesis, siguiendo en el camino de explorar los cambios en las dinámicas marinas debido al cambio climático, un importante paso a seguir es utilizar la gran cantidad de información generada para forzar el modelo dinámico de oleaje ya implementado y calibrado en IMFIA (2018a).

Por último, a modo de resumen se presentan algunos valores importantes de cambio de nivel de mar total, resultado del ensamble obtenido de los 7 modelos atmosféricos a lo largo de la costa:

- El aumento en la media es básicamente constante a lo largo de la costa. A corto plazo para el escenario RCP 4.5 es de aproximadamente 15 cm y para el escenario RCP 8.5 es de 15.5 cm. A largo plazo para el escenario RCP 4.5 se tiene un aumento de 43 cm y para el escenario RCP 8.5 de 61 cm.
- El cambio en el cuantil 99% a corto plazo ronda los 18 cm para ambos escenarios RCP.
- El cambio en el cuantil 99% a largo plazo muestra dos zonas de especial relevancia donde se encuentran los mayores aumentos: zona costera desde Colonia hacia el interior del estuario (zona 1) y zona costera de Montevideo (zona 2). La zona uno presenta un aumento de hasta 52 cm para el escenario RCP 4.5 y de 74 cm para el RCP 8.5. La zona 2 muestra aumentos de aproximadamente 50 cm para el escenario RCP 4.5 y de 71 cm para el escenario RCP 8.5.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., Forzieri, G. (2015). Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrol Earth Syst Sci* 19, 2247-2260.

Camus, P., F. J. Mendez, R. Medina and A. S Coifiño (2011). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate, *Coastal Engineering*. 58, pp 453-462

Camus, P., Menéndez, M., Méndez, F. J., Izaguirre, C., Espejo, A., Cánovas, V., Pérez, J., Rueda, A., Losada, I. J., Medina, R.(2014). A weather-type statistical downscaling framework for ocean wave climate, *J. Geophysics. Res.: Oceans*, 119.

Camus, P., Losada, I.J., Izaguirre, C., Espejo, A., Menéndez, M., Pérez, J. (2017). Statistical wave climate projections for coastal impact assessments. *Earth's Future*, 5, 918-933.

Carson, M., Kohl, A., Stammer, D., Slangen, A. B. A., Katsman, C. A., Van de Wal, R. S. A., Church, J., White, N. (2016) Coastal sea level changes, observed and projected during the 20th and 21st century. *Climate change*, 134, 269-218.

Casas-Prat, M., Wang, X. L., Swart, N. (2017). CMIP5-based global wave climate projections including the Arctic Ocean. *Ocean Modeling*, 123, 66-85.

Church, J. A, and N.J. White (2011). Sea level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surv. Geophysics*, 32, 585-602.

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R. J., Taylor, K.E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, 1937-1958.

Fernández, M., & Piedra-Cueva, I. (2011). Revisión de un modelo regional de marea astronómica implementado sobre la región suroeste del océano atlántico. Tesis de maestría en mecánica de los fluidos.

Flather, R. (1976). Results from surge prediction model of the north-west european continental shelf for april, november and december 1973. Report 24, Institute of Oceanography (UK).

Fossati, M., Cayocca, F., Piedra-Cueva, I. (2014). Fine sediment dynamics in the Río de la Plata. *Advances in Geosciences*, 39, 75-80.

Fossati, M., Piedra-Cueva, I. (2008). Numerical modelling of residual flow and salinity in the Río de la Plata. *Applied Mathematical Modelling*, 32, 1066-1086.

Fossati, M., Piedra-Cueva, I. (2013). A 3d hydrodynamic numerical model of the Río de la Plata and Montevideo's coastal zone, *Appl. Math. Modell.* 37, pp. 1310-1332.

Hemer, M. A, Katzfey, J. Trenham, C. (2013). Global dynamical projections of surface ocean wave climate for a future high greenhouse gas emission scenario. *Ocean modelling*, 70. 221-245.

Hemer, M. A, Trenham, C.E. (2015). Evaluation of a CMIP5 derived dynamical global wind wave climate model ensemble. *Ocean Modelling* 103. 190-203.

Hervouet, J.M. (2007). Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.

