

PROGRAMA EUROCLIMA

Informe de entrega de productos

Producto 8: Evaluación de escenarios futuros

Nombre de la consultoría: Modelación hidrológica e hidrodinámica del río Paraná y modelo de detalle de calidad de agua en la Toma Hernández para distintos escenarios de clima futuro

Fecha: 30 de abril de 2026

País: Argentina

Producido: Instituto Nacional del Agua

Este informe se ha elaborado para el Programa
EUROCLIMA de la Unión Europea,
Se enmarca en la acción Apoyo a la *Territorialización de
la Acción Ambiental con foco en Adaptación al
Cambio Climático*, que se desarrolla dentro del proyecto
"Estudios para mejorar la gestión del agua en un
contexto de cambio climático"

AUTORIDADES del INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA

PRESIDENTE (A/C del despacho)

Lic. Bernardo Bartolomé HEREDIA

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Lic. Mercedes CURBELLO

SUBGERENTE LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Dr. Ing. Pablo Ezequiel GARCÍA

SUBGERENTE LABORATORIO DE CALIDAD DE AGUAS

Bioq. Yanina EL KASSISSE

SUBGERENTE CENTRO REGIONAL LITORAL

Ing. Jorge COLLINS

PERSONAL PARTICIPANTE EN LA REALIZACIÓN DEL SIGUIENTE TRABAJO

SUBGERENCIA LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Programa de Hidráulica Computacional

Mag. Lic. Nicolás E. ORTIZ

Dr. Ing. Pablo E. GARCIA

Ing. Martín SABAROTS GERBEC

Ing. Santiago GUIZZARDI

Mag. Ing. Martiano RE

SUBGERENCIA LABORATORIO DE CALIDAD DE AGUAS

Laboratorio Experimental de Tecnologías Sustentables

Lic. Bárbara GOMEZ

Lic. Marisol REALE

Téc. Qca. Lorena MARQUINA

Sra. Silvia MOYANO

Lic. Valeria RODRIGUEZ SALEMI

Doc. Virginia ZAPLARA

Téc. Qco. Nelson DIAZ

Lic. Carolina MUJICA

Sr. Germán LOZA

SUBGERENCIA CENTRO REGIONAL LITORAL

Lic. Esteban COLLINS

Ing. Rosana MAZZON

Sr. Guido STORANI

Ing. Jorge COLLINS

Dra. Silvia RAFAELLI

INFORME ELABORADO POR:

Ing. Santiago GUIZZARDI

Ing. Martín SABAROTS GERBEC

Dr. Ing. Lucas DOMINGUEZ

Contents

1. INTRODUCCIÓN	7
2. OBJETIVO.....	8
3. UBICACIÓN.....	8
4. MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DE ESCENARIOS FUTUROS.....	10
4.1. Resultados por toma.....	10
4.1.1. Toma Puerto Piray.....	11
4.1.2. Toma Corpus	17
4.1.3. Toma Santa Ana	20
4.1.4. Toma Candelaria - Posadas	23
4.1.5. Toma Ituzaingó	23
4.1.6. Toma Itatí	26
4.1.7. Toma Paso de la Patria.....	29
4.1.8. Toma Corrientes.....	32
4.1.9. Toma Goya	36
4.1.10. Toma Reconquista	39
4.1.11. Toma Esquina.....	42
4.1.12. Toma San Javier.....	45
4.1.13. Toma Santa Fe.....	47
4.1.14. Toma Paraná	50
4.1.15. Toma Desvío Arijón	54

4.1.16.	Toma Coronda.....	57
4.1.17.	Toma Monje.....	60
4.1.18.	Toma Rosario - Granadero Baigorria	63
4.1.19.	Toma Victoria	66
4.1.20.	Toma San Nicolás.....	69
4.1.21.	Toma Escobar.....	72
4.2.	Resumen de resultados	75
5.	ACLARACIÓN	80
6.	CONCLUSIONES.....	82
7.	REFERENCIAS	85
8.	ANEXO.....	86

1. INTRODUCCIÓN

El presente informe corresponde al Producto 8 de la consultoría “Modelización Hidrológica e Hidrodinámica del Río Paraná y Modelo de Detalle de Calidad de Agua en la Toma Hernández para distintos Escenarios del Clima Futuro”, financiada por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y coordinada por la Universidad Nacional de Quilmes.

Frente a los desafíos que plantea la creciente variabilidad hidrológica y climática sobre los sistemas de abastecimiento, resulta clave contar con información detallada sobre las condiciones actuales y proyectadas de la calidad del agua. En ese sentido, este componente integra tareas de relevamiento hidrométrico, muestreo intensivo, modelación ambiental y relevamiento de empresas prestatarias a fin de anticipar escenarios de riesgo para la operación de tomas de agua potable y aportar evidencia para la planificación de medidas de adaptación.

El sistema hídrico del río Paraná constituye uno de los sistemas fluviales más complejos y extensos de América del Sur, caracterizado por una intrincada red de cauces secundarios, llanuras de inundación y áreas de humedales que interactúan de manera dinámica con el cauce principal. La comprensión y modelación de su comportamiento hidráulico representa un desafío técnico de considerable magnitud, tanto por la escala espacial involucrada como por la complejidad de los intercambios entre el sistema principal y su planicie aluvial.

En este contexto, el presente informe resume el procedimiento llevado a cabo para la formulación de un modelo numérico unidimensional mediante el software de cálculo HEC-RAS (Hec Ras, 2010). Esta herramienta, ampliamente utilizada a nivel

internacional para la simulación hidráulica en ríos y sistemas fluviales, permite representar el comportamiento del flujo en régimen permanente y no permanente, constituyendo una solución adecuada para el tipo de sistema analizado.

2. OBJETIVO

- Analizar los caudales y niveles del río en diferentes escenarios de cambio climático, especificando, por toma, posibles fallas por las anomalías de crecidas/bajantes. Evaluar la duración, frecuencia e intensidad de crecientes y bajantes del río Paraná para los cuatro escenarios de cambio climático e identificar los períodos más probables de que éstas ocurran.

Este informe presenta los resultados finales de la evaluación de los escenarios futuros en los modelos hidrodinámicos presentados en el Producto 6 (Modelación hidrodinámica), los cuales son forzados con las series de caudales de escenarios futuros obtenidos en el Producto 2 (Modelación hidrológica).

3. UBICACIÓN

El área de estudio comprende principalmente las 32 tomas relevadas sobre el río Paraná, desde Puerto Piray hasta Escobar. Sin embargo, con el objetivo de ampliar el alcance del análisis, también se incluyen otros sistemas fluviales relevantes, como el río Paraguay, que influyen en la dinámica hidrodinámica del sistema en su conjunto.

La modelación, tal como fue presentada en el Producto 6, se estructura en tres modelos acoplados que permiten representar de manera continua y consistente toda la extensión del dominio de estudio. Esta subdivisión responde a la necesidad de capturar adecuadamente las distintas escalas espaciales y condiciones hidráulicas presentes a lo largo del sistema fluvial.

La Figura 1 muestra la ubicación de las tomas consideradas junto con la red de modelación implementada, la cual ya fue presentada en informes anteriores.

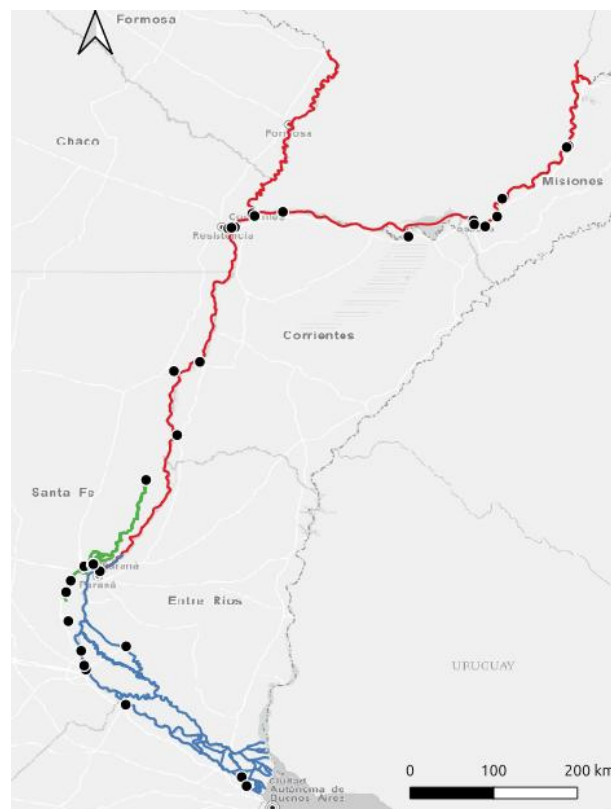


Figura 1. Ubicación del área de estudio

4. MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DE ESCENARIOS FUTUROS

4.1. Resultados por toma

A partir de los modelos implementados y presentados en el Producto 6: Modelos Hidrodinámicos, se procedió a evaluar los escenarios de cambio climático (CC), incorporando las condiciones de borde de caudal derivadas de los modelos hidrológicos desarrollados y analizados en el Producto 2: Modelos Hidrológicos.

De este modo, se obtuvieron, para cada toma, series temporales de niveles y caudales en la sección de interés, correspondientes a los tres escenarios de cambio climático (SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5), considerando los cinco modelos climáticos presentados en el Producto 2.

A continuación, se desarrollan los análisis por horizontes temporales, tomando como referencia el período histórico. Dicho período fue evaluado tanto a partir de datos observados como mediante los modelos climáticos.

Las diferencias incrementales se presentan en relación con este período base, cuya ventana temporal abarca desde 2005 hasta 2015.

4.1.1. Toma Puerto Piray

Puerto Piray constituye el punto más aguas arriba del sistema analizado y actúa como condición de ingreso principal del dominio hidrodinámico.

La Figura 2 presenta las curvas de percentiles de caudales para todos los escenarios considerados, permitiendo evaluar la variabilidad del sistema bajo distintas proyecciones climáticas y horizontes temporales. En términos generales, se observa una mayor dispersión en los caudales asociados a condiciones de crecida en comparación con las condiciones de aguas medias y de bajante, lo que indica una mayor sensibilidad del sistema ante eventos extremos de alto caudal.

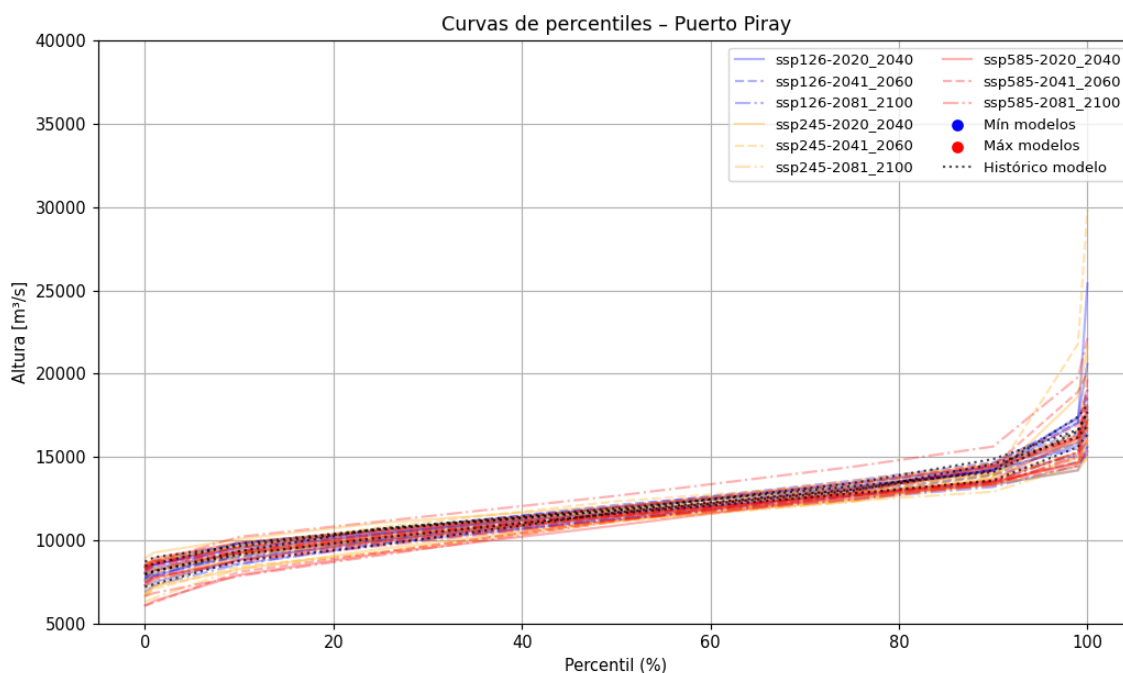


Figura 2. Curva de percentiles de Caudales - Puerto Piray

Por su parte, la Figura 3 muestra las variaciones porcentuales respecto del período histórico, expresadas como anomalías para los percentiles p01, p50 y p99. En el caso

del percentil 50 (mediana), los resultados se obtienen mediante el promedio de los cinco modelos globales considerados. Para los percentiles p01 y p99, en cambio, se utilizan las envolventes (mínimo y máximo) entre los cinco modelos, con el objetivo de capturar el rango completo de incertidumbre asociado a las proyecciones.

Este enfoque permite representar de manera más robusta la variabilidad inter-modelo y la incertidumbre estructural del sistema climático-hidrológico.

En términos generales, se observa una tendencia leve a la disminución de los caudales medios, del orden de aproximadamente 1% a 2%. Sin embargo, el análisis de extremos muestra cambios más marcados: en condiciones de bajante se alcanzan reducciones de hasta aproximadamente -15%, mientras que en condiciones de crecida se observan incrementos de hasta +25%, dependiendo del escenario y del horizonte temporal considerado.

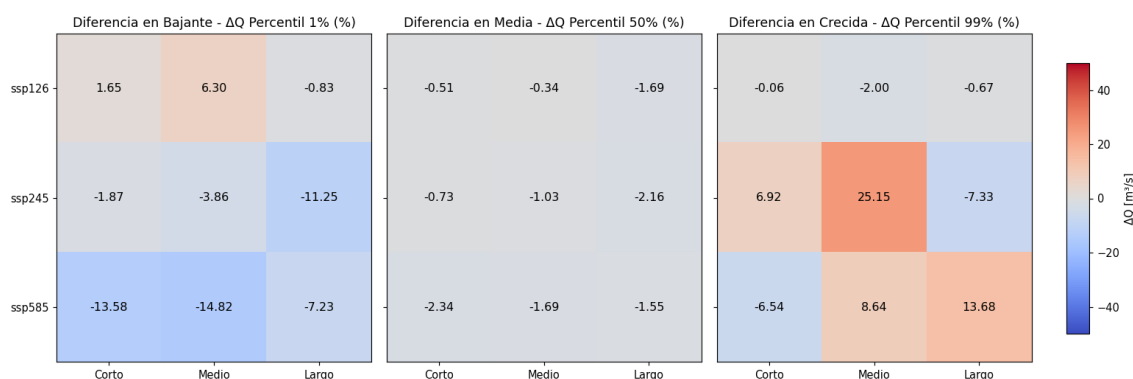


Figura 3. Anomalías de Caudales - Puerto Piray

De manera análoga, se presentan los resultados para los niveles hidrométricos. En la Figura 4 se muestran las curvas de percentiles correspondientes a todos los modelos, escenarios y horizontes temporales considerados. Estas curvas permiten

evaluar la distribución proyectada de niveles bajo distintas condiciones de forzamiento climático.

Adicionalmente, se incluye la serie de niveles observados, utilizando como referencia la estación más cercana al punto de interés, correspondiente al Puerto El Dorado. Con el fin de asegurar la consistencia en la comparación, los percentiles de los datos observados se calcularon utilizando el mismo período de referencia que el período histórico de los modelos climáticos (2005–2015).

Del análisis comparativo se observa que los extremos en la serie observada presentan valores más pronunciados que los representados por los modelos. En particular, tanto los máximos como los mínimos observados muestran una mayor amplitud, lo que sugiere que los modelos tienden a suavizar la variabilidad extrema del sistema en relación con lo registrado históricamente.

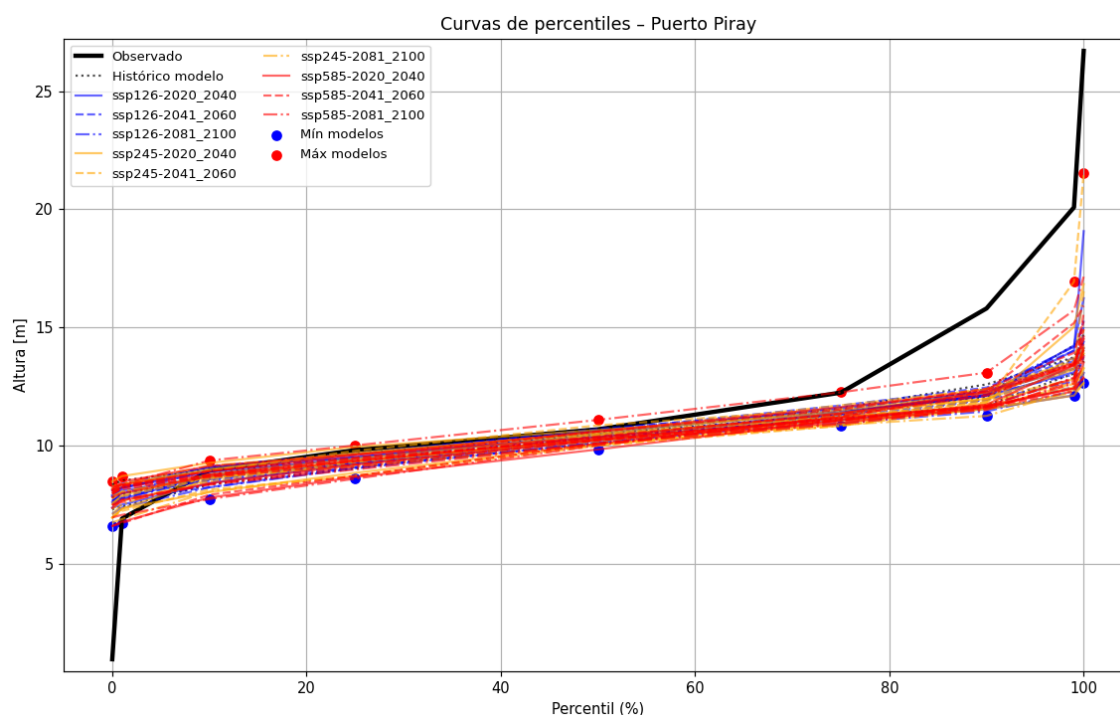


Figura 4. Curva de percentiles de Niveles - Puerto Piray

Las anomalías de niveles, presentadas en la Figura 5, muestran variaciones significativas principalmente en condiciones de crecida. Este comportamiento está asociado, en parte, al incremento proyectado en los caudales, pero también a la influencia de la topografía del sistema fluvial. En particular, en el tramo del Alto Paraná el río presenta un comportamiento más encajonado, lo que amplifica la sensibilidad de los niveles ante aumentos de caudal.

En condiciones de bajante, las mayores disminuciones de nivel se observan en el escenario más extremo, SSP5-8.5, lo que refleja la mayor severidad de las condiciones hidrológicas proyectadas bajo altos niveles de forzamiento climático.

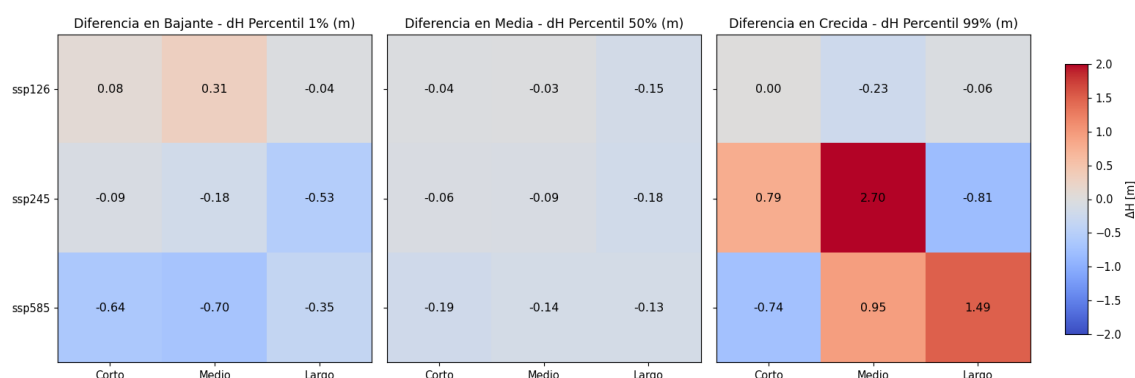


Figura 5. Anomalías de Niveles - Puerto Piray

El análisis de extremos se realiza mediante el ajuste de distribuciones de Gumbel, la cual fue la que presentó el mejor desempeño en los procesos de ajuste para los valores máximos y mínimos.

Los resultados obtenidos (Figura 6) muestran una dispersión significativa entre los distintos modelos globales considerados. En particular, se observan diferencias del orden de 2 m en el período de retorno de 20 años (Tr_{20}), tanto para condiciones de crecida como de bajante. Esta variabilidad refleja la incertidumbre asociada a la representación de los extremos hidrológicos por parte de los distintos modelos climáticos, así como su propagación a través del sistema hidrodinámico.

Gumbel - Extremos (Altura)

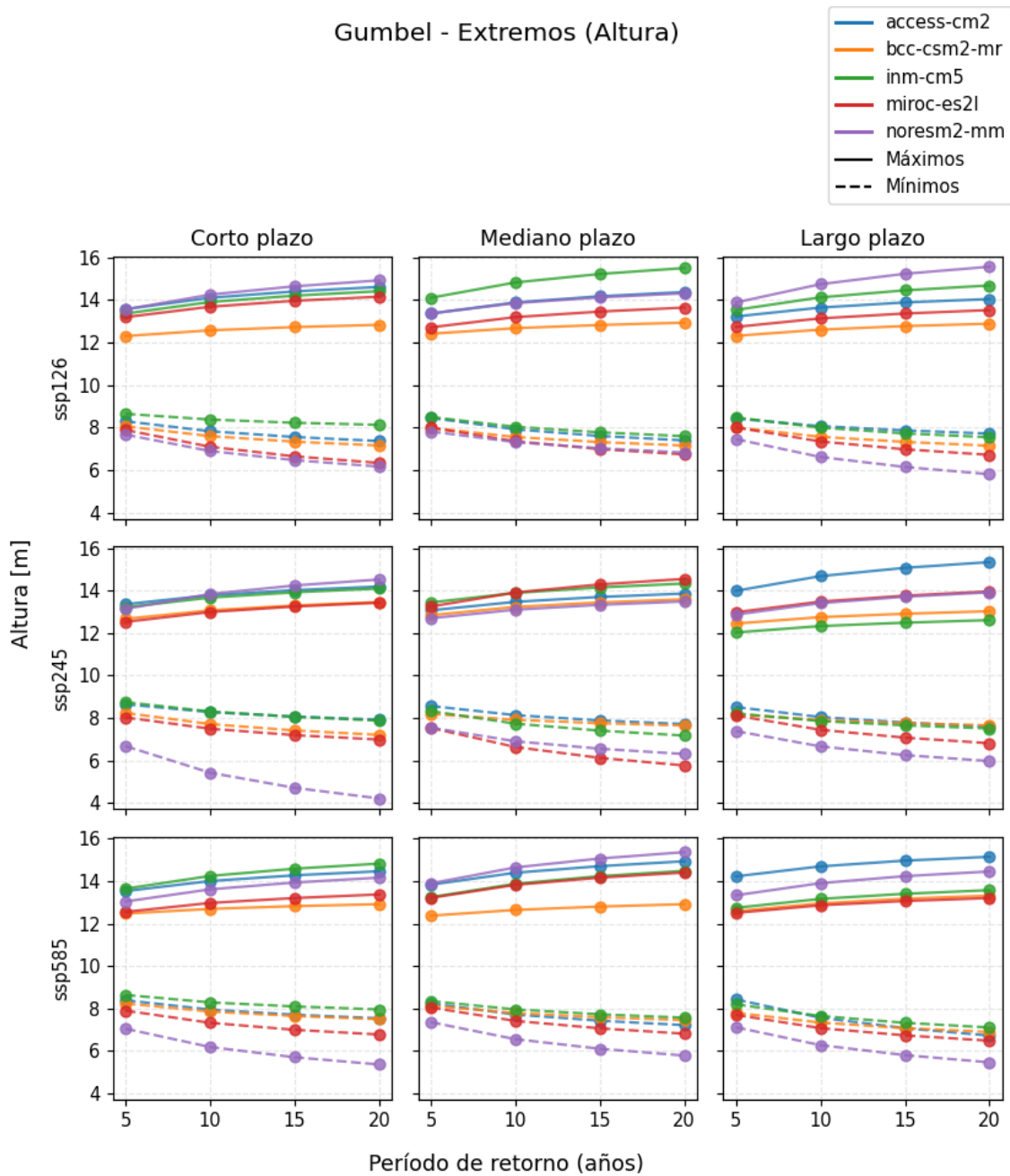


Figura 6. Ajuste de valores extremos - Puerto Piray

4.1.2. Toma Corpus

En la Toma de Corpus se presenta un análisis análogo, pero solo enfocado en niveles (Figura 7), dado que las variaciones en caudales no resultan significativas en este tramo, debido a la ausencia de aportes laterales relevantes en ruta en comparación con los caudales dominantes provenientes del río Paraná.