IH-Cantabria (2018). Documento preparatorio D3.2: Proyecciones de cambio climático del oleaje y residuo del nivel del mar en Uruguay. Proyecciones regionales del nivel medio del mar en Uruguay.

IMFIA (2008). Modelo Pre-Operacional del Río de la Plata – Río Uruguay. Proyecto PDT.

IMFIA (2018a). Informe de actividades en el marco del proyecto: URU/18/002. Integración del enfoque de adaptación en ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay. Entregable 1.1.

IMFIA (2018b). Informe de actividades en el marco del proyecto: URU/18/002. Integración del enfoque de adaptación en ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay. Entregable 2.1.

IPCC (2013). Climate change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC (2019): Summary for Policymakers. Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. In Press.

Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, Vol. 56, pp. 394-415.

Mateus M. and Neves R. (eds.) (2013). Ocean modelling for coastal management – Case studies with MOHID. IST Press.

Martínez, C., Silva, J.P., Dufrechou, E., Santoro, P., Fossati, M., Ezzati, P., Piedra-Cueva, I. (2015). Towards a 3D Hydrodynamic numerical modeling system for long term simulations of the Río de la Plata dynamic. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, The Hague, the Netherlands.

Martins, F., Leitao, P., Silva, A., Neves, R. (2000). 3D modelling in the Sado estuary using a new generic vertical discretization approach. *Oceanologica Acta*, 24, Supplement 1, 51-62.

Moss, R. H. and co-authors. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, vol 463.

Pawlowicz, R. Beardsley, B. Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers and Geosciences* 28, 929-937.

Pérez, J. Menéndez, M. Mendez, F. J. (2014). Evaluating the performance of CMIP3 and CMIP5 global climate models over the north-east Atlantic region. *Climate Dynamics*. 43, 2663-2680.

Pugh, D., T., (1987). Tides, Surges and Mean Sea Level. Natural Environment Research Council, Swindon, UK

Saha, S., Moorthi, S.; Pan, H.-L.; Wu, X.; Wang, J. (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin American Meteorological Society*, Vol. 91, No. 8, pp. 1015-1058.

Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, and co-autors. (2012). The NCEP climate forecast system version 2. *Journal of Climate*, 27(6), 2185–2208.

Shimura, T., Mori, N., Hemer, M.A. (2016). Projection of tropical cyclone-generated extreme wave climate based on CMIP5 multi-model ensemble in the Western North Pacific. *Climate Dynamics*.

Slangen, A.B.A, Carson, M., Katskman, C.A., van de Wal R.S.W., Kohl, A., Vermeersen, L.L.A., Stammer, D. (2014). Projecting twenty-first century regional sea-level changes. *Climate Change*. 124, 317-332.

Semedo, A., Dobrynin, M. Lemos, G. Beherens, A. Staneva, J. de Vries, H. Sterl, A. Bidlot, J, Miranda, P. M. A, and Murawski, J. (2018). CMIP5- Derived Single-Forcing, Single-Model, and Single- Scenario Wind-Wave Climate Ensemble: Configuration and Performance Evaluation. *J. of Marine Science and Engineering*, 6,90.

Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of American Meteorological Society*, 93, 485-498.

Vousdoukas, M.I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., Feyen, L. (2017). Extreme sea levels on the rise along Europe’s coasts. *Earth’s Future*, 5.

Vousdoukas, M.I., Voukouvalas, E., Annunziato, A., Giardino, A., Feyen, L. (2016). Projections of extreme storm surge levels along Europe. *Climate dynamics*, 47, 3171-3190

Wandres, M., Pattiaratchi C., Hemer, M.A. (2017). Projected changes of the southwest Australian wave climate under two atmospheric greenhouse gas concentration pathways. *Ocean Modelling*, 117, 70-87.

Wang, X.L., Feng, Y., Swail, V.R. (2014). Changes in global ocean wave heights as projected using multimodel CMIP5 simulations. *Geophysical Research Letters*, 41, 1026-1034.

Wilks, D. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences*.

Willet, P. (1996). Molecular diversity techniques for chemical databases. *Information Research* 2 (No. 3). Disponible en: <http://informationr.net/ir/2-3/paper19.html>.