Se observa una menor dispersión entre los distintos modelos, particularmente en condiciones de aguas normales y de bajante. Este comportamiento se hace aún más evidente en las anomalías mostradas en la Figura 8. Esta reducción de la variabilidad se atribuye, en gran medida, al efecto regulador del embalse de Yacyretá, que amortigua parte de las fluctuaciones hidrológicas aguas abajo, como se analiza en secciones posteriores.

En relación con las observaciones (Puerto Maní), también se registran variaciones de hasta 1 m, especialmente en condiciones de crecida. Cabe destacar que los percentiles correspondientes a este período observado se calcularon a partir de datos posteriores a 2010, momento en el cual el embalse alcanzó su cota de diseño de 83 m, lo que condiciona el régimen hidrológico del tramo analizado.

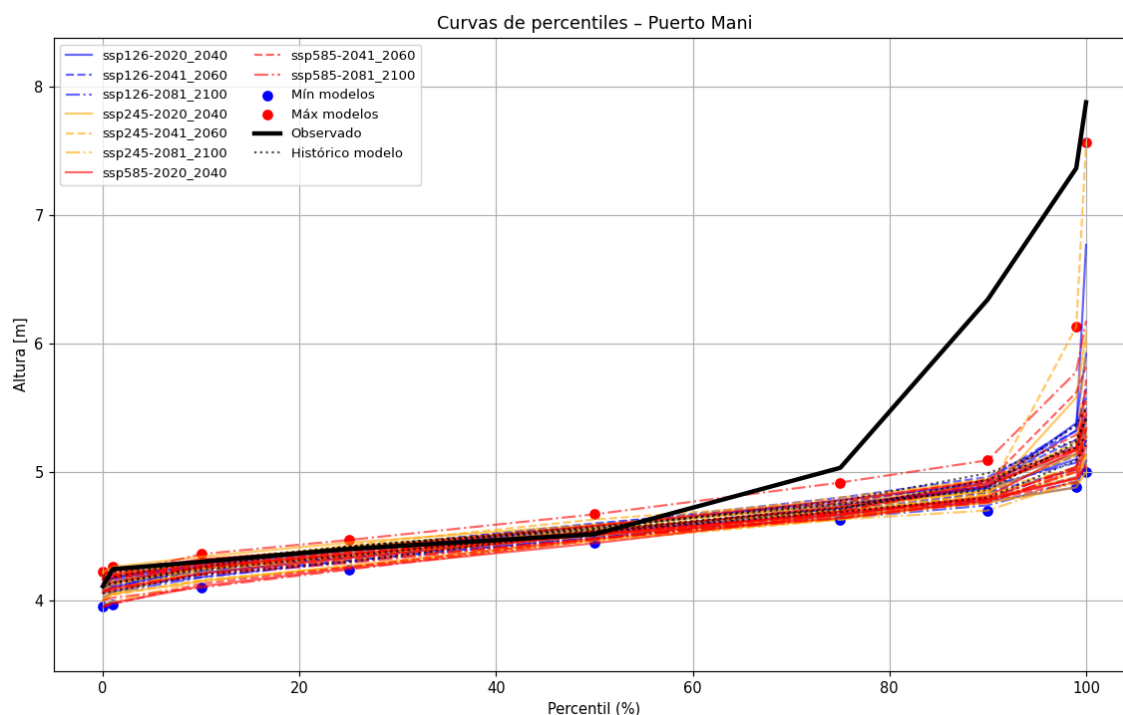


Figura 7. Curva de percentiles de Niveles - Corpus

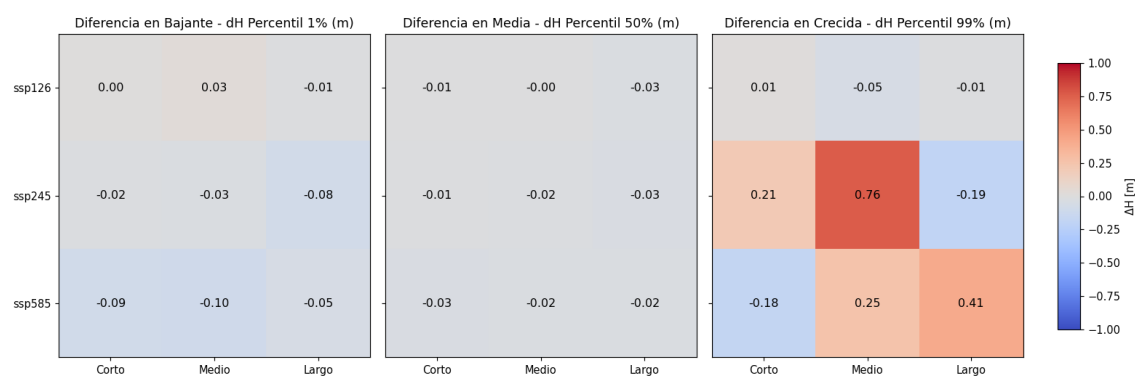


Figura 8. Anomalías de Niveles - Corpus

Un comportamiento similar se observa en el análisis de extremos, donde la variabilidad entre modelos resulta menor en comparación con otros tramos del sistema. Asimismo, se reduce la diferencia entre los valores máximos y mínimos estimados, lo que indica una mayor consistencia en la representación de los extremos hidrométricos.

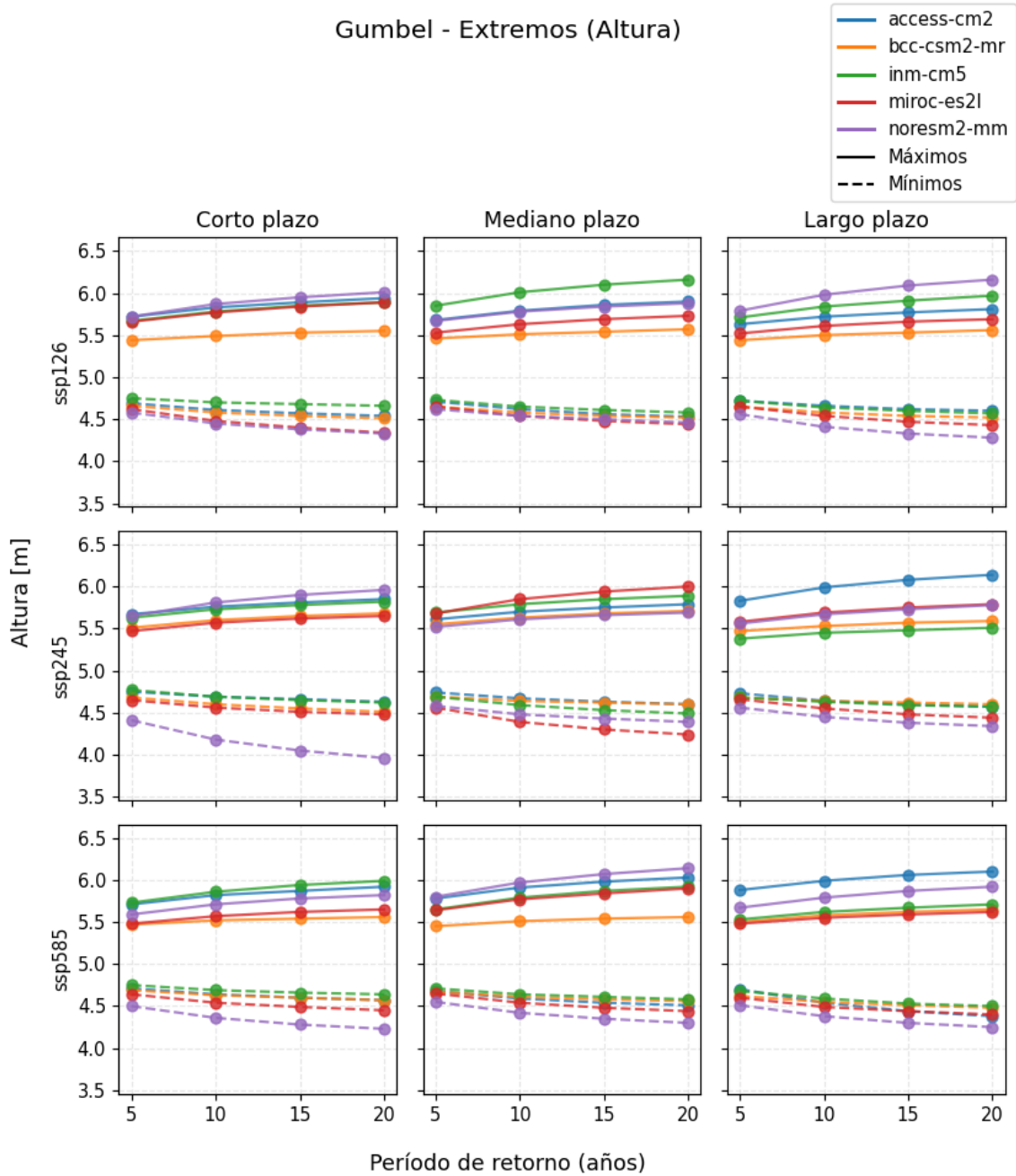


Figura 9. Ajuste de valores extremos - Corpus

4.1.3. Toma Santa Ana

En Santa Ana se repite el patrón observado en el tramo de Coronda, con una marcada baja variabilidad en condiciones de caudales bajos. Este comportamiento se asocia nuevamente al efecto de remanso generado por el embalse de Yacyretá (Figura 10), el cual actúa amortiguando las fluctuaciones hidrodinámicas en el tramo analizado.

En la comparación con las observaciones se registran diferencias del orden de 0,5 m, lo que indica una buena correspondencia general entre los niveles simulados y los observados, considerando la escala del sistema y las incertidumbres inherentes a los modelos climáticos e hidrodinámicos.

En la Figura 11, correspondiente al análisis de anomalías, se destaca un incremento de hasta aproximadamente 60 cm en algunos escenarios, principalmente en situaciones de crecida. Este incremento refleja la respuesta del sistema ante mayores aportes hidrológicos bajo condiciones de cambio climático.

En el caso del análisis de extremos (Figura 12), se observa una reducción del rango entre los valores mínimos y máximos estimados, lo que indica nuevamente una menor dispersión entre modelos en este tramo, coherente con la influencia reguladora del sistema aguas abajo.

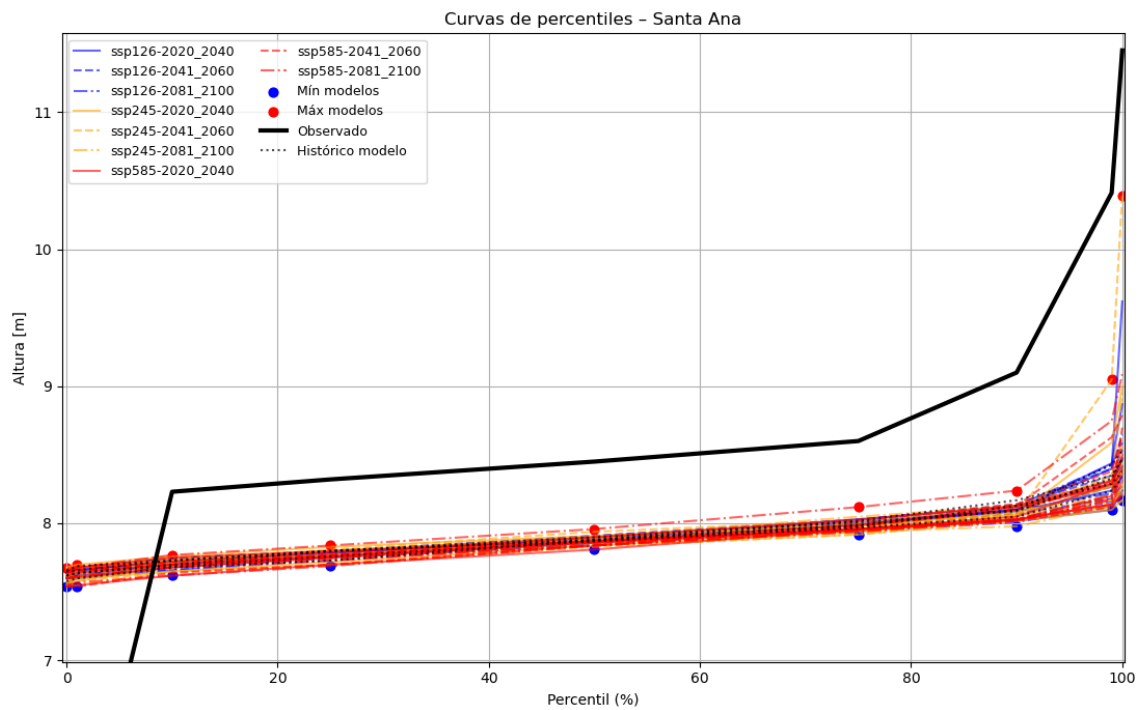


Figura 10. Curva de percentiles de Niveles - Santa Ana

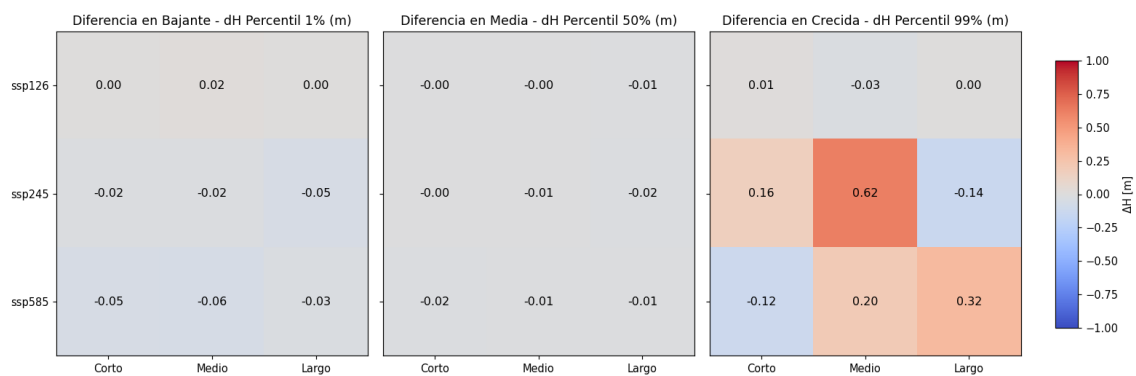


Figura 11. Anomalías de Niveles - Santa Ana

Gumbel - Extremos (Altura)

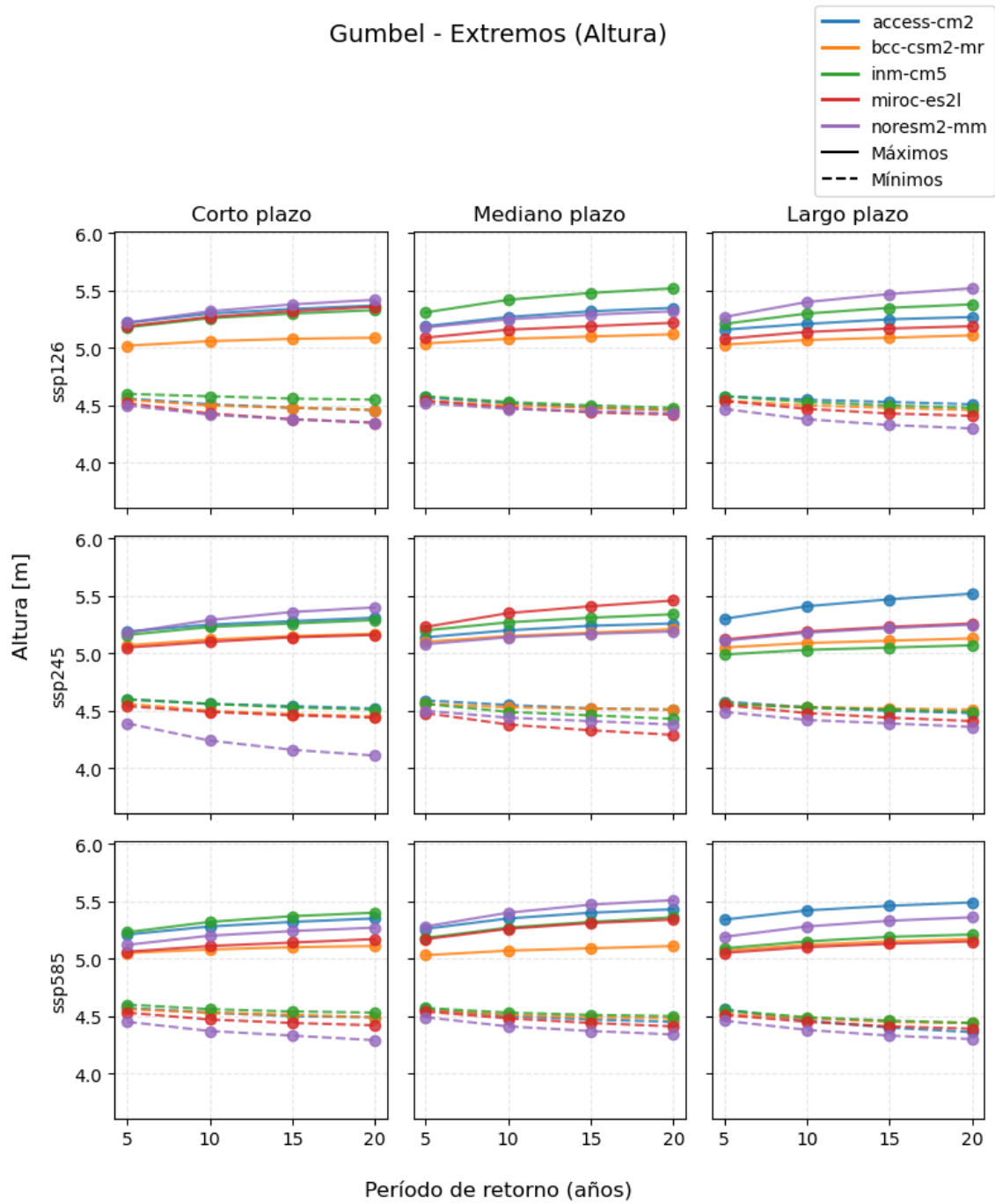


Figura 12. Ajuste de valores extremos - Santa Ana

4.1.4. Toma Candelaria - Posadas

Dado que Candelaria y Posadas se encuentran fuertemente condicionadas por el efecto de remanso generado por el embalse de Yacyretá, no se procesan resultados detallados en esta instancia. Esta condición hidráulica domina la dinámica local, reduciendo la sensibilidad del análisis a las variaciones de los forzantes climáticos considerados.

No obstante, en una instancia posterior, dentro del resumen integrador del sistema, se presentan de manera sintética las bajas variaciones en los niveles observadas en estas secciones, con el fin de mantener la consistencia global del análisis a lo largo de todo el dominio de estudio.

4.1.5. Toma Ituzaingó

Aguas abajo del embalse de Yacyretá, en la toma de Ituzaingó, se recupera la variabilidad en los niveles hidrométricos. Esto se debe a que la regulación ejercida por Yacyretá condiciona fuertemente los niveles aguas arriba, mientras que en este tramo, al tratarse de una sección de paso, los caudales entrantes resultan similares a los caudales erogados.

La Figura 13 presenta las curvas de percentiles, donde se observa una buena compatibilidad con las observaciones, al menos hasta el percentil 90, lo que indica una adecuada representación de la distribución de niveles en la mayor parte del rango de variación.

En cuanto al análisis de anomalías extremas (Figura 14), se registran variaciones del orden de -0,25 m en condiciones de bajante y de hasta +0,5 m en situaciones de crecida, lo que refleja una respuesta más marcada del sistema frente a eventos

extremos, en comparación con los tramos influenciados directamente por el embalse.

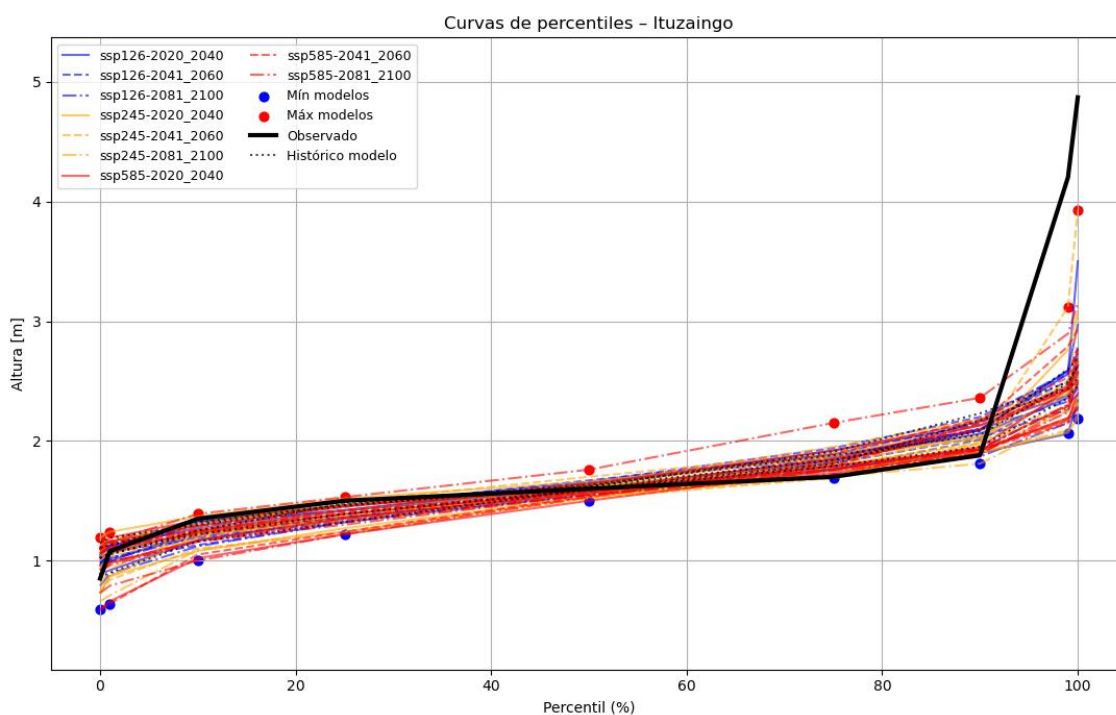


Figura 13. Curva de percentiles de Niveles - Ituzaingó

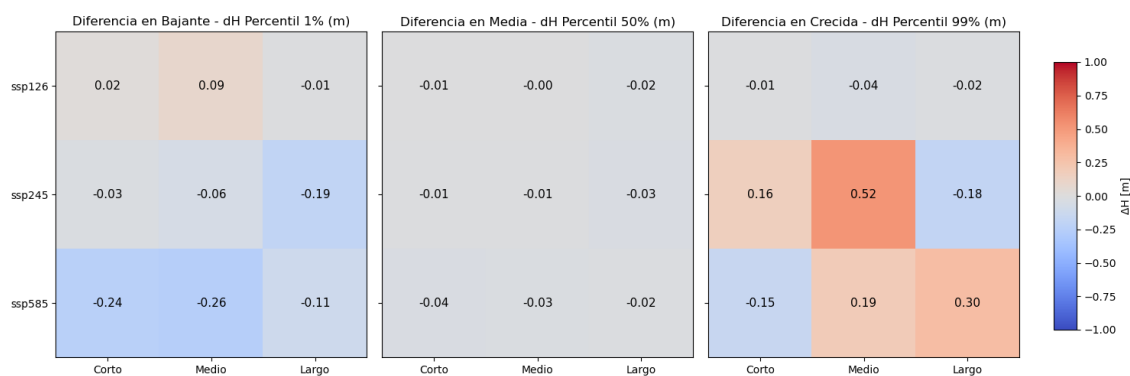


Figura 14. Anomalías de Niveles - Ituzaingó

En relación con los valores extremos, se observa que la dispersión de resultados entre los distintos modelos se mantiene acotada dentro de un rango inferior a 1 m. Sin

embargo, en la mayoría de los casos analizados, esta variabilidad resulta aún menor, lo que indica una mayor consistencia entre las proyecciones de los diferentes modelos climáticos en la representación de los eventos extremos.

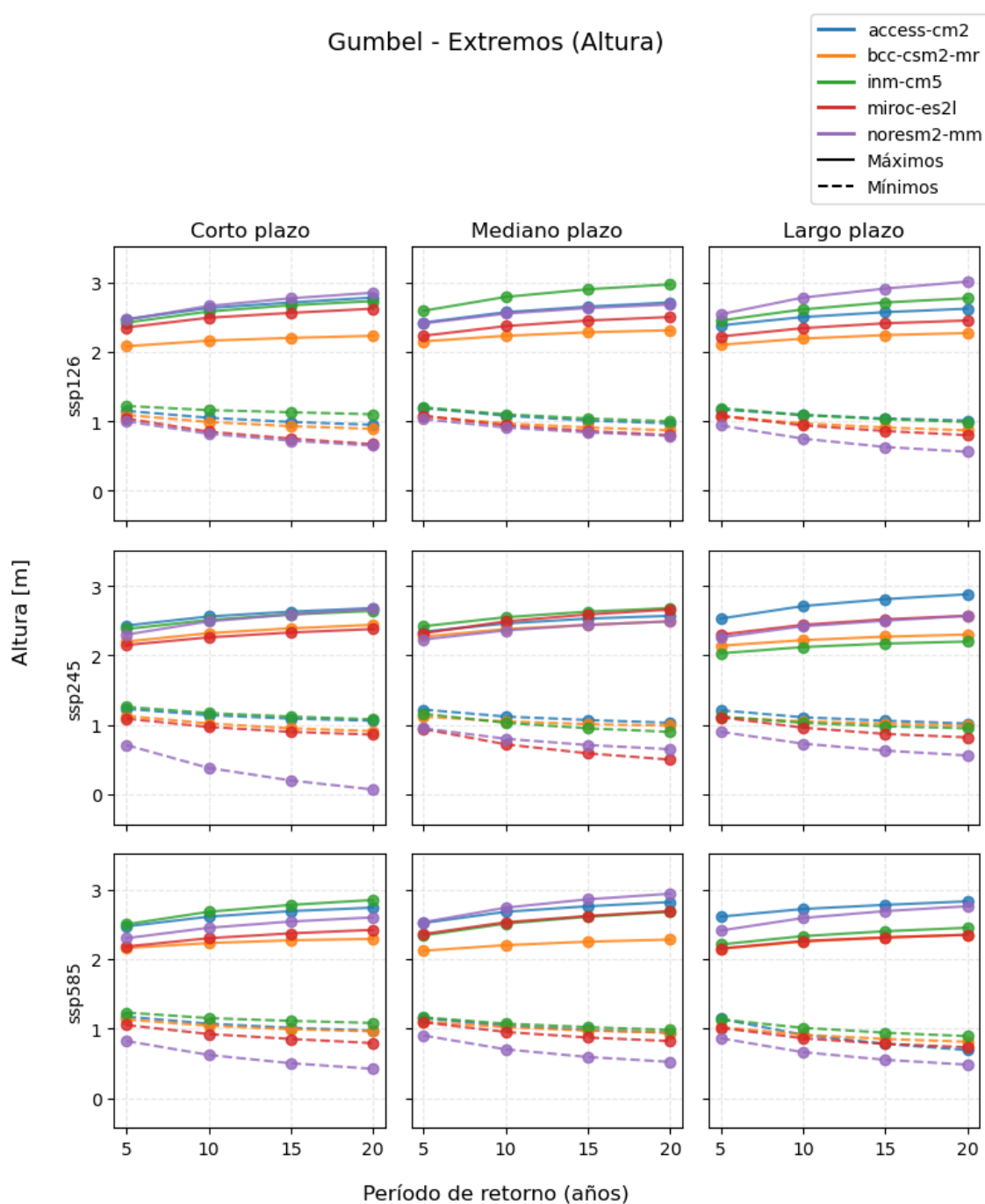


Figura 15. Ajuste de valores extremos - Itzaingó

4.1.6. Toma Itatí

En el caso de Itatí se observan (Figura 16) variaciones entre modelos del orden de 1 m en condiciones de bajante, y de hasta 4 m en situaciones de crecida. Este comportamiento se refleja también en la Figura 17, donde las anomalías extremas alcanzan valores comprendidos entre -0,3 m y +1,3 m.

Estas mayores diferencias pueden explicarse por las características geomorfológicas del tramo, ya que la sección de Itatí corresponde a un estrechamiento del valle aluvial del río Paraná. Esta condición genera una mayor sensibilidad del nivel del agua ante variaciones en el caudal, amplificando las diferencias entre modelos.

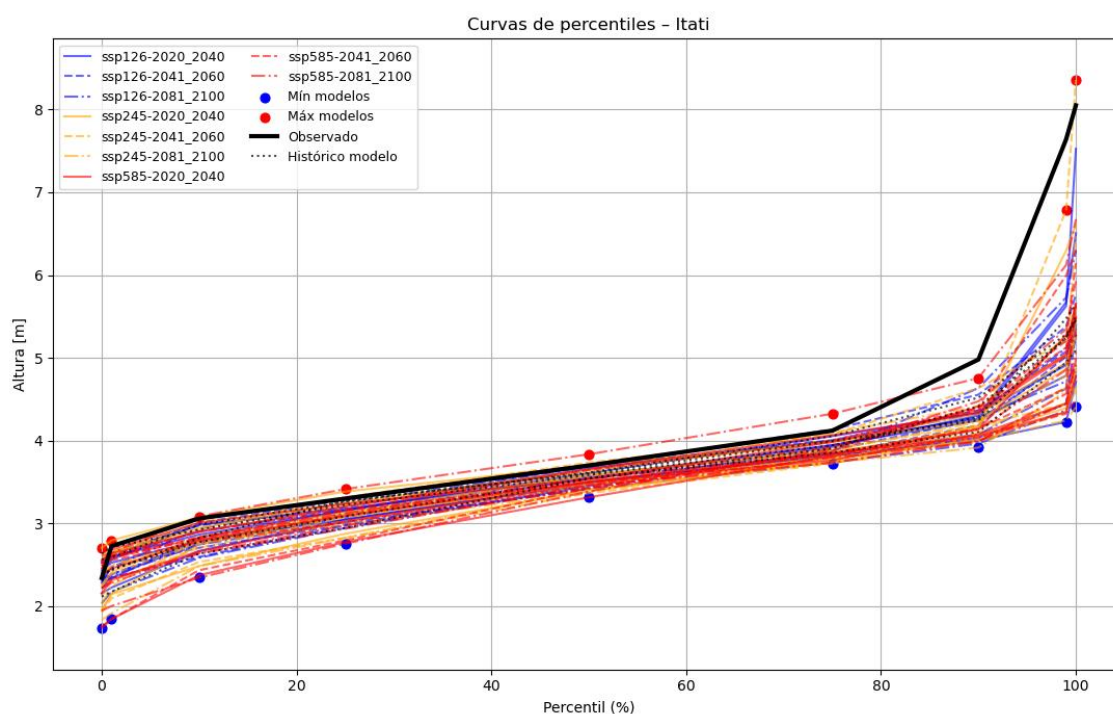


Figura 16. Curva de percentiles de Niveles - Itatí

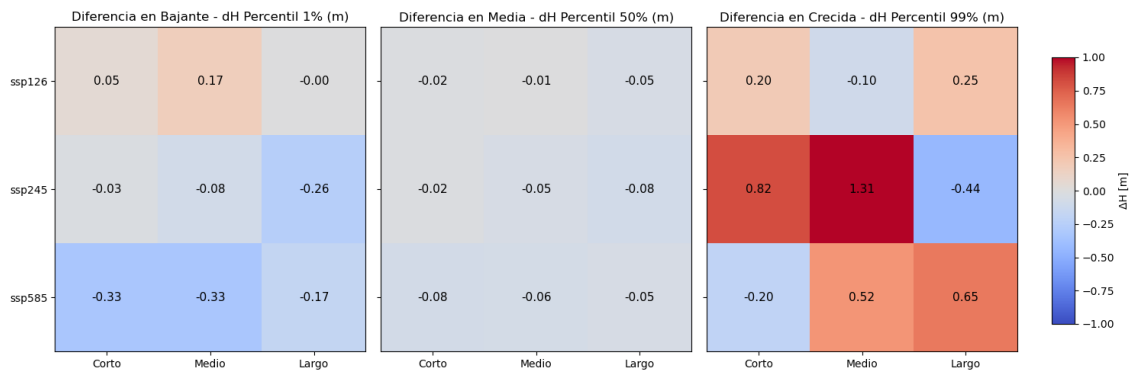


Figura 17. Anomalías de Niveles - Itatí

Asimismo, los resultados de extremos presentados en la Figura 18 evidencian un incremento del rango de variación de niveles extremos, así como una mayor dispersión entre los distintos modelos. En este caso, dichas diferencias superan el rango de 1 m, reflejando una mayor incertidumbre en la representación de eventos extremos en esta sección del sistema.

Gumbel - Extremos (Altura)

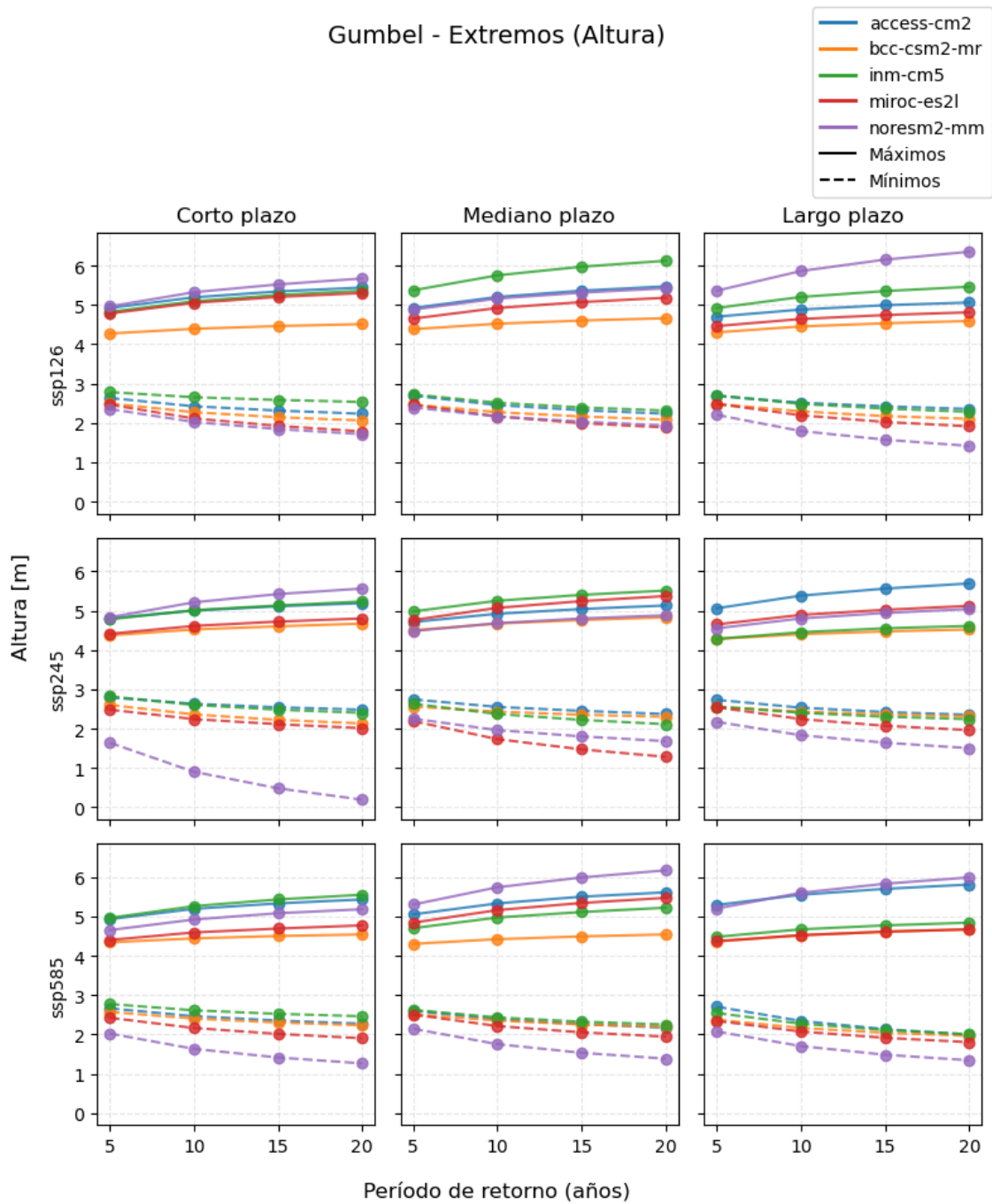


Figura 18. Ajuste de valores extremos - Itatí

4.1.7. Toma Paso de la Patria

En el caso de La Patria se observa un incremento en la variación de las diferencias entre percentiles extremos (Figura 19). A pesar de ello, se aprecia un buen acuerdo general con las observaciones, lo que indica una adecuada representación del régimen hidrométrico en este tramo.

En la Figura 20, correspondiente al análisis de anomalías, se destaca que las anomalías en condiciones de crecida disminuyen en comparación con Itatí, alcanzando valores del orden de +1 m. Este comportamiento se asocia a que se trata de una sección más abierta dentro de la planicie de inundación, lo que atenúa la respuesta del nivel frente a incrementos de caudal. Sin embargo, en contraposición, y debido tanto a la influencia de condiciones aguas abajo como a las características propias del tramo, se observan también anomalías mínimas más acentuadas, que alcanzan valores cercanos a -0,85 m.

De manera consistente, el análisis de valores extremos (Figura 21) refleja una mayor variabilidad entre modelos en el caso de los mínimos, evidenciando una mayor incertidumbre en la representación de condiciones de bajante en esta sección del sistema.

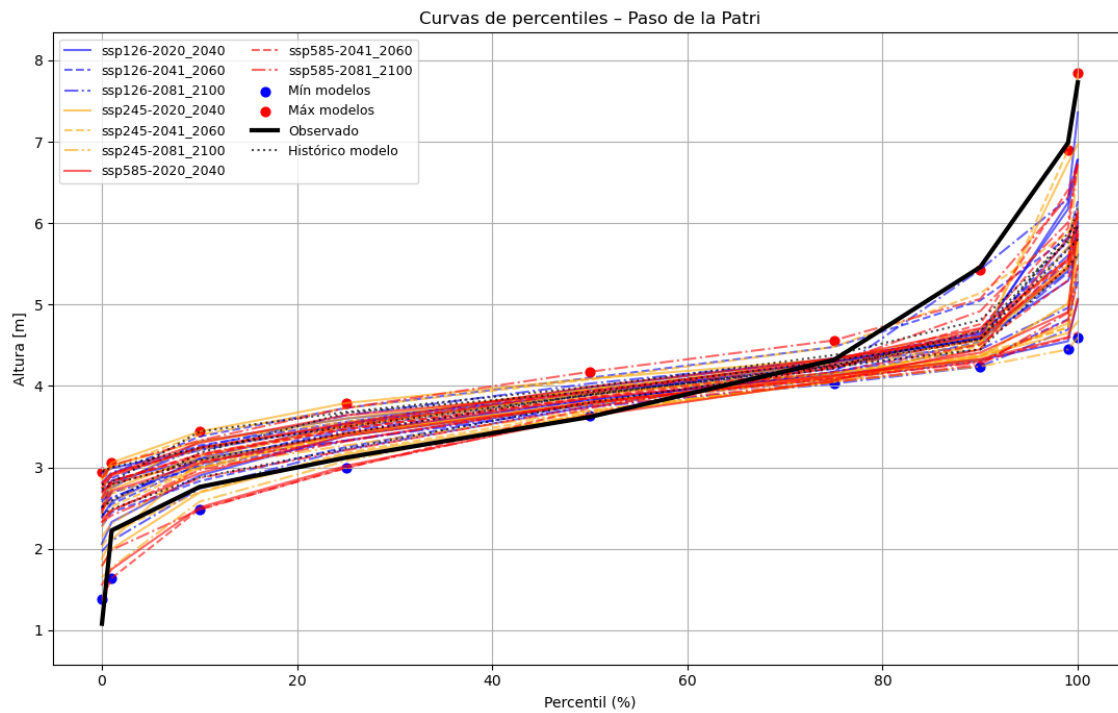


Figura 19. Curva de percentiles de Niveles - Paso de la Patria

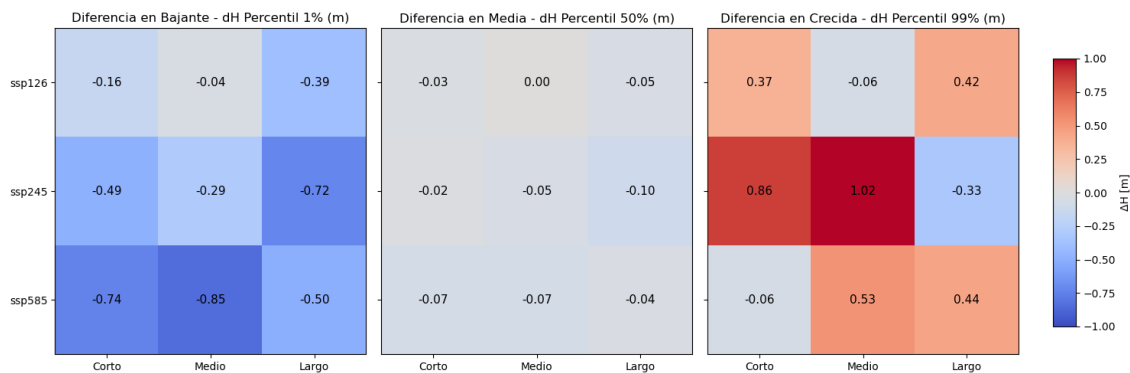


Figura 20. Anomalías de Niveles - Paso de la Patria

Gumbel - Extremos (Altura)

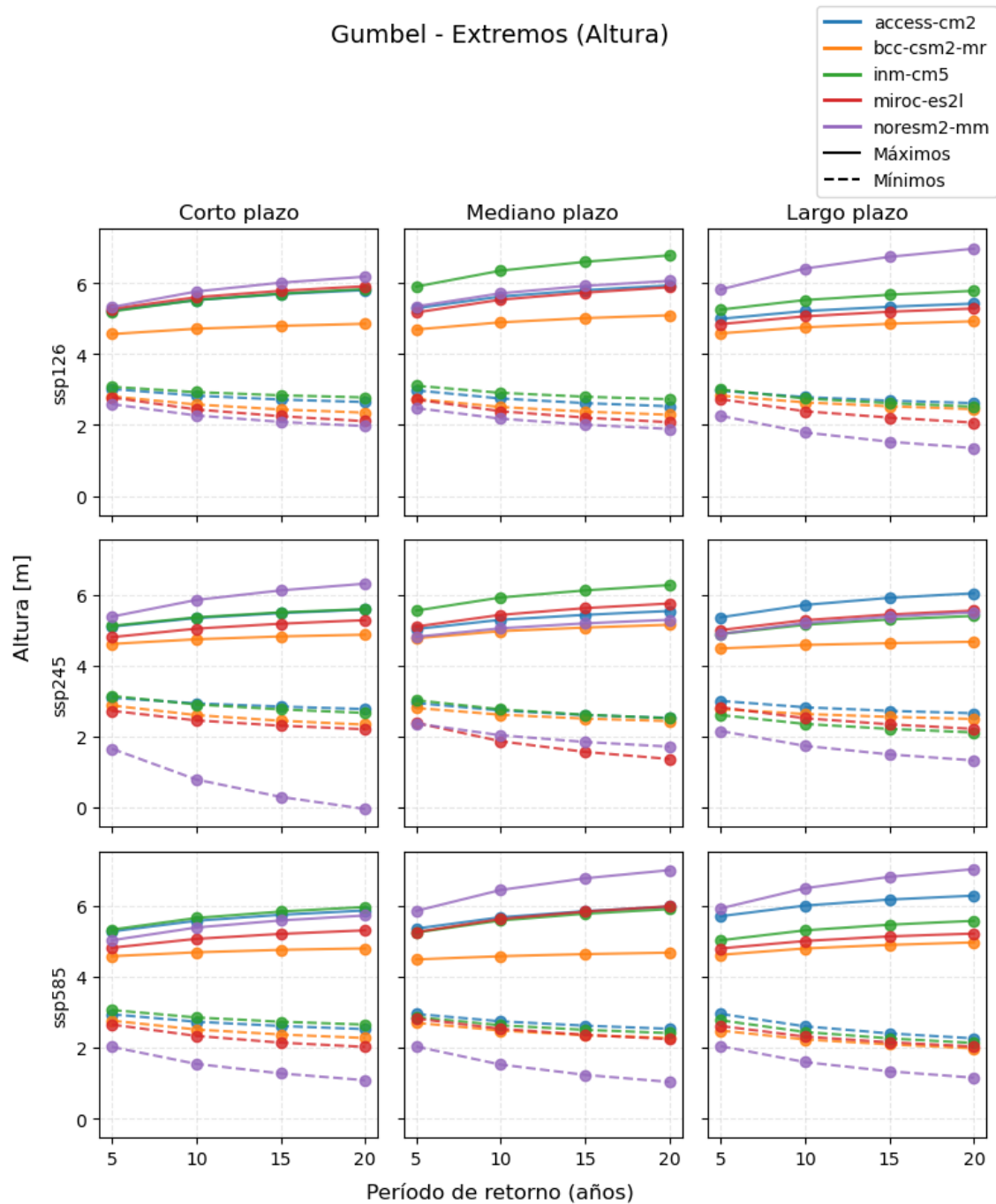


Figura 21. Ajuste de valores extremos - Paso de la Patria

4.1.8. Toma Corrientes

En Corrientes ya se considera el ingreso del río Paraguay, y se presentan las curvas de distribución de caudales en términos de percentiles en la Figura 22. En este punto se destaca que, si bien los modelos climáticos inducen una mayor variabilidad, el sistema también incrementa su dispersión debido a la incorporación de aportes provenientes de otras cuencas, como el Pilcomayo, el Paraguay y el Bermejo, lo que amplifica la variabilidad hidrológica total del sistema.

Este comportamiento se observa con mayor claridad en la Figura 23, correspondiente a las anomalías. En este caso, las condiciones de crecida alcanzan incrementos cercanos al +30%, mientras que en situaciones de bajante se registran reducciones del orden de -20%. Al comparar estos resultados con los obtenidos en el Alto Paraná, se evidencia un incremento aproximado del 5% en la magnitud de ambos extremos, lo que refleja la influencia acumulativa de los aportes de cuenca aguas arriba en esta sección del sistema.

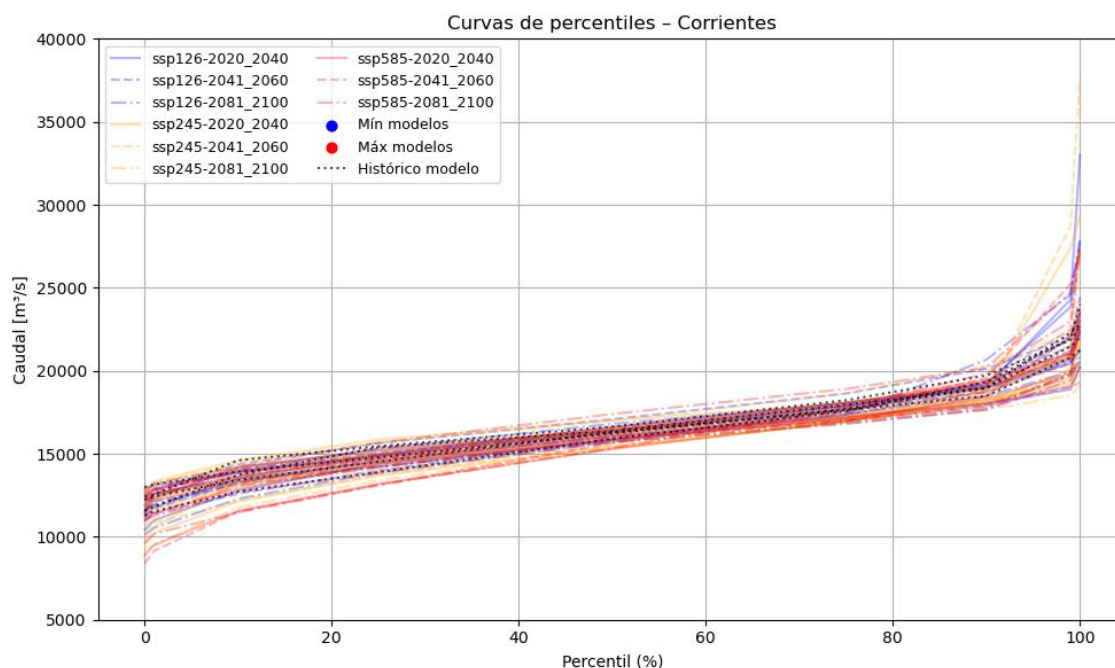


Figura 22. Curva de percentiles de Caudales - Corrientes

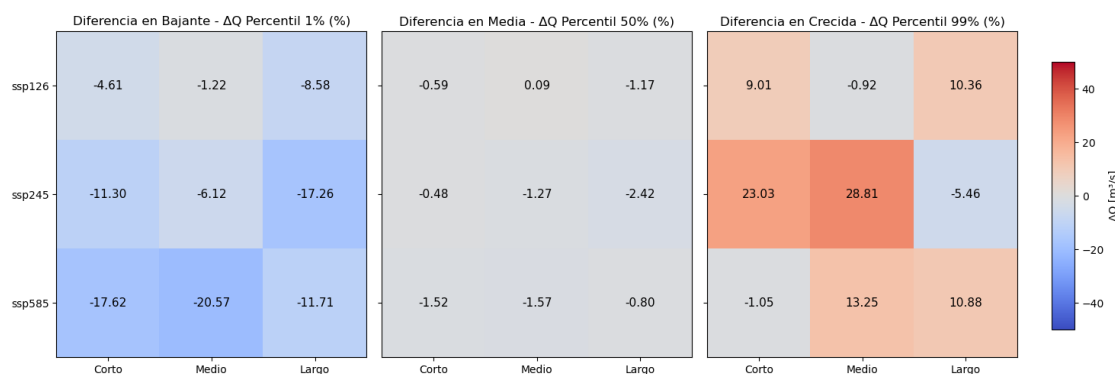


Figura 23. Anomalías de Caudales - Corrientes

Los niveles reflejan también esta mayor variabilidad (Figura 24). En primer lugar, en la curva de percentiles de niveles se observa un buen acuerdo general con los valores observados, lo que indica una adecuada representación del régimen hidrométrico en este tramo. Sin embargo, para percentiles superiores al 75%, comienzan a evidenciarse diferencias respecto de las observaciones, del orden de hasta aproximadamente 1 m.

Por otra parte, la Figura 25, correspondiente al análisis de anomalías, muestra rangos similares a los obtenidos en Paso de la Patria, con escenarios que alcanzan variaciones de aproximadamente -85 cm en condiciones de bajante y hasta +1 m en situaciones de crecida, respecto de la condición de referencia.

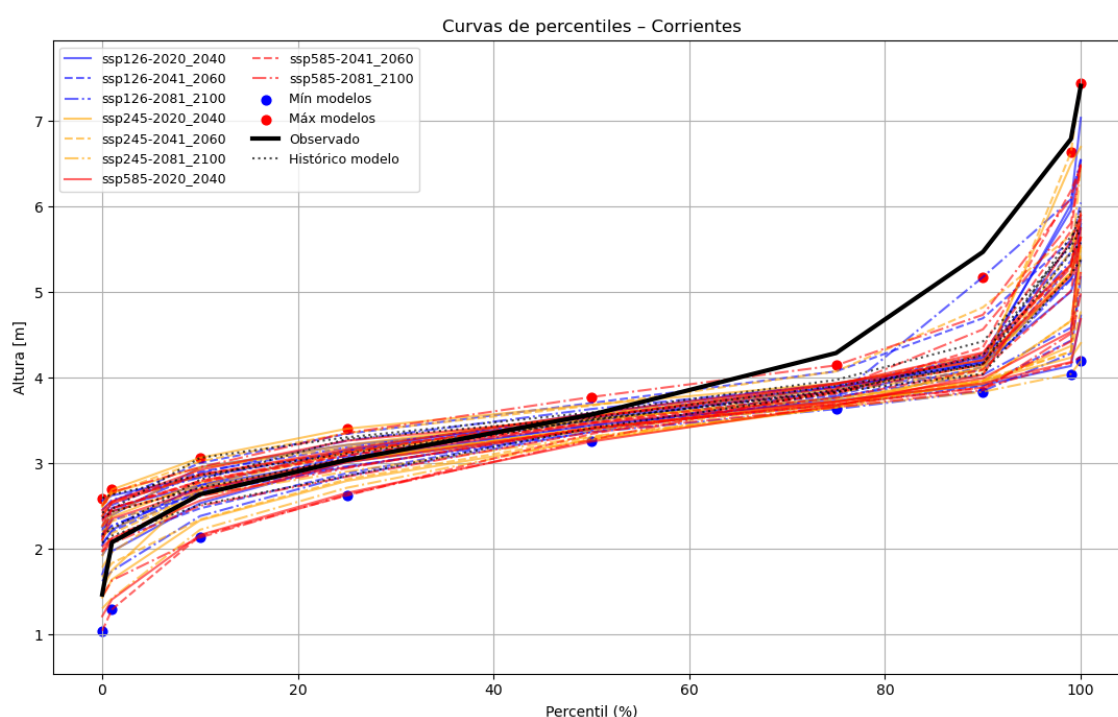


Figura 24. Curva de percentiles de Niveles - Corrientes

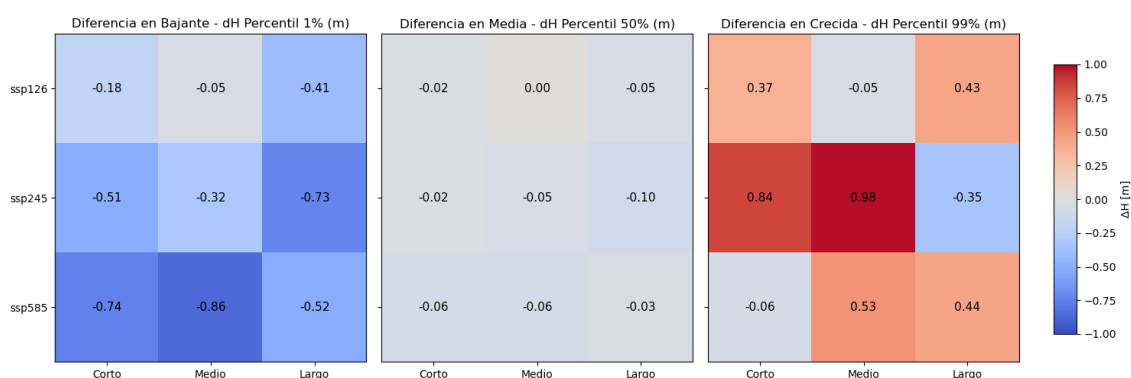


Figura 25. Anomalías de Niveles - Corrientes

Finalmente, la figura de valores extremos (Figura 26) evidencia la consistencia de los resultados previamente descritos, tanto en términos de la magnitud de las variaciones como de la dispersión entre escenarios y modelos.

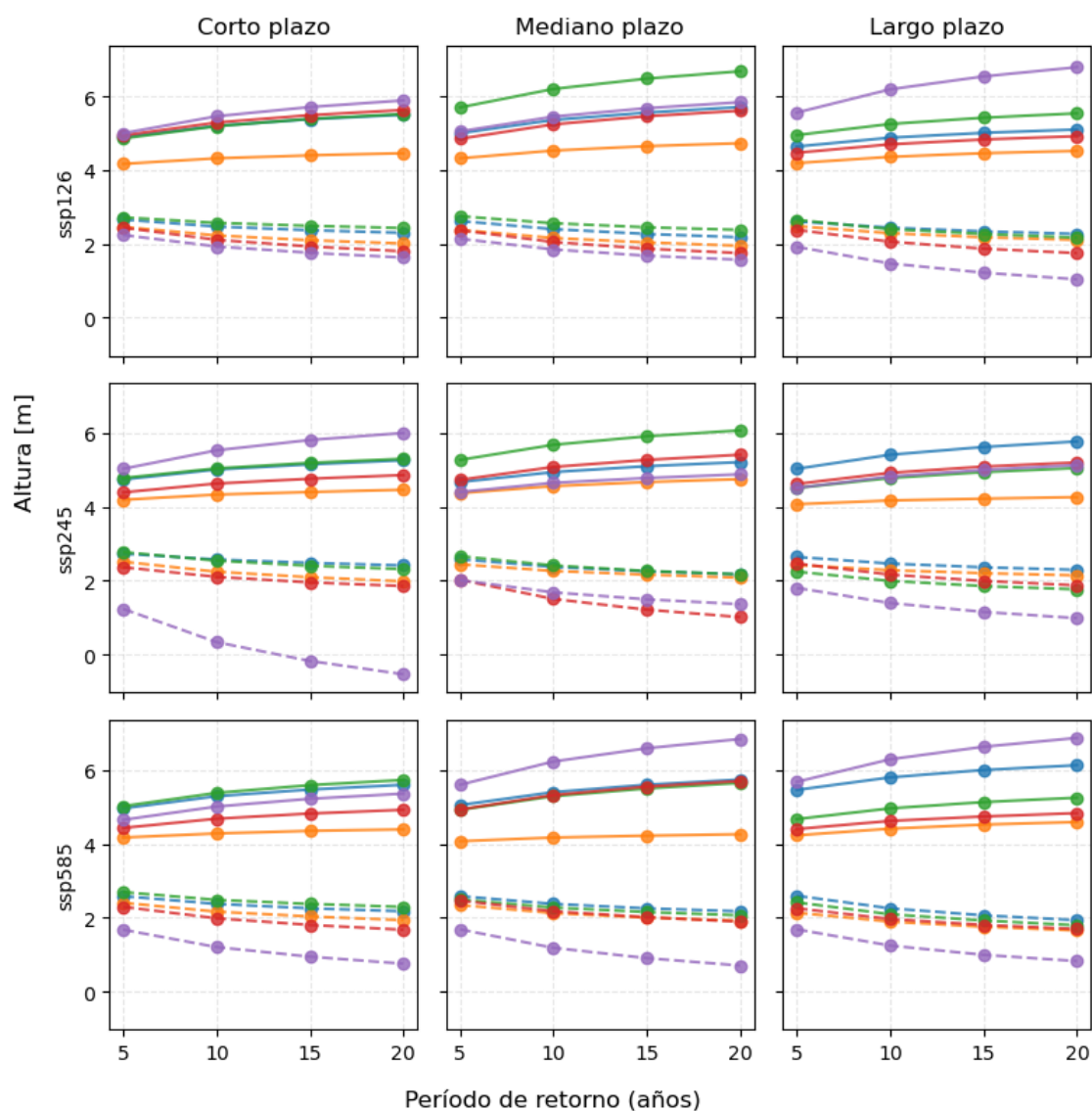


Figura 26. Ajuste de valores extremos - Corrientes

4.1.9. Toma Goya

En la toma de Goya se observa una discrepancia de aproximadamente 70 cm respecto de los valores observados (Figura 27). Esta diferencia se mantiene dentro de un rango razonable considerando la escala del sistema y las incertidumbres asociadas a la representación hidrodinámica y climática.

En cuanto a la variabilidad entre los distintos modelos, se mantiene la tendencia general observada en secciones previas (Figura 28), con anomalías extremas que alcanzan aproximadamente -0,8 m y +0,9 m. No obstante, se aprecia una ligera reducción del rango de variación, lo que sugiere una mayor convergencia entre modelos en esta sección del sistema.

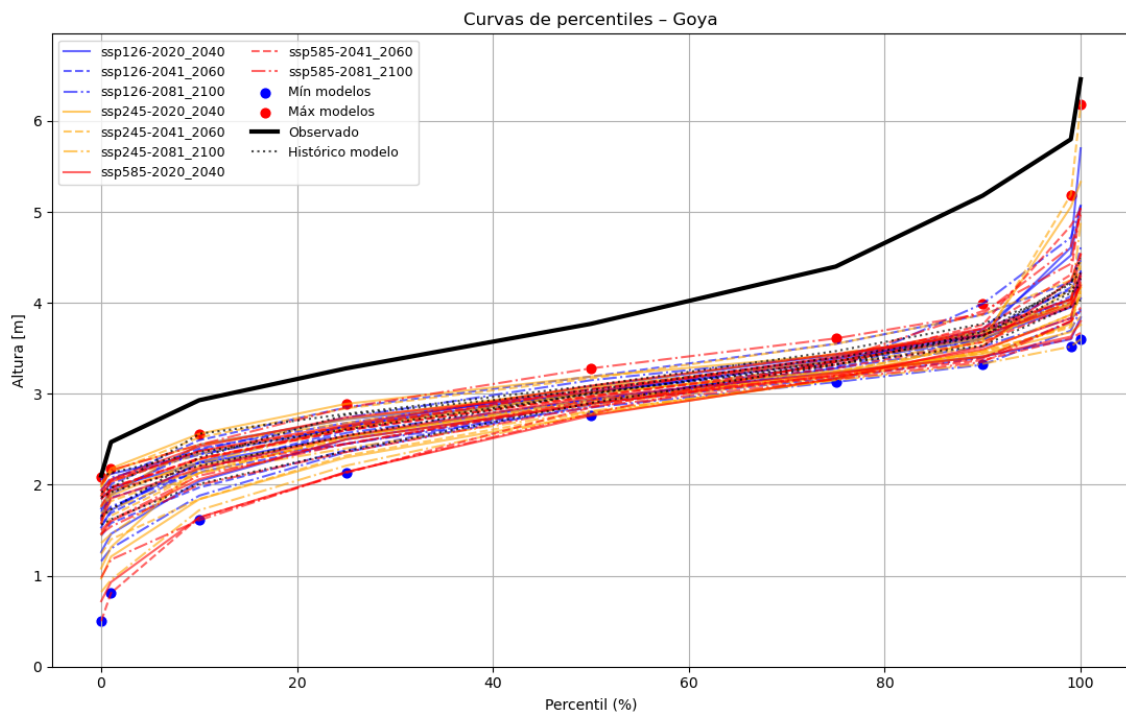


Figura 27. Curva de percentiles de Niveles - Goya

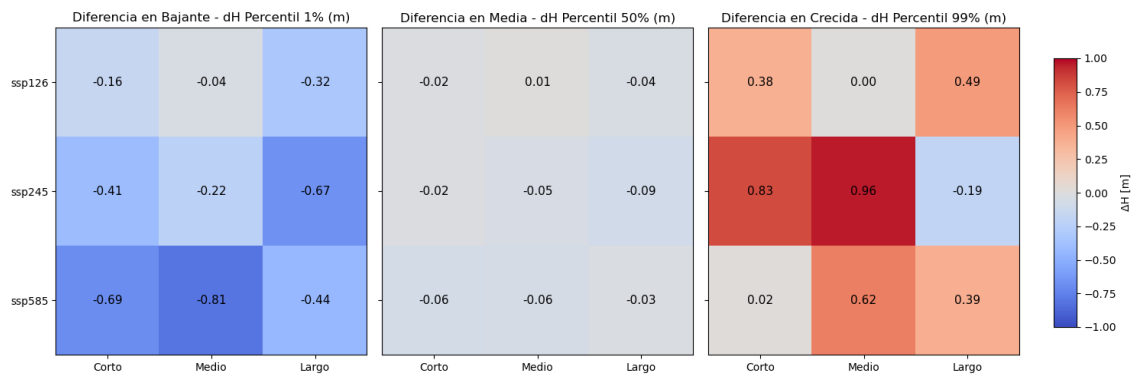


Figura 28. Anomalías de Niveles - Goya

Gumbel - Extremos (Altura)

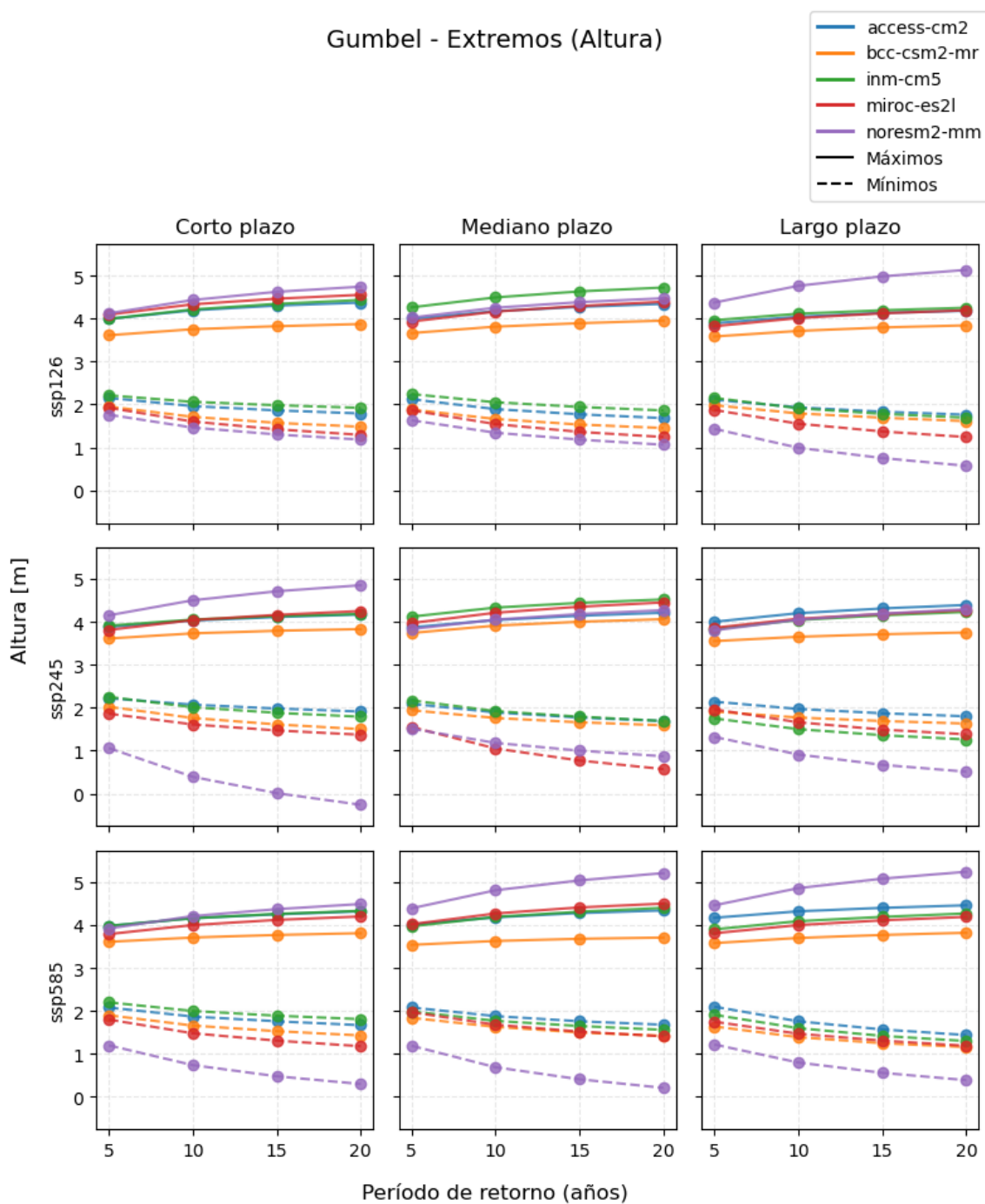


Figura 29. Ajuste de valores extremos - Goya

4.1.10. Toma Reconquista

La cercanía entre Goya y Reconquista se pone de manifiesto en la similitud de los resultados obtenidos para ambas secciones. Sin embargo, en el caso de Reconquista se observa un mejor acuerdo general respecto de los valores observados (Figura 30), lo que sugiere una representación ligeramente más ajustada del comportamiento hidrométrico en este punto del sistema.

En cuanto a las anomalías extremas, estas se encuentran en el orden de -0,85 m a -0,9 m, evidenciando una respuesta consistente del sistema en condiciones de bajante, con variaciones comparables a las observadas en tramos vecinos del río.

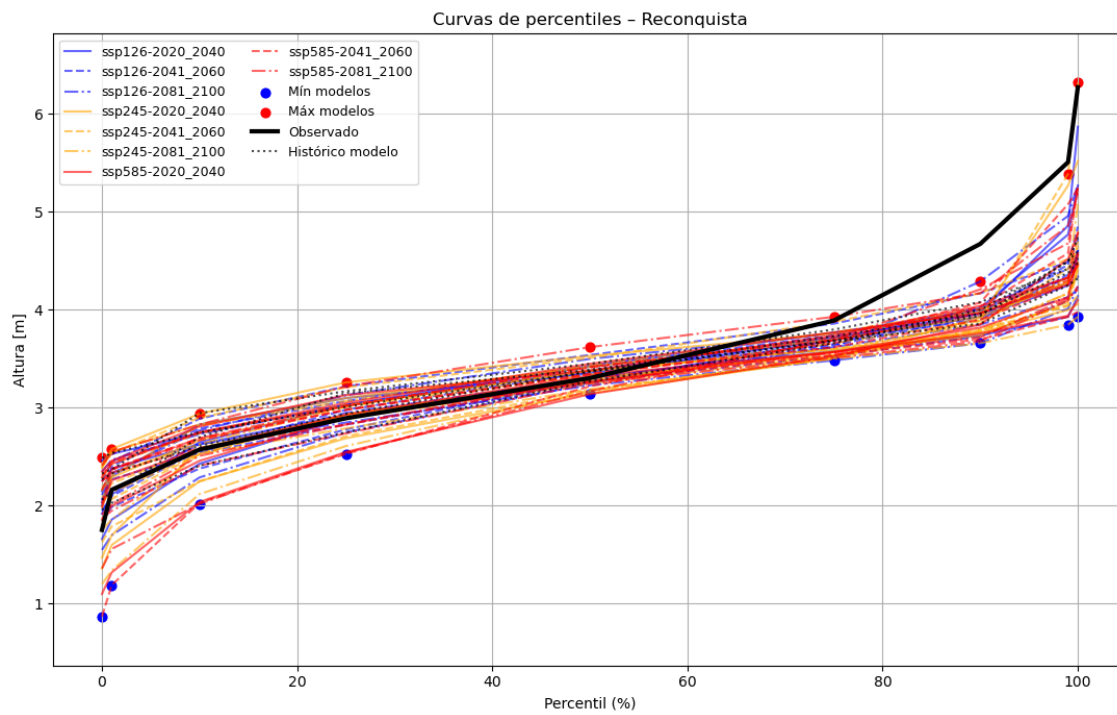


Figura 30. Curva de percentiles de Niveles - Reconquista

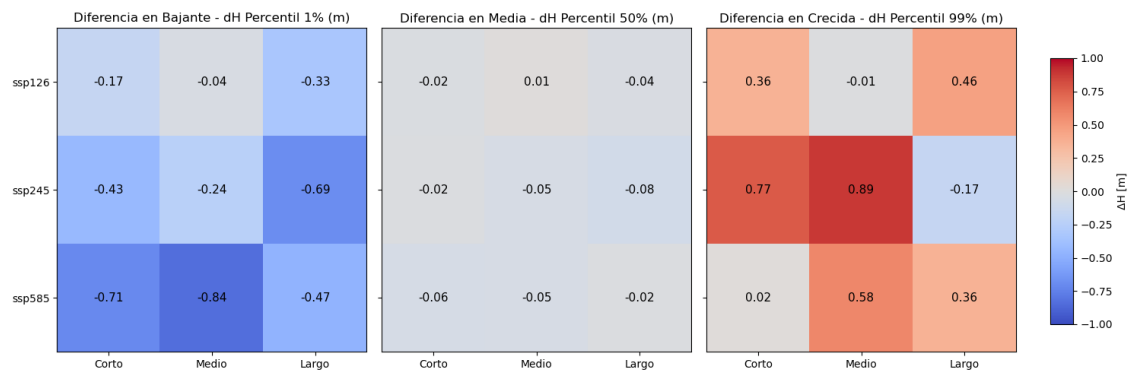


Figura 31. Anomalías de Niveles - Reconquista

Gumbel - Extremos (Altura)

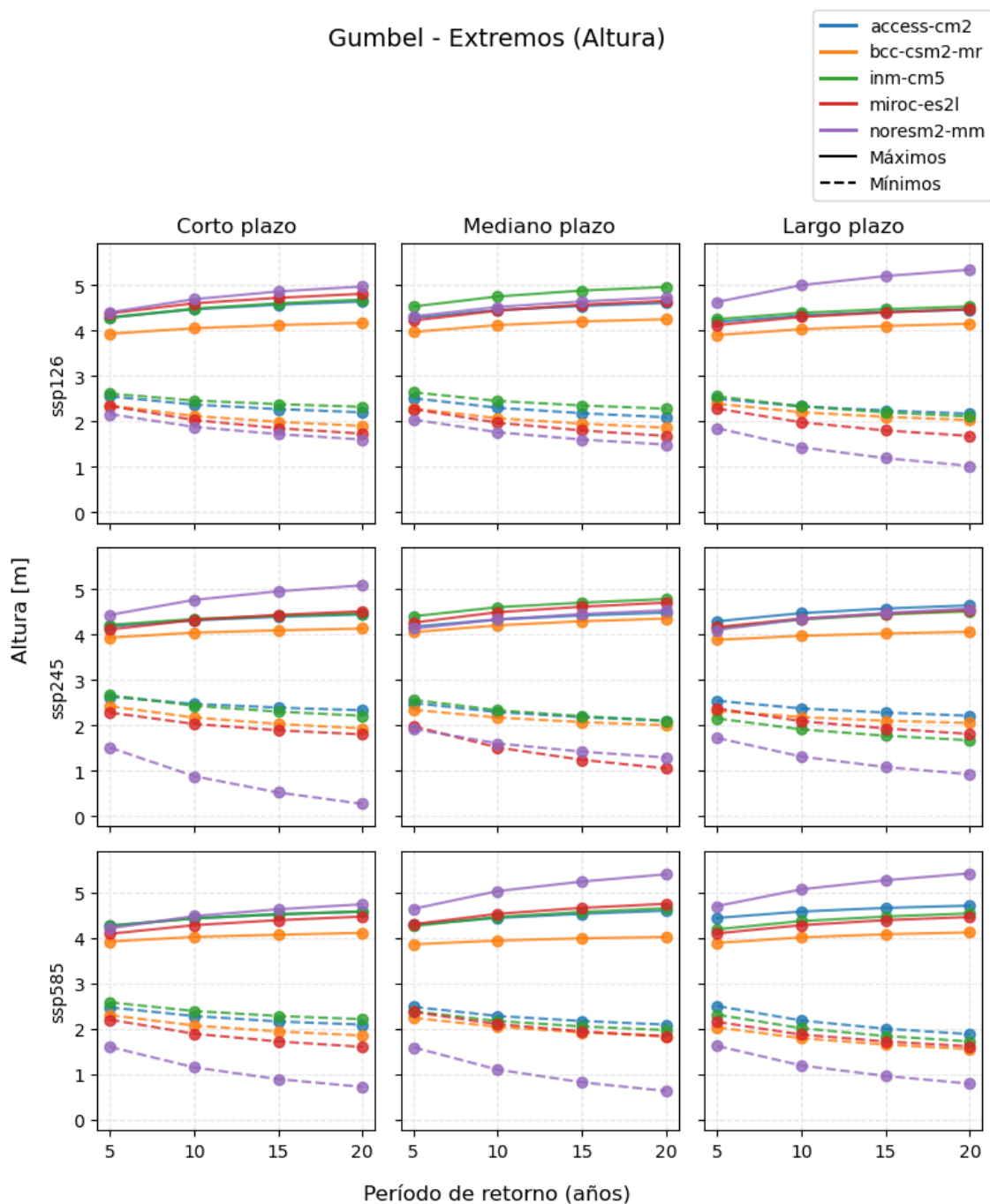


Figura 32. Ajuste de valores extremos - Reconquista

4.1.11. Toma Esquina

En Esquina, el acuerdo con las observaciones en la distribución de percentiles de nivel es bueno (Figura 33), lo que indica una adecuada representación del régimen hidrométrico en esta sección del sistema.

Sin embargo, debido a las características propias del tramo y a los aportes en ruta provenientes de subcuencas como Santa Lucía y Corriente, las anomalías presentan un leve incremento. En este sentido, se alcanzan valores extremos del orden de $\pm 0,95$ m, tanto en condiciones de crecida como de bajante, respectivamente.

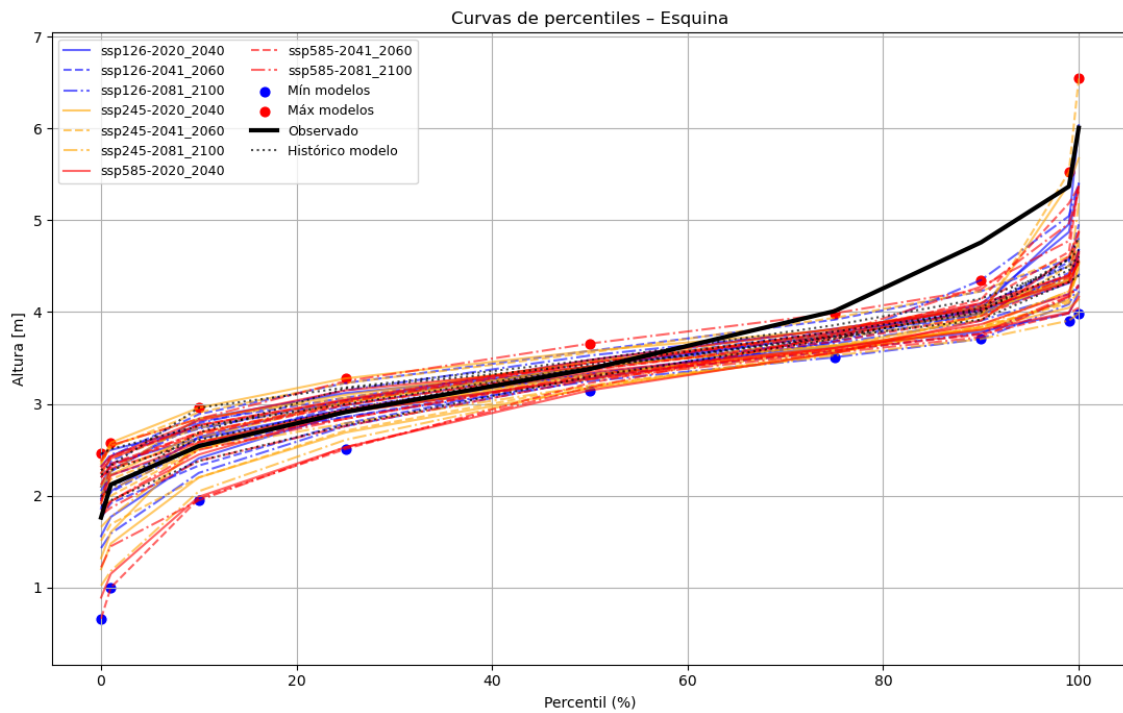


Figura 33. Curva de percentiles de Niveles - Esquina

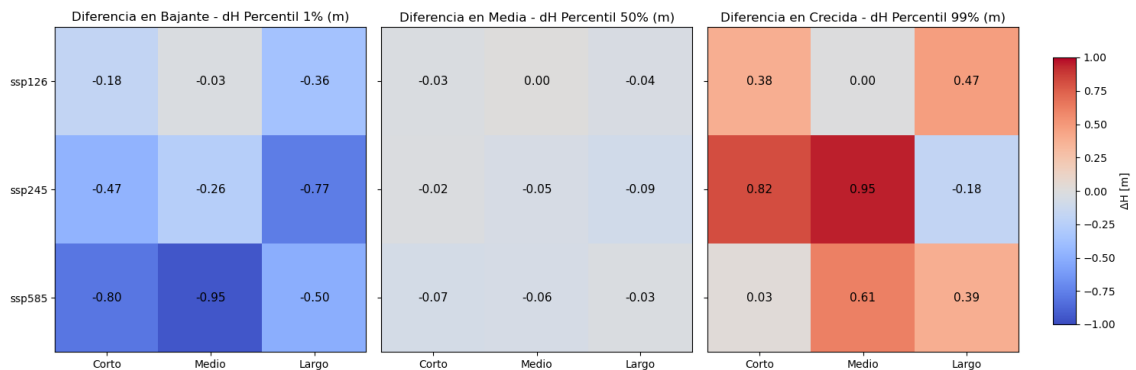


Figura 34. Anomalías de Niveles - Esquina

Gumbel - Extremos (Altura)

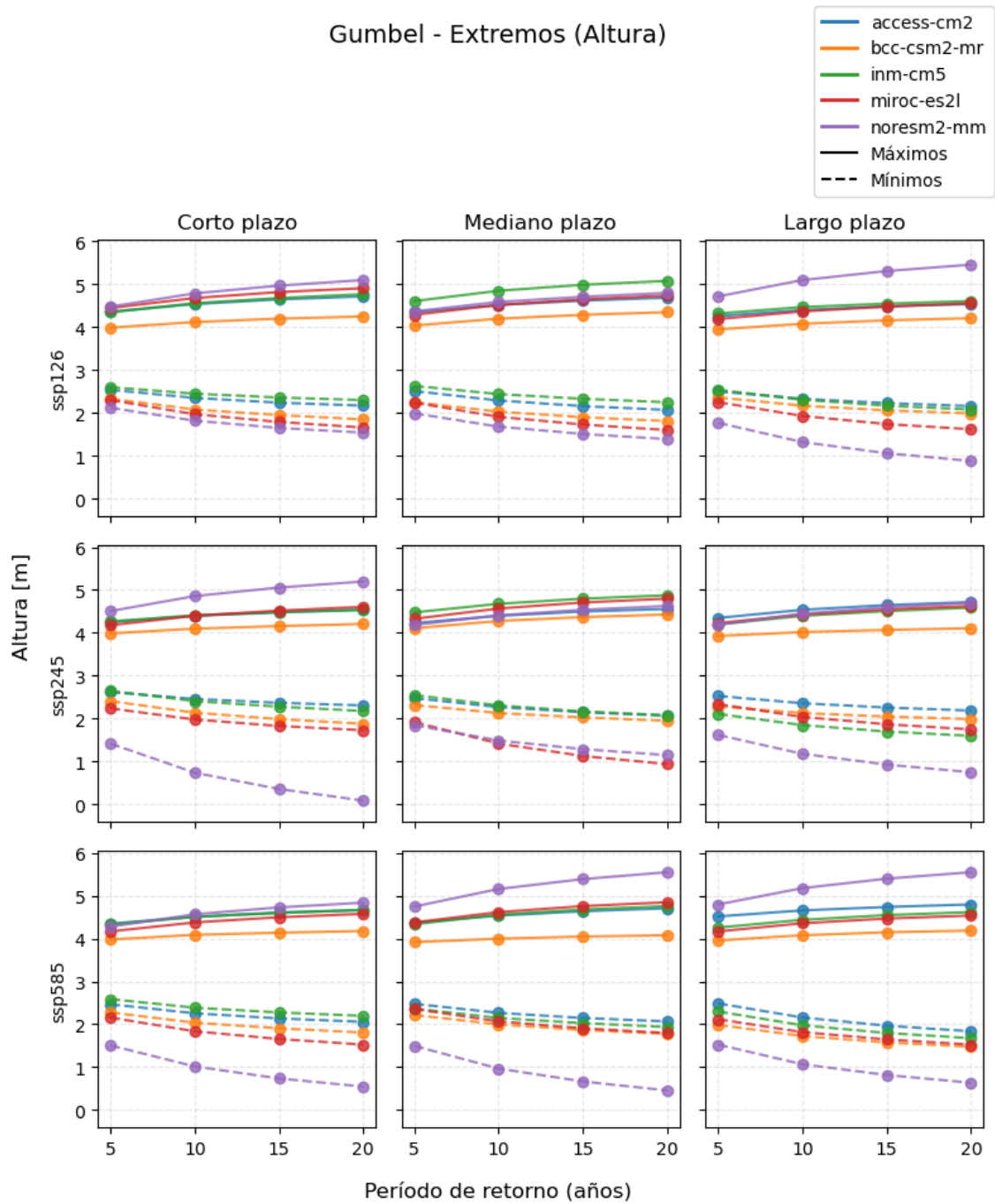


Figura 35. Ajuste de valores extremos - Esquina

4.1.12. Toma San Javier

En San Javier, el acuerdo con los valores observados es bueno, lo que indica una adecuada representación del comportamiento hidrométrico en esta sección del sistema. Las anomalías de niveles (Figura 37) se encuentran en el orden de -0,9 m en condiciones de bajante y hasta +1 m en situaciones de crecida, reflejando una respuesta consistente del modelo dentro del rango de variabilidad esperado.

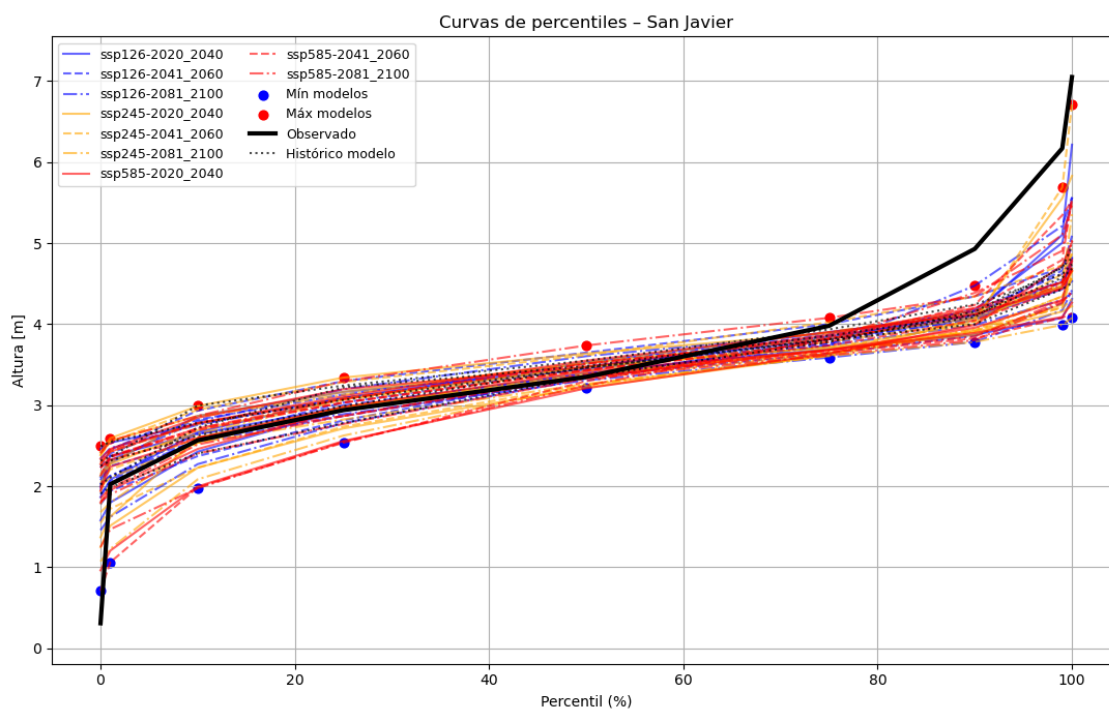


Figura 36. Curva de percentiles de Niveles - San Javier

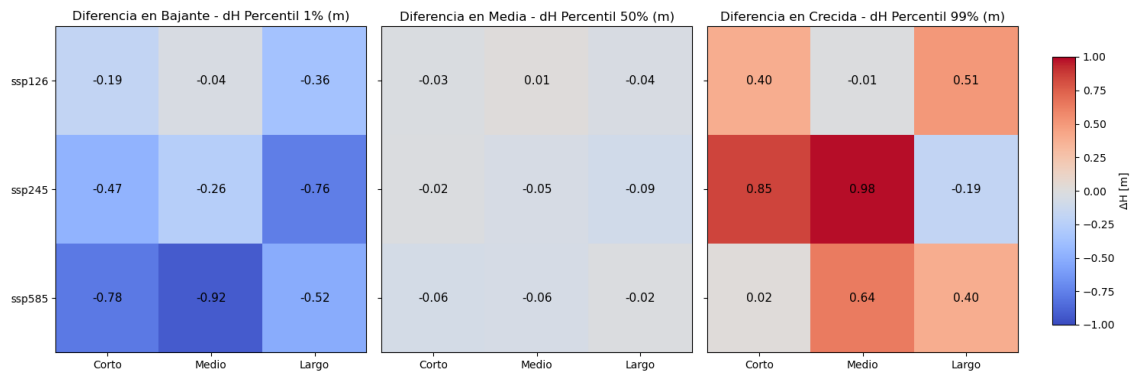


Figura 37. Anomalías de Niveles - San Javier

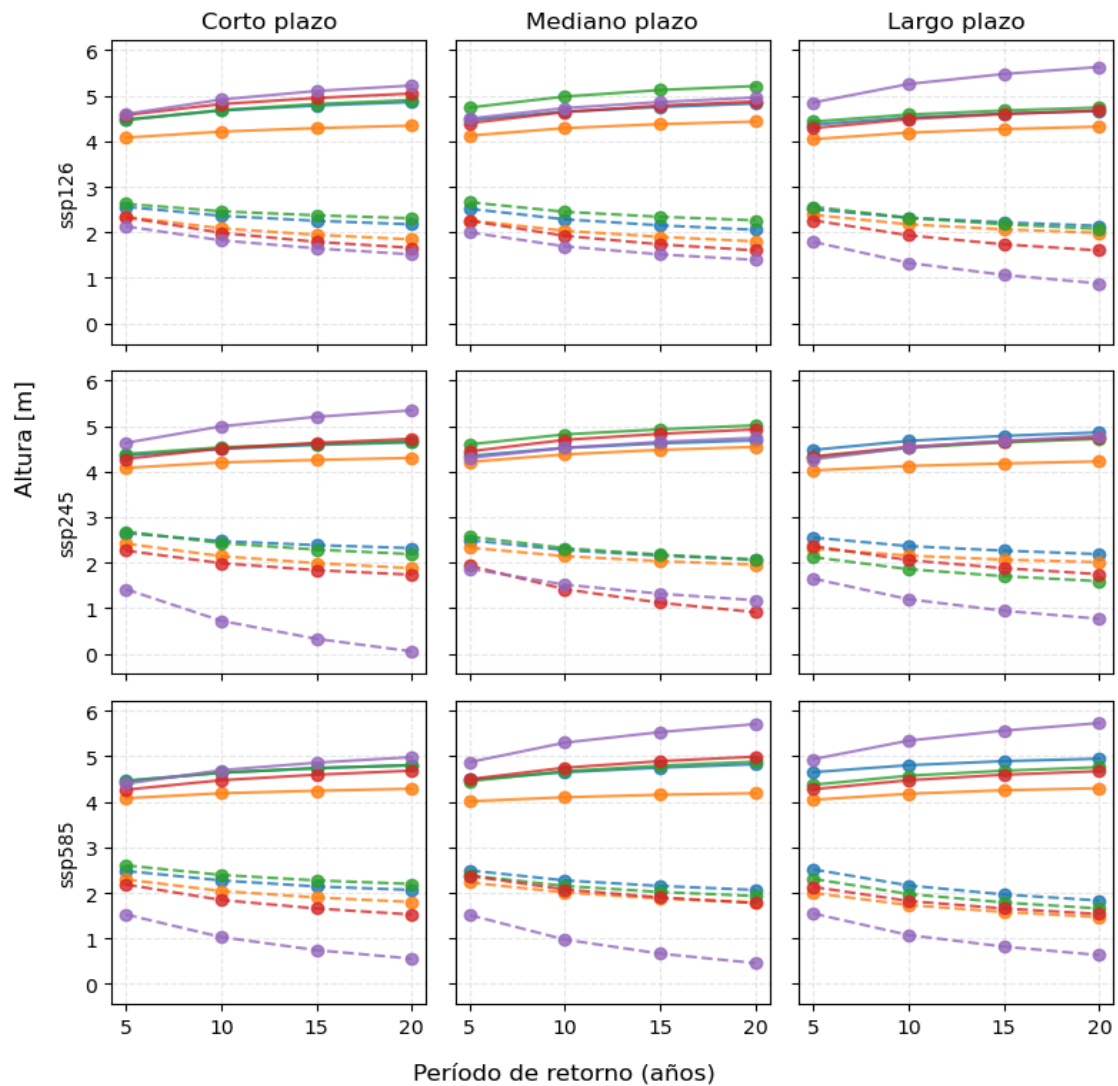


Figura 38. Ajuste de valores extremos - San Javier

4.1.13. Toma Santa Fe

En Santa Fe, los niveles presentan un buen acuerdo con los valores observados (Figura 39). Las variaciones entre modelos se mantienen por debajo de 1 m en condiciones normales, mientras que en situaciones de bajante y crecida pueden alcanzar valores cercanos a 2 m, reflejando una mayor dispersión bajo condiciones extremas.

Las anomalías tienden a disminuir respecto de los tramos ubicados aguas arriba, lo cual se asocia principalmente a las características topobatimétricas del área de estudio. En este sentido, los valores se ubican en el orden de $\pm 0,85$ m (Figura 40), evidenciando una moderación de la respuesta del sistema frente a los forzantes climáticos.

Por su parte, el análisis de valores extremos (Figura 41) muestra una reducción en la dispersión entre los valores mínimos y máximos ajustados, lo que indica una mayor consistencia entre modelos en la representación de los extremos hidrométricos en esta sección del sistema.

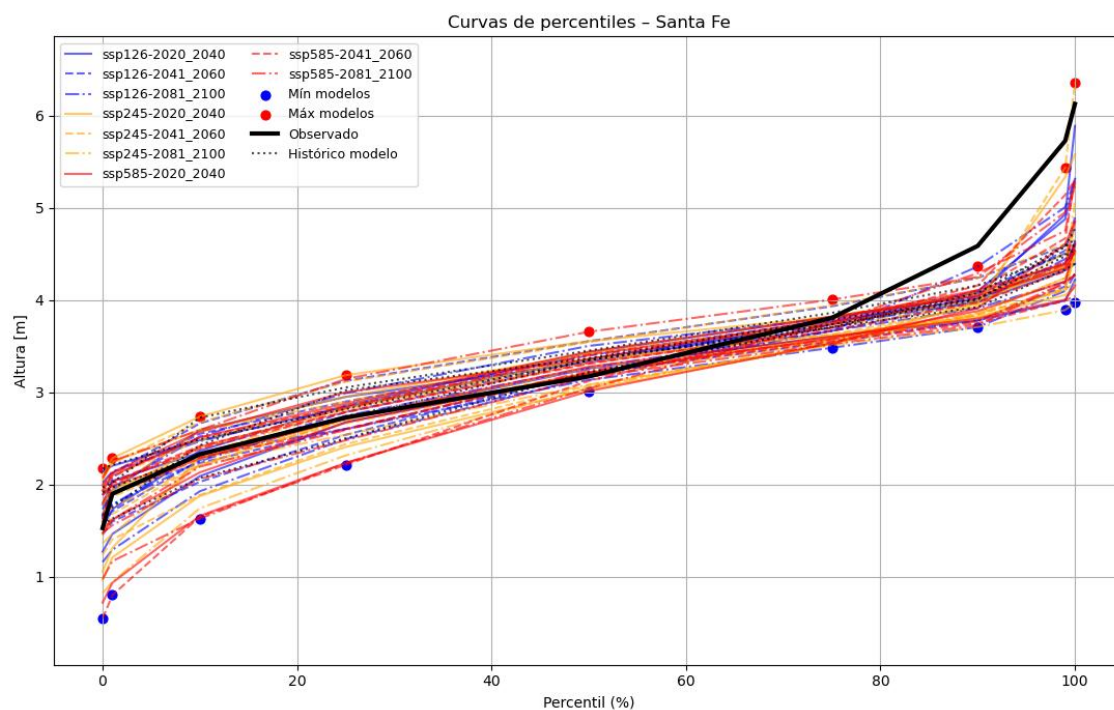


Figura 39. Curva de percentiles de Niveles - Santa Fe

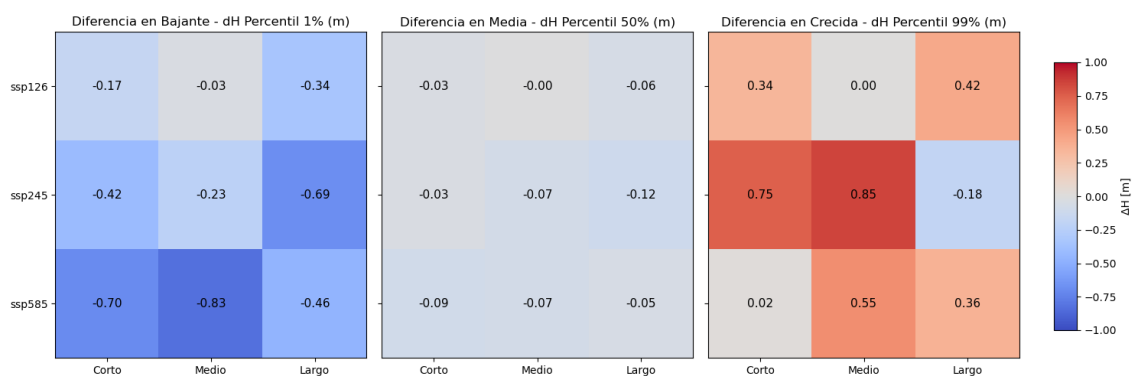


Figura 40. Anomalías de Niveles - Santa Fe

Gumbel - Extremos (Altura)

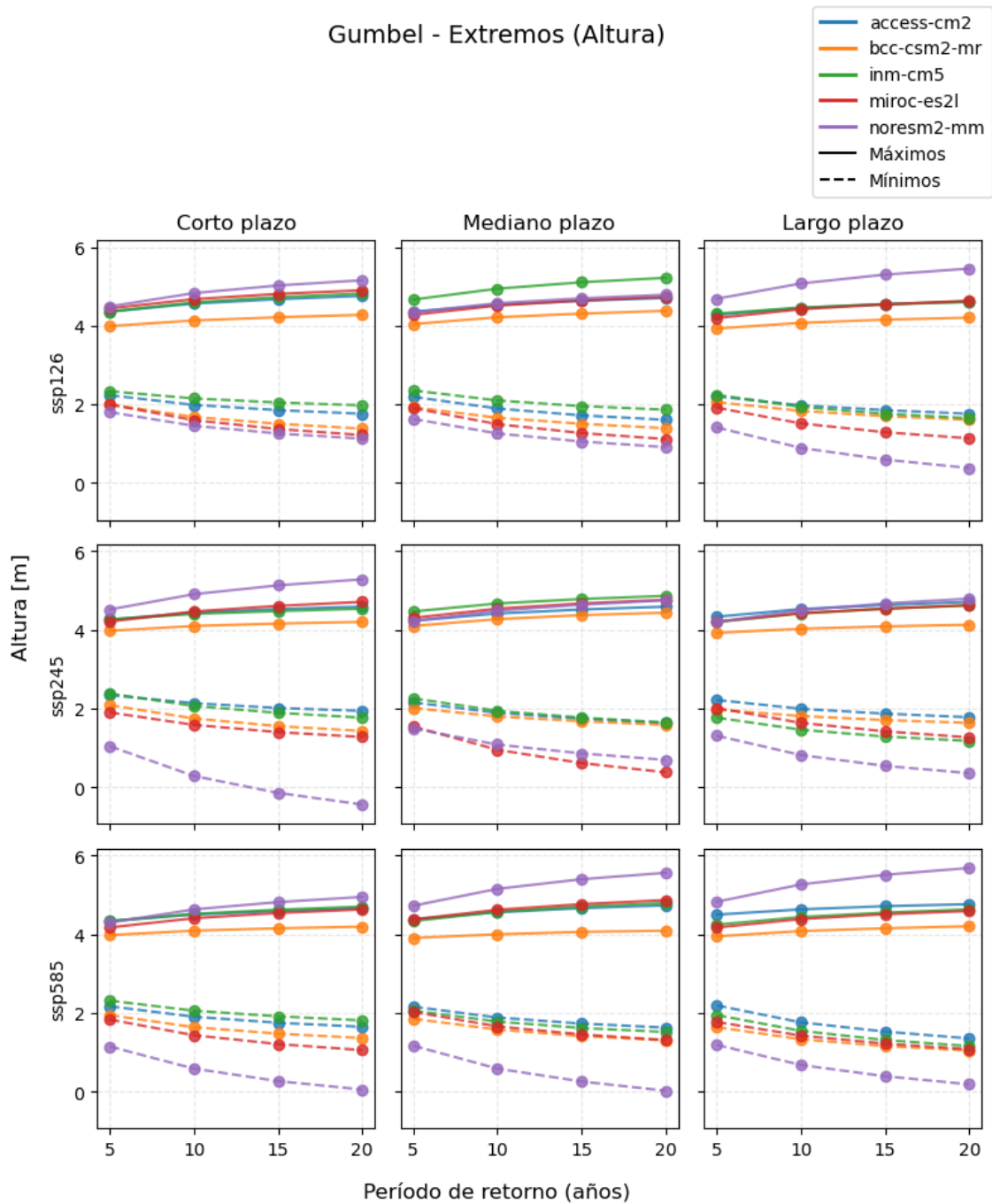


Figura 41. Ajuste de valores extremos - Santa Fe

4.1.14. Toma Paraná

En la sección de Paraná se presentan nuevamente los resultados de la distribución de curvas percentiles de caudales (Figura 42). Se observa una buena consistencia con lo expuesto para el tramo de Paraná superior, destacándose que los aportes en ruta en esta sección se encuentran fuertemente laminados. En consecuencia, las anomalías se acotan aproximadamente al rango de -20% en condiciones de bajante y +25% en condiciones de crecida, para los casos extremos analizados (Figura 43).

Un análisis análogo se realiza para los niveles hidrométricos (Figura 44), donde se obtienen anomalías similares a las registradas en Santa Fe, lo cual resulta coherente debido a la proximidad espacial entre ambas secciones y a la continuidad hidráulica del sistema en este tramo del río.

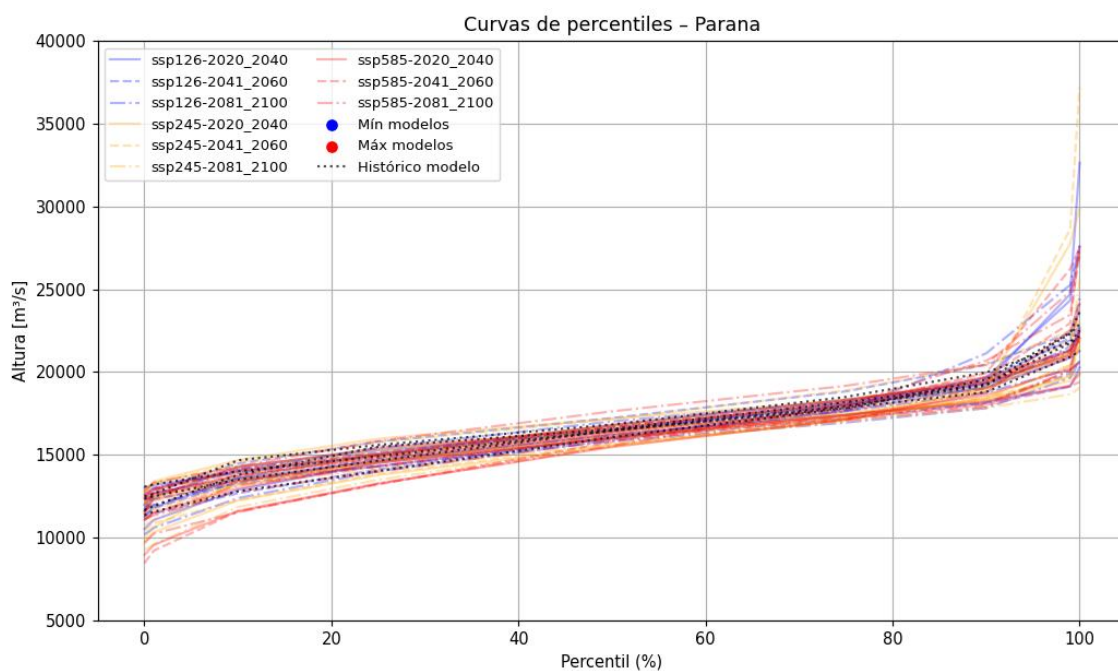


Figura 42. Curva de percentiles de Caudales - Paraná

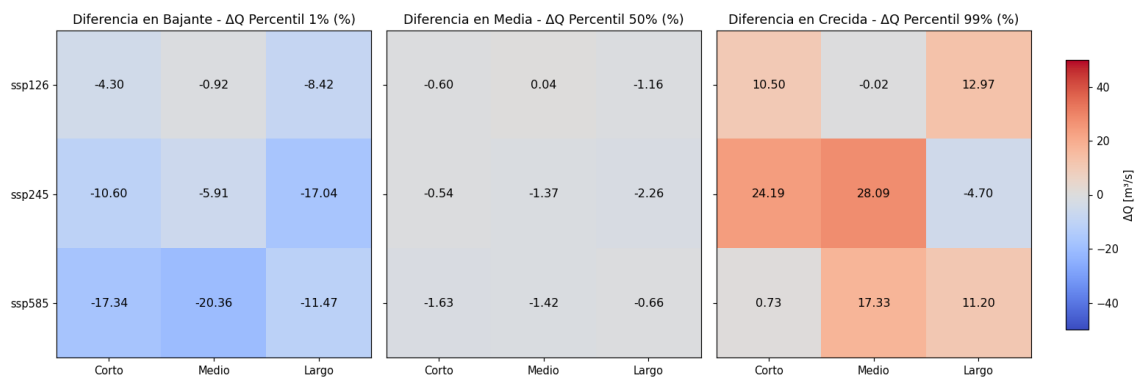


Figura 43. Anomalías de Caudales - Paraná

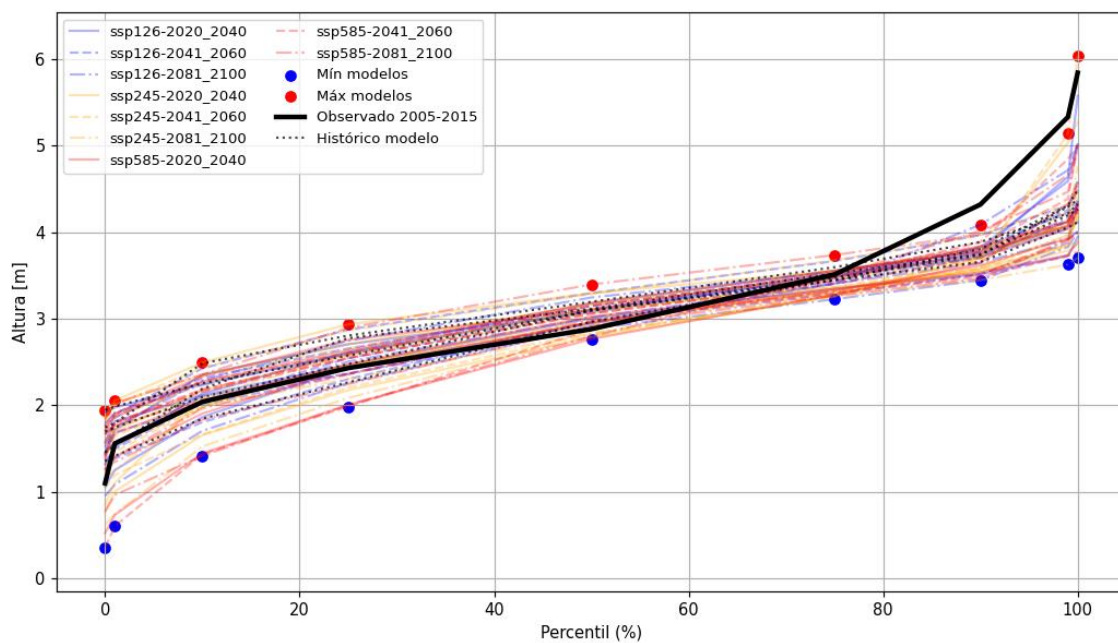


Figura 44. Curva de percentiles de Niveles - Paraná

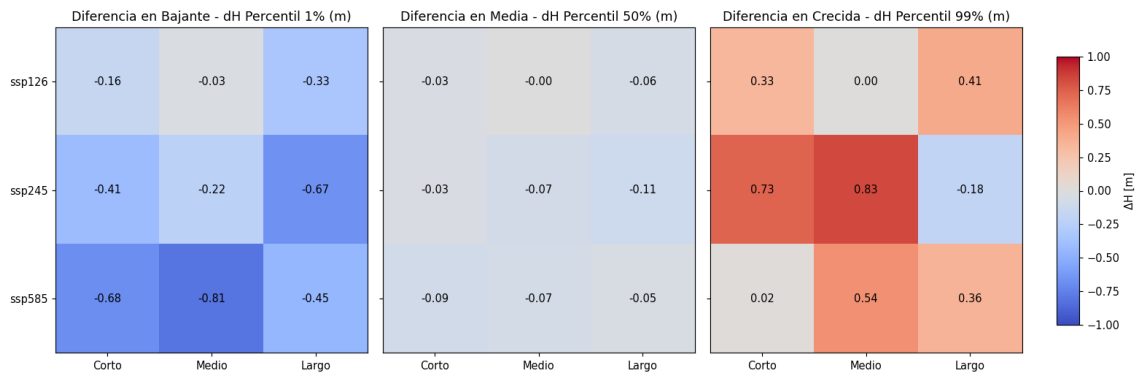


Figura 45. Anomalías de Niveles - Paraná

Gumbel - Extremos (Altura)

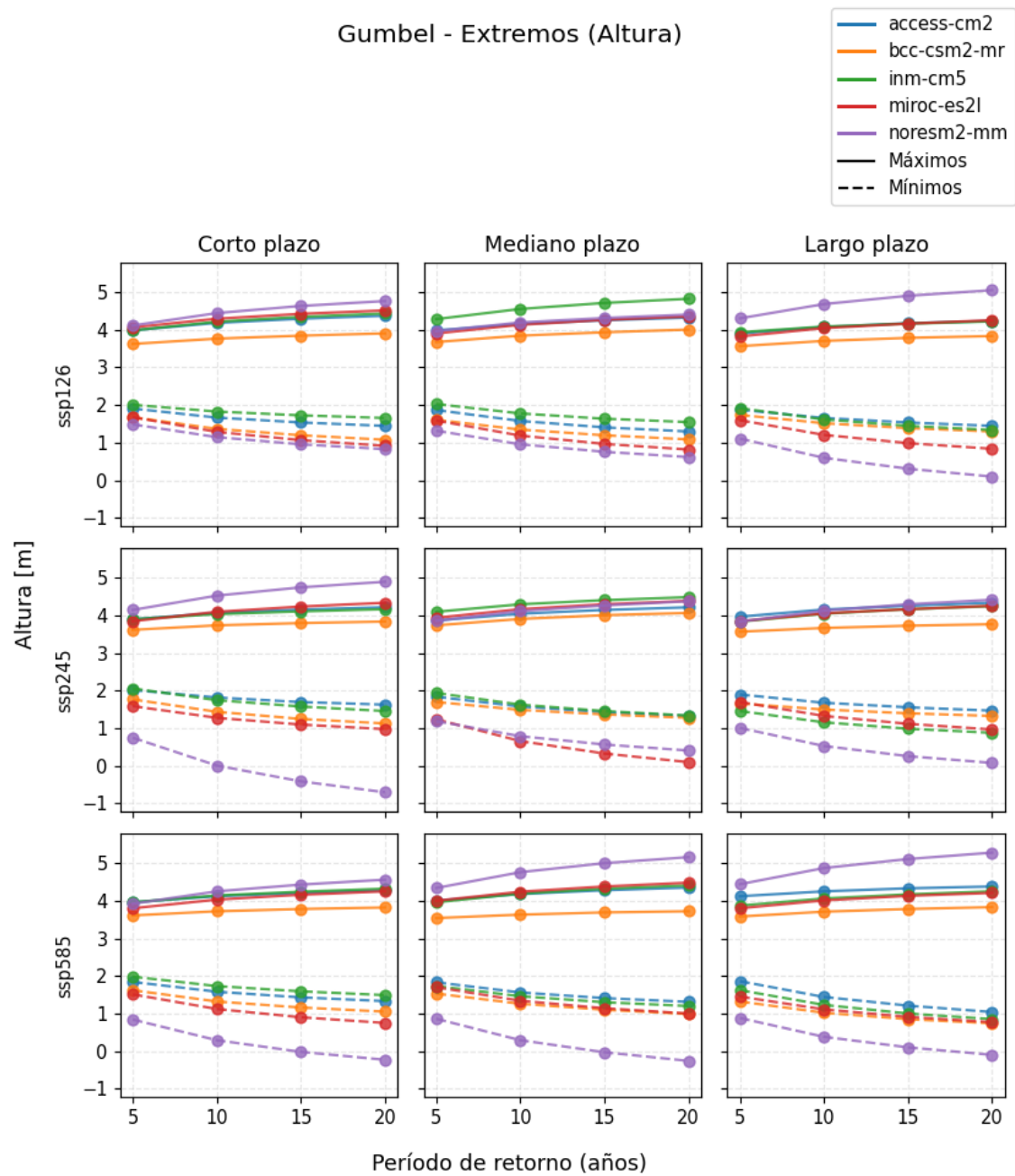


Figura 46. Ajuste de valores extremos - Paraná

4.1.15. Toma Desvío Arijón

En el caso de la toma de Desvío Arijón, al no contarse con una escala hidrométrica en el sitio, no se realiza comparación directa con valores observados. En este sentido, las alturas presentadas están referidas al cero del IGN (Figura 47).

En la Figura 48 se observa que las anomalías se reducen respecto de los tramos ubicados aguas arriba. Este comportamiento se atribuye a las condiciones de interacción entre cauce y planicie, dado que la sección se encuentra influenciada por el sistema del río Coronda, lo que tiende a amortiguar la variabilidad hidrométrica.

En este caso, las anomalías alcanzan valores del orden de -0,65 m en condiciones de bajante y +0,73 m en condiciones de crecida, reflejando una respuesta relativamente acotada del sistema en esta sección.

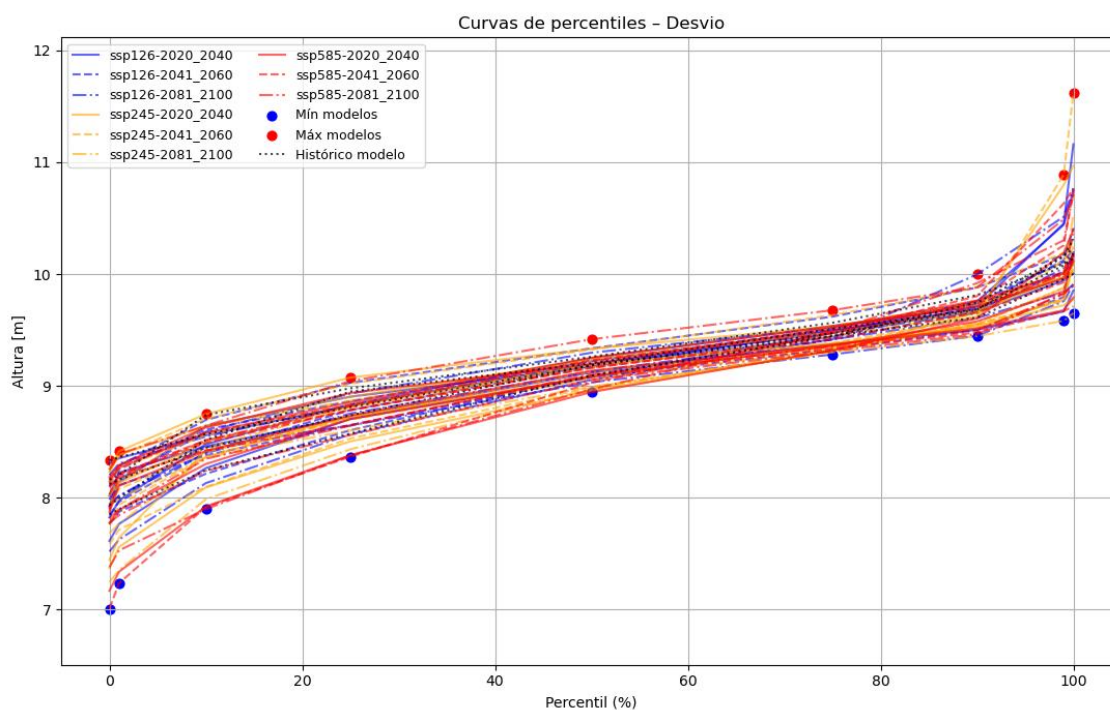


Figura 47. Curva de percentiles de Niveles - Desvío Arijón

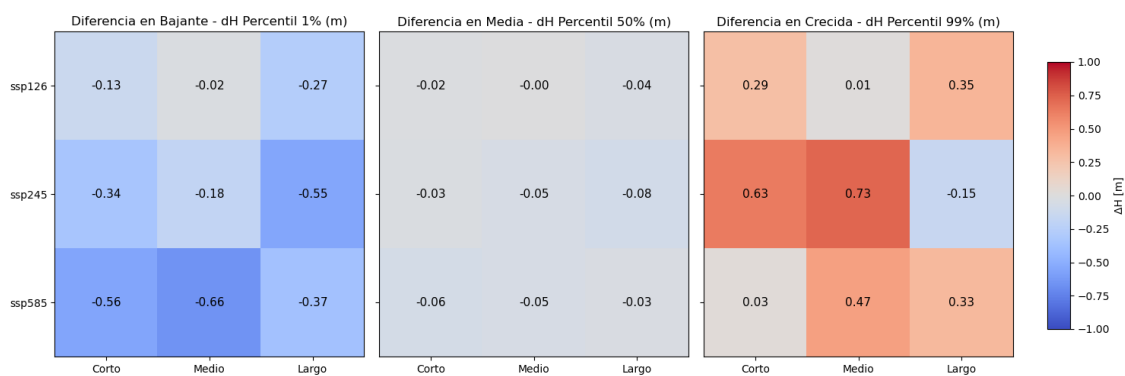


Figura 48. Anomalías de Niveles - Desvío Arijón

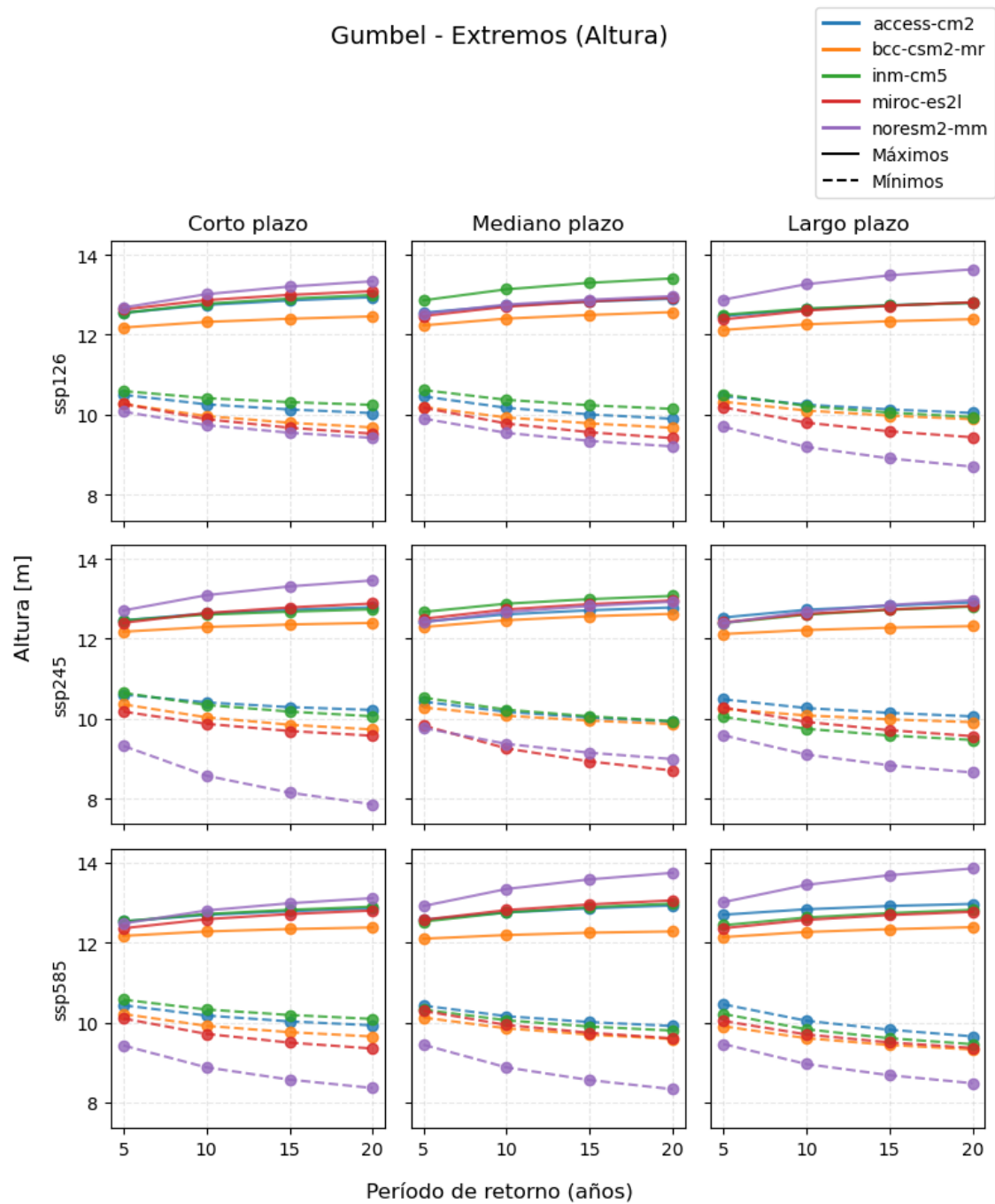


Figura 49. Ajuste de valores extremos - Desvío Arijón

4.1.16. Toma Coronda

La toma de Coronda presenta la comparación de curvas de percentiles con los valores observados en la Figura 50, ya que en este punto se dispone de una estación perteneciente a la red hidrológica nacional. En general, se observa un buen acuerdo entre las series modeladas y las observaciones, lo que indica una adecuada representación del comportamiento hidrométrico en esta sección.

Las anomalías continúan con la tendencia a reducirse respecto de los tramos aguas arriba, lo cual se atribuye a las características del terreno y a la dinámica del cauce en este sector del sistema. En este caso, los valores se encuentran en el orden de -0,55 m en condiciones de bajante y +0,65 m en condiciones de crecida.

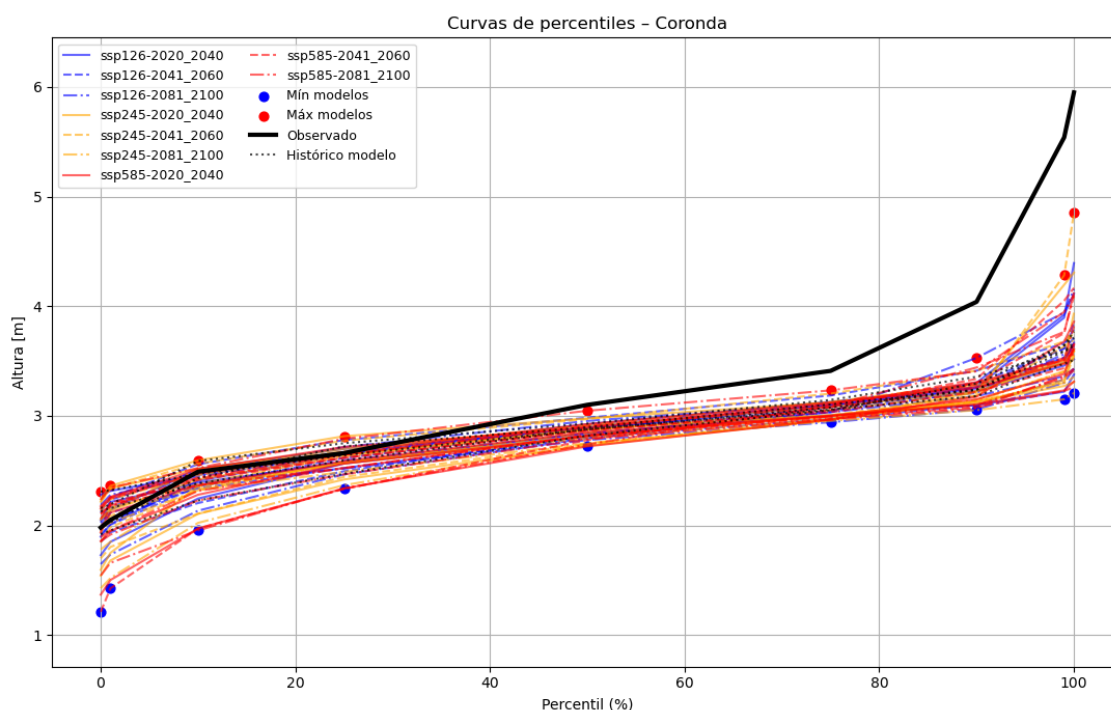


Figura 50. Curva de percentiles de Niveles - Coronda

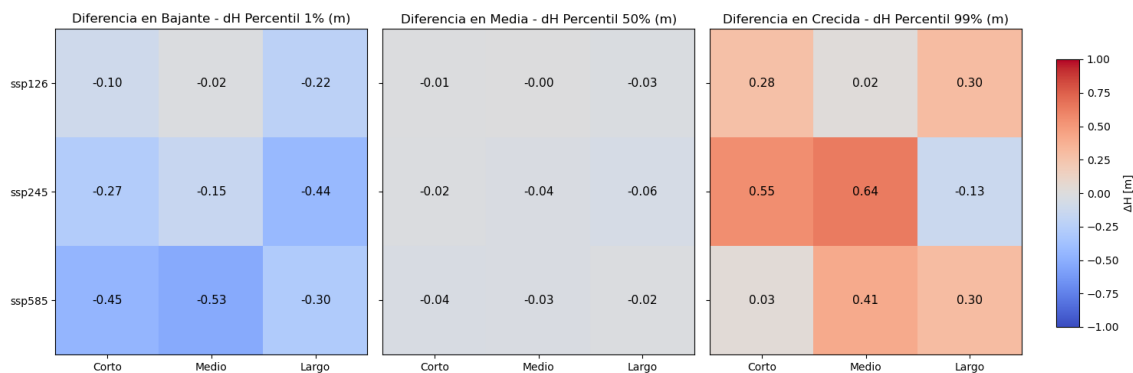


Figura 51. Anomalías de Niveles - Coronda

Gumbel - Extremos (Altura)

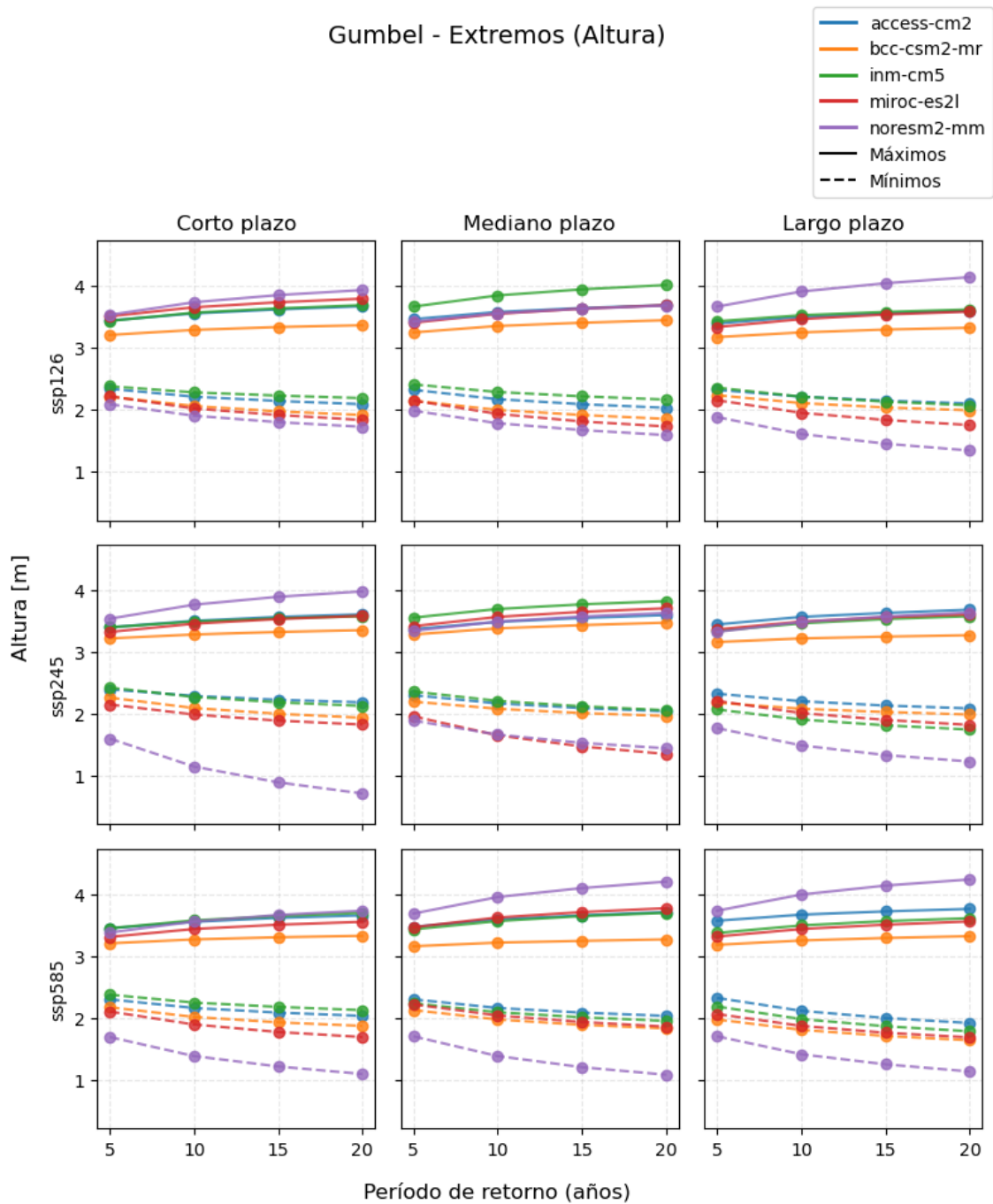


Figura 52. Ajuste de valores extremos - Coronda

4.1.17. Toma Monje

En el caso de Monje tampoco se presenta comparación con valores observados (Figura 53), dado que, al igual que en Desvío Arijón, no se dispone de una estación hidrométrica en este punto del sistema.

En el análisis de anomalías se observa un comportamiento interesante, ya que, en contraposición a la tendencia de reducción observada hacia la toma de Coronda, en este caso las anomalías vuelven a incrementarse. Este comportamiento responde en parte a las condiciones del entorno hidrodinámico y a la mayor proximidad con el río Paraná, el cual impone la condición de aguas abajo sobre el sistema del Coronda, influyendo directamente en su dinámica.

En este caso, las anomalías alcanzan valores del orden de -0,75 m en condiciones de bajante y +0,8 m en condiciones de crecida.

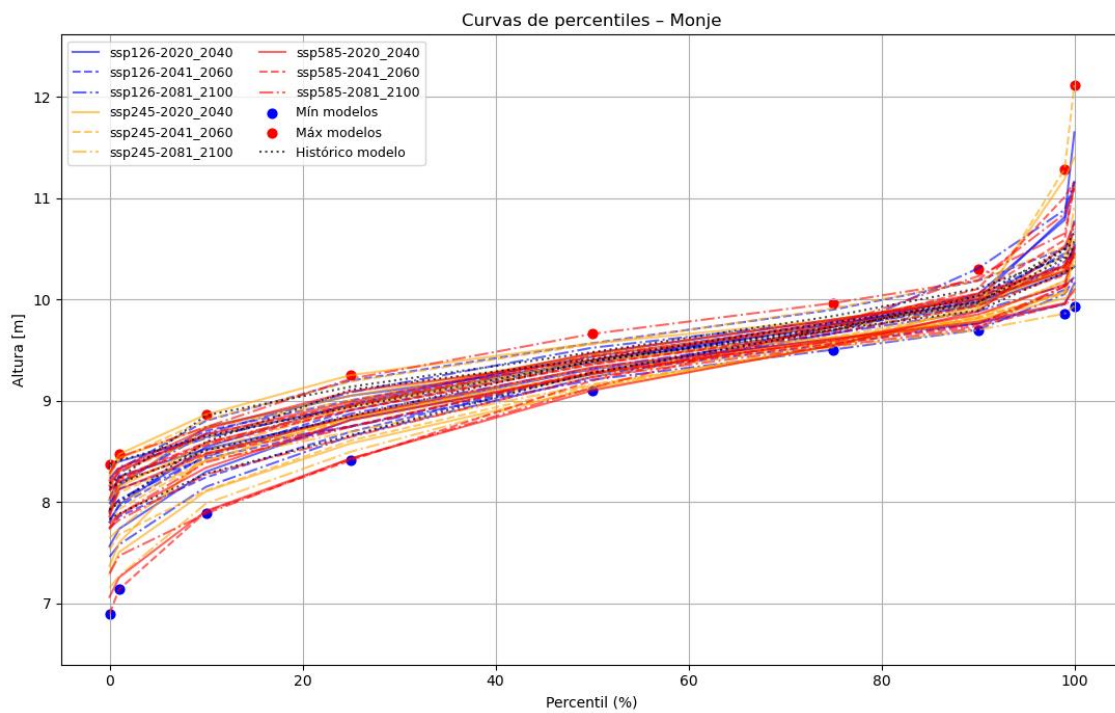


Figura 53. Curva de percentiles de Niveles - Monje

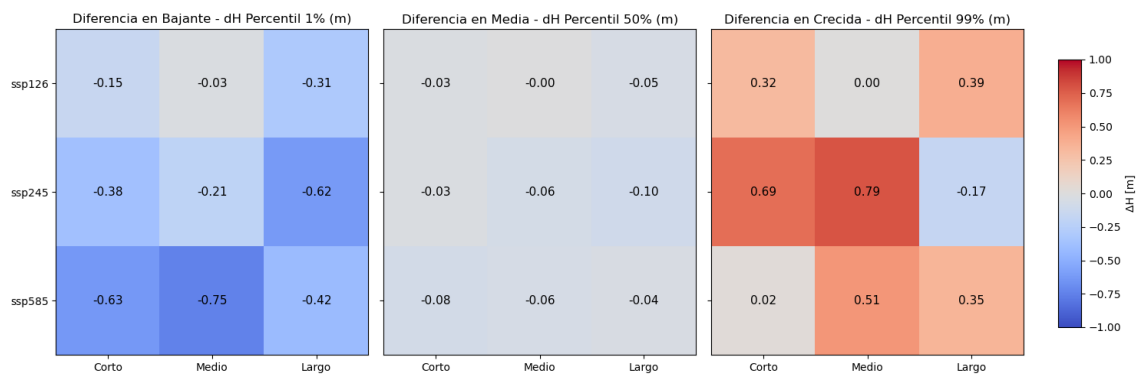


Figura 54. Anomalías de Niveles - Monje

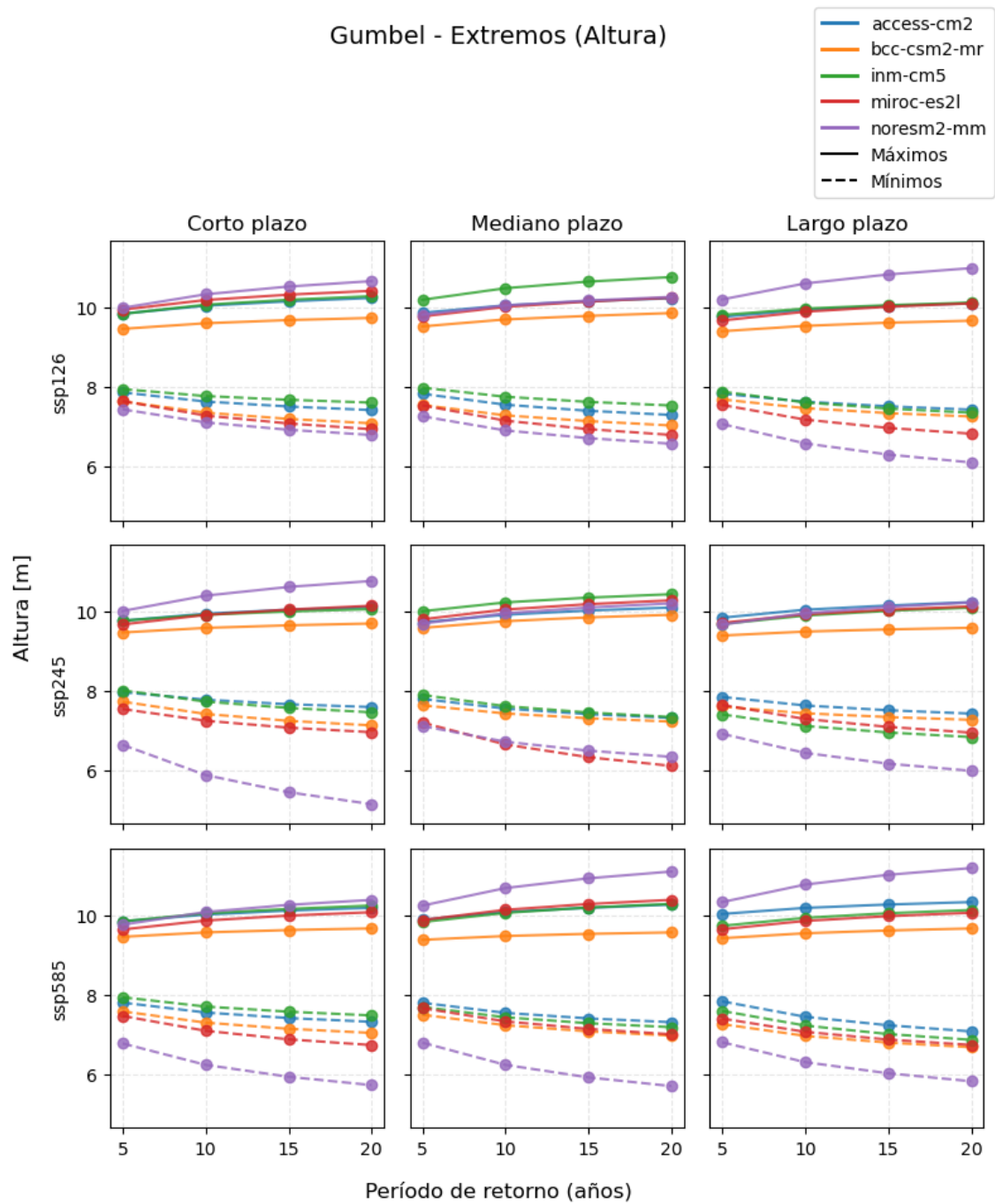


Figura 55. Ajuste de valores extremos - Monje

4.1.18. Toma Rosario - Granadero Baigorria

Rosario muestra nuevamente una mayor dispersión en los resultados de los modelos climáticos evaluados en el modelo hidrodinámico (Figura 56), evidenciando además una tendencia a la subestimación a partir de niveles medios, con diferencias que se mantienen acotadas en el orden de 1 m.

En cuanto a las anomalías (Figura 57), se observan valores extremos que alcanzan aproximadamente -0,9 m en condiciones de bajante y +1,1 m en situaciones de crecida, reflejando una respuesta más variable del sistema en esta sección del río.

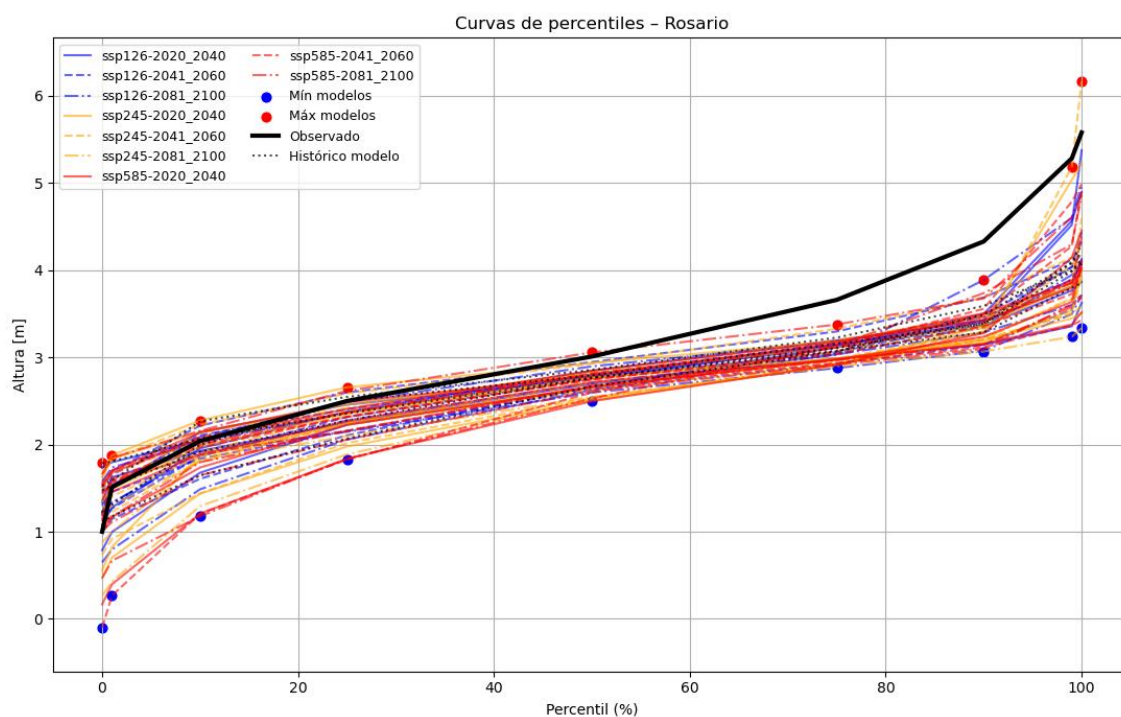


Figura 56. Curva de percentiles de Niveles - Rosario

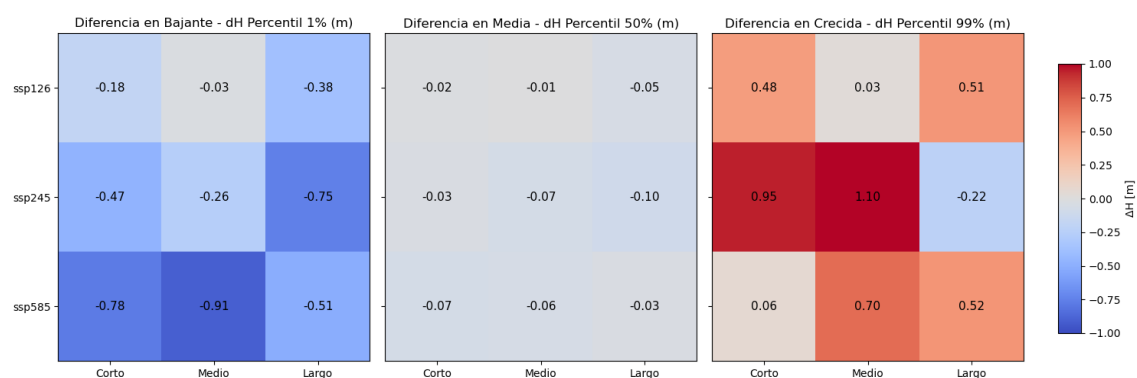


Figura 57. Anomalías de Niveles - Rosario

Gumbel - Extremos (Altura)

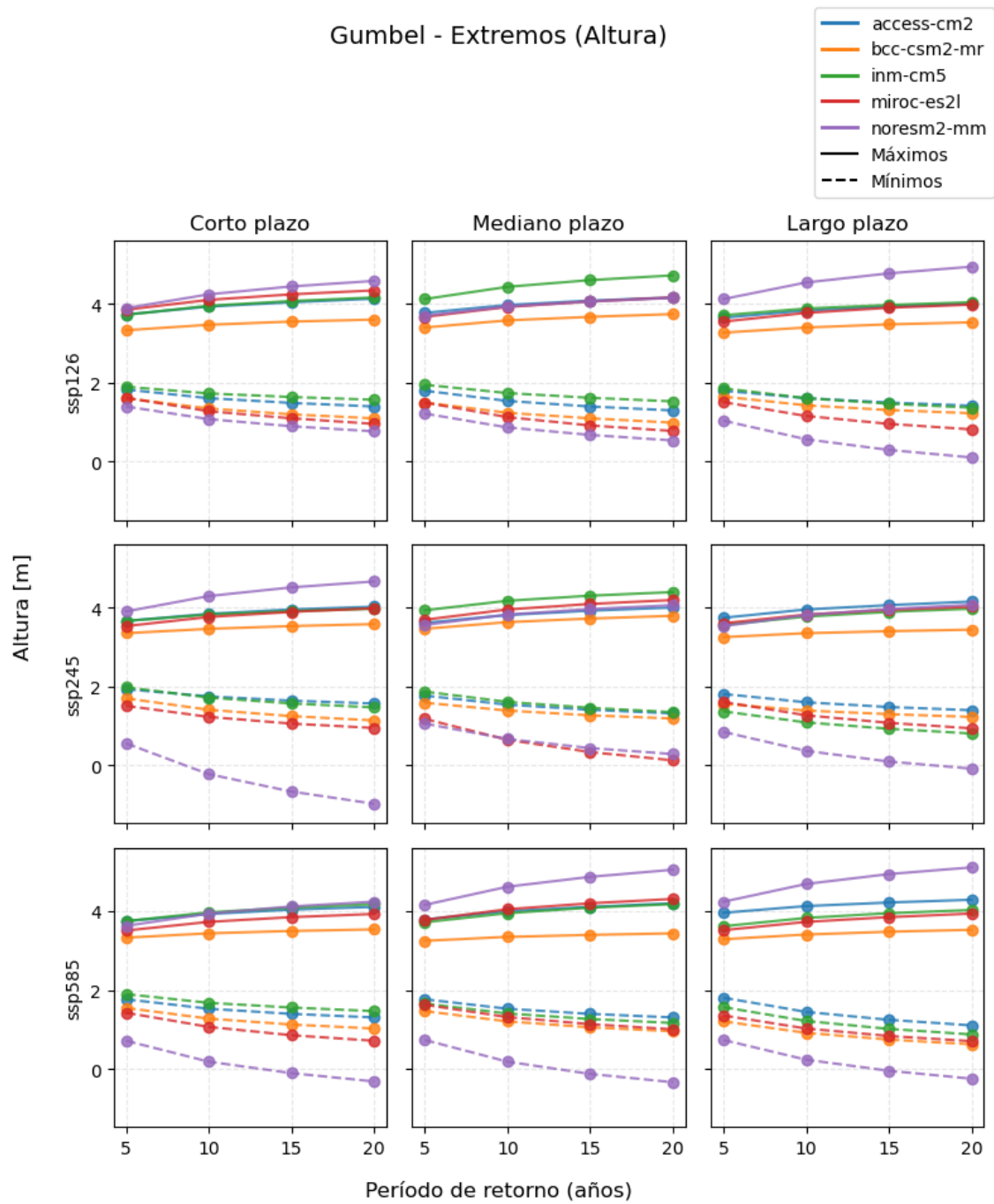


Figura 57. Ajuste de valores extremos - Rosario

4.1.19. Toma Victoria

Victoria muestra un comportamiento particular que se evidencia tanto en la curva de percentiles (Figura 58) como en el análisis de anomalías (Figura 59). Para valores altos, se observa una reducción de la variabilidad, lo cual puede explicarse por las características geomorfológicas de la zona, correspondiente a una extensa planicie del delta con un curso de agua relativamente reducido en comparación con otros tramos del sistema.

En cuanto a las anomalías, se registran valores asimétricos, con reducciones de hasta -1,15 m en condiciones de bajante, mientras que en situaciones de crecida alcanzan aproximadamente +0,3 m. Este comportamiento refleja una respuesta no lineal del sistema hidrodinámico en esta sección, fuertemente condicionada por la interacción entre el río y la planicie de inundación.

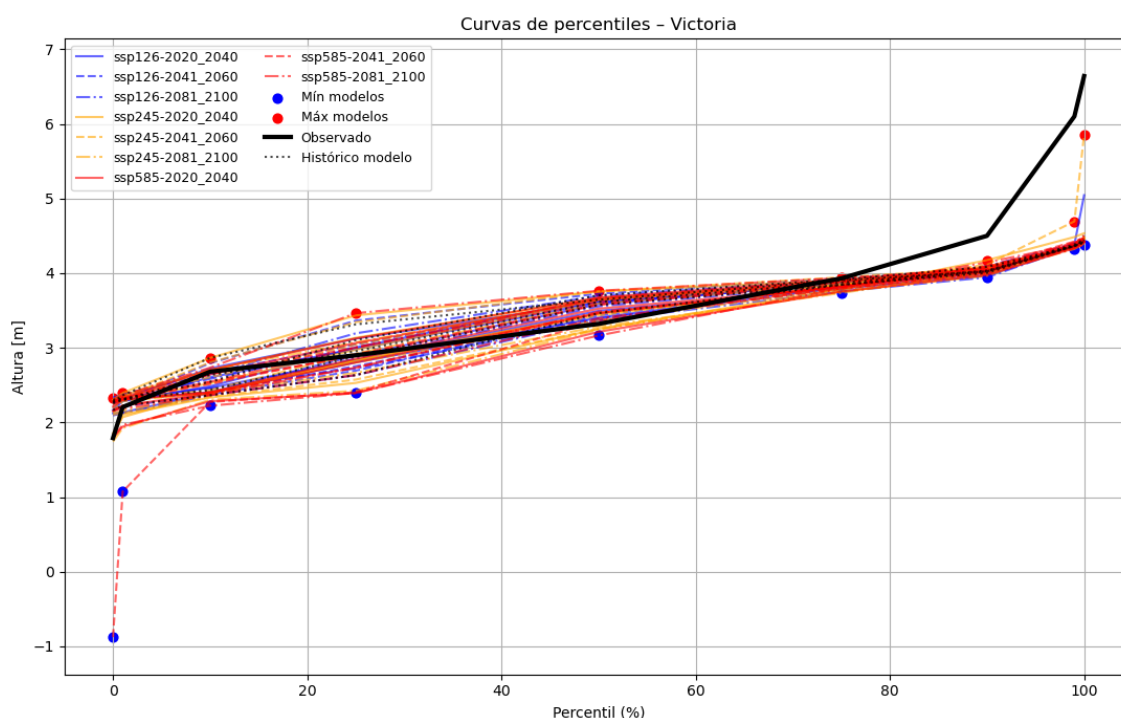


Figura 58. Curva de percentiles de Niveles - Victoria

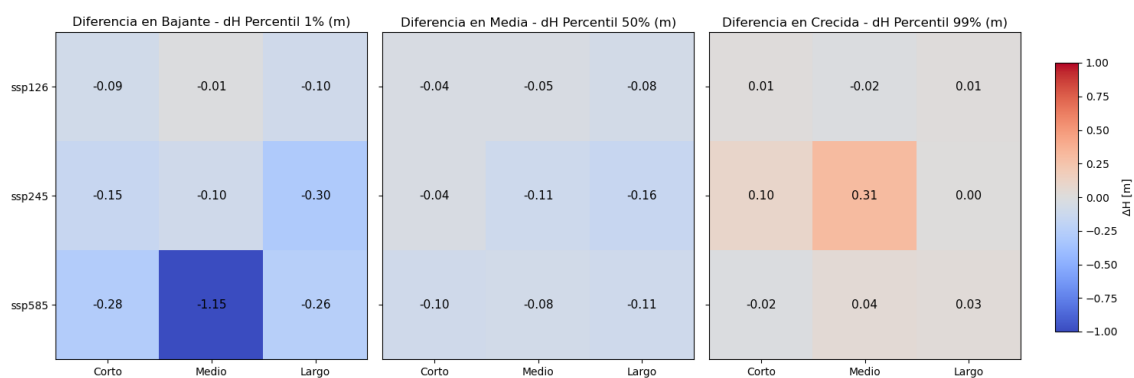


Figura 59. Anomalías de Niveles - Victoria

Gumbel - Extremos (Altura)

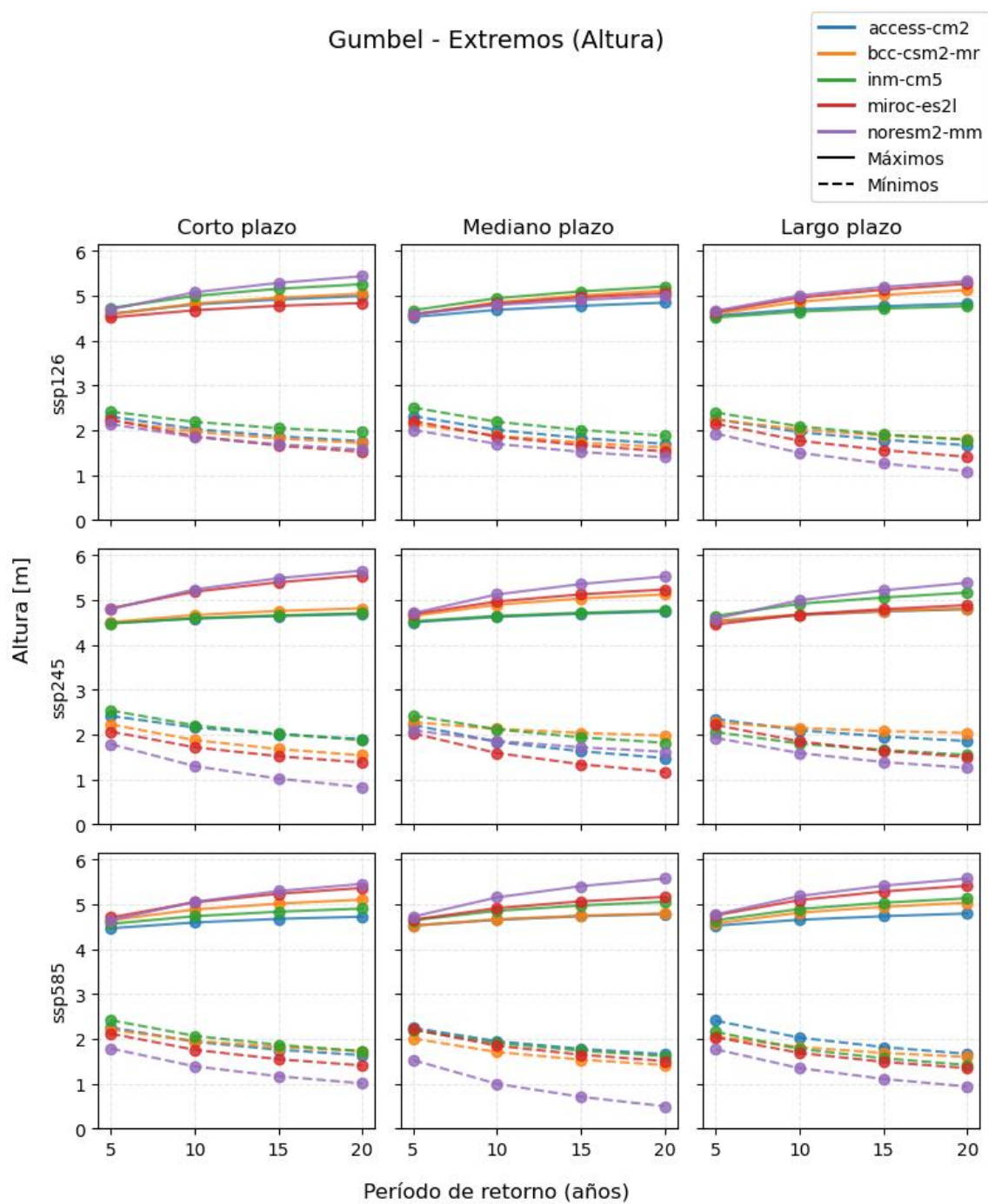


Figura 60. Ajuste de valores extremos - Victoria

4.1.20. Toma San Nicolás

En San Nicolás, los valores de percentiles muestran una buena correspondencia con las observaciones (Figura 61), lo que indica una adecuada representación del régimen hidrométrico en esta sección del sistema.

En cuanto a las anomalías, se observan valores máximos similares a los registrados en Rosario aguas arriba, alcanzando aproximadamente +1,1 m en condiciones de crecida. Sin embargo, las anomalías mínimas se presentan más atenuadas, del orden de -0,6 m. Este comportamiento se explica por la influencia progresiva del frente del delta, donde la condición de borde aguas abajo tiende a limitar la ocurrencia de bajantes pronunciadas.

En este sentido, la Figura 62 refleja esta asimetría en la respuesta del sistema, evidenciando la influencia del control hidráulico ejercido por el tramo inferior del río Paraná sobre las condiciones de nivel en esta sección.

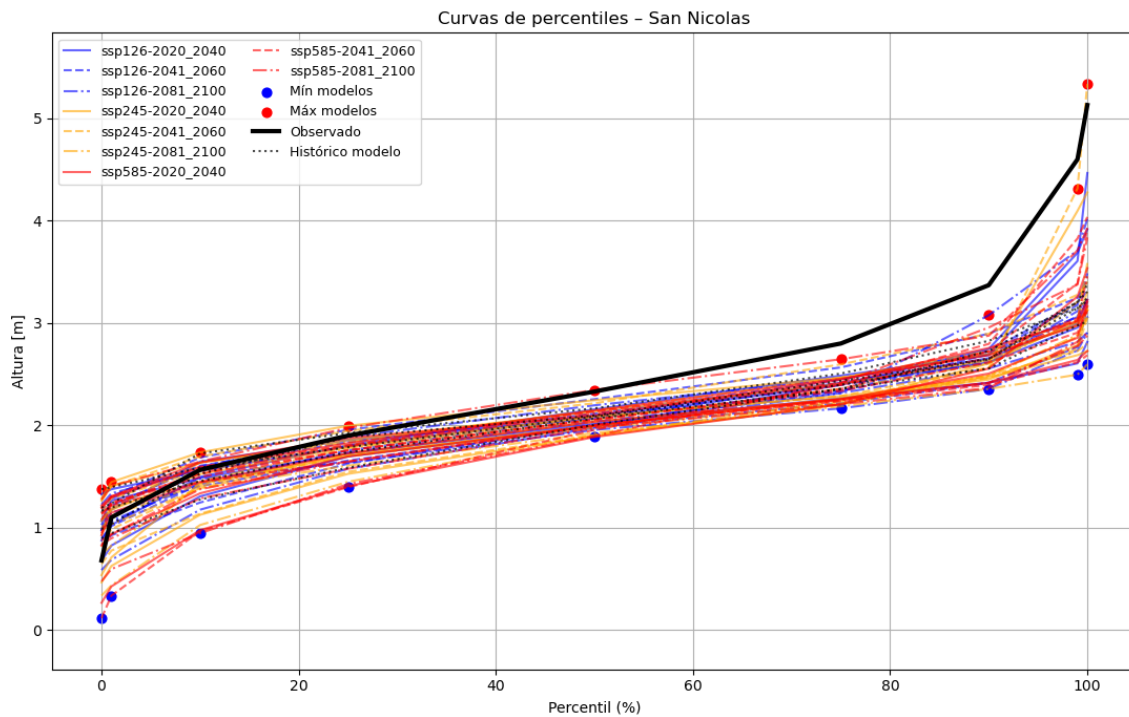


Figura 61. Curva de percentiles de Niveles - San Nicolás

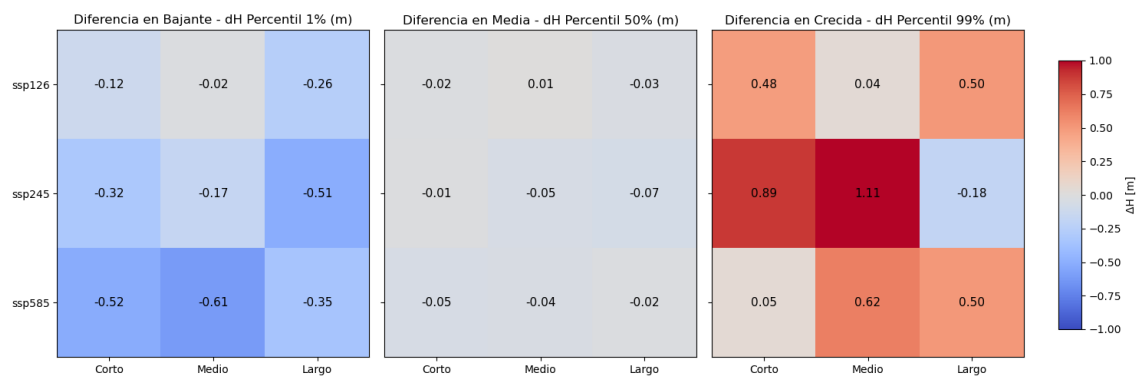


Figura 62. Anomalías de Niveles - San Nicolás

Gumbel - Extremos (Altura)

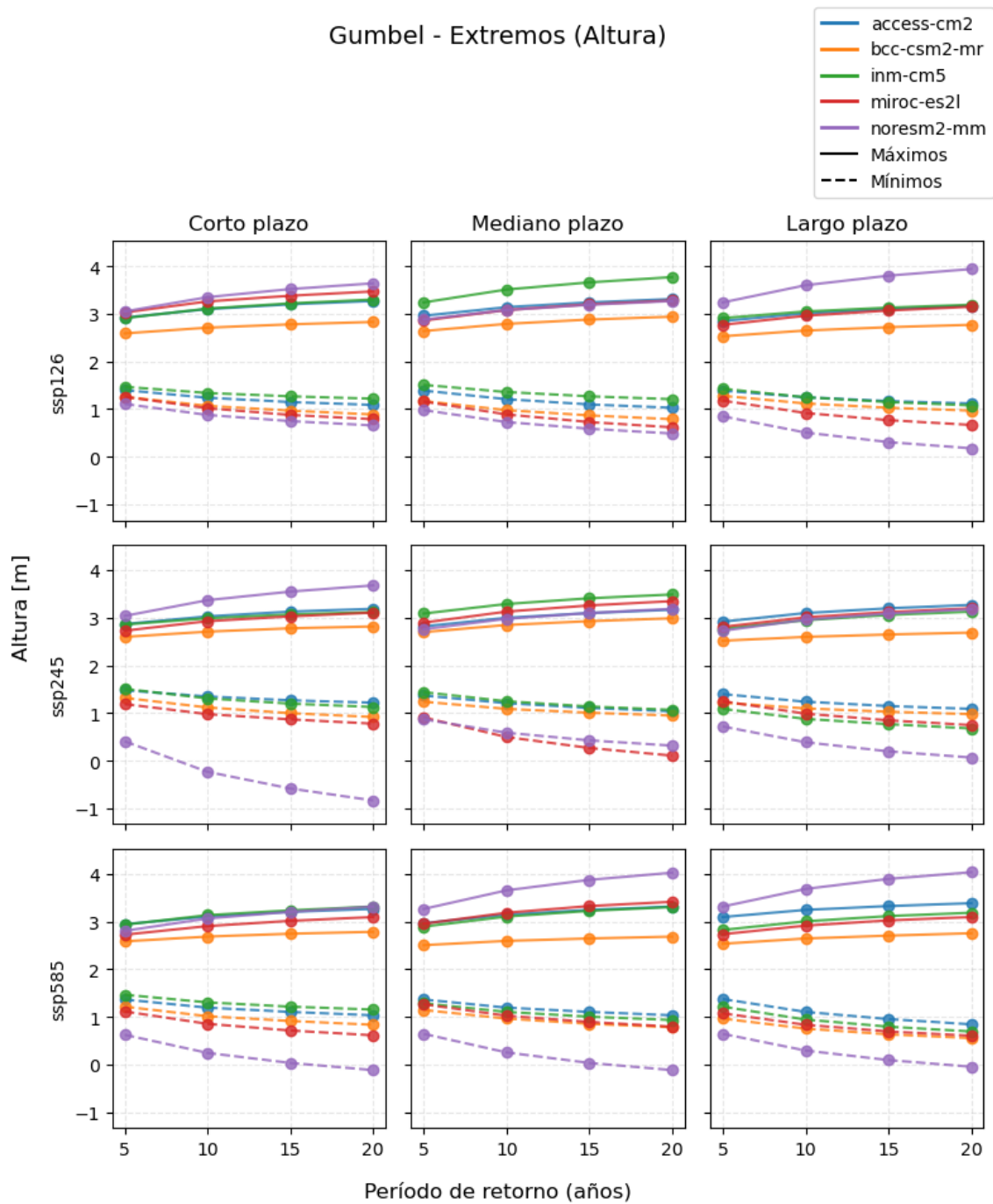


Figura 63. Ajuste de valores extremos - San Nicolás

4.1.21. Toma Escobar

En Escobar, la correspondencia con los valores observados no es del todo satisfactoria, ya que en la modelación no se incorpora la influencia de la onda de marea. En consecuencia, el frente del delta del Río de la Plata se representa con niveles medios, lo que introduce discrepancias respecto del comportamiento real del sistema (Figura 64).

Como resultado de esta simplificación, las anomalías tienden a reducirse en magnitud. En este caso, se observan valores extremos del orden de +0,5 m en condiciones de crecida y -0,05 m en condiciones de bajante (Figura 65). Este comportamiento refleja la influencia directa de la cercanía al estuario, donde la dinámica está fuertemente condicionada por procesos no incluidos en el esquema hidrodinámico utilizado.

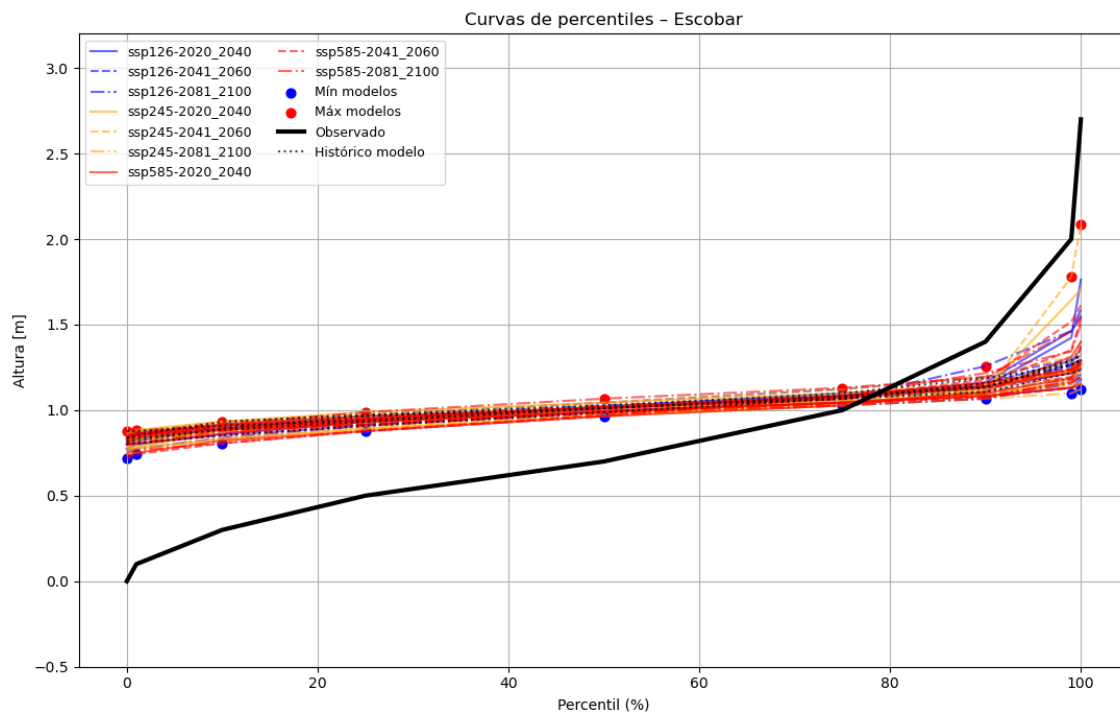


Figura 64. Curva de percentiles de Niveles - Escobar

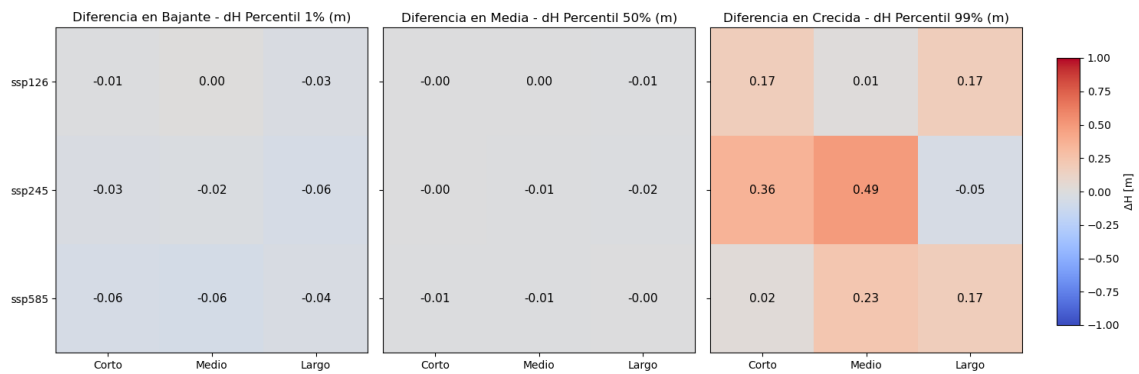


Figura 65. Anomalías de Niveles - Escobar

Gumbel - Extremos (Altura)

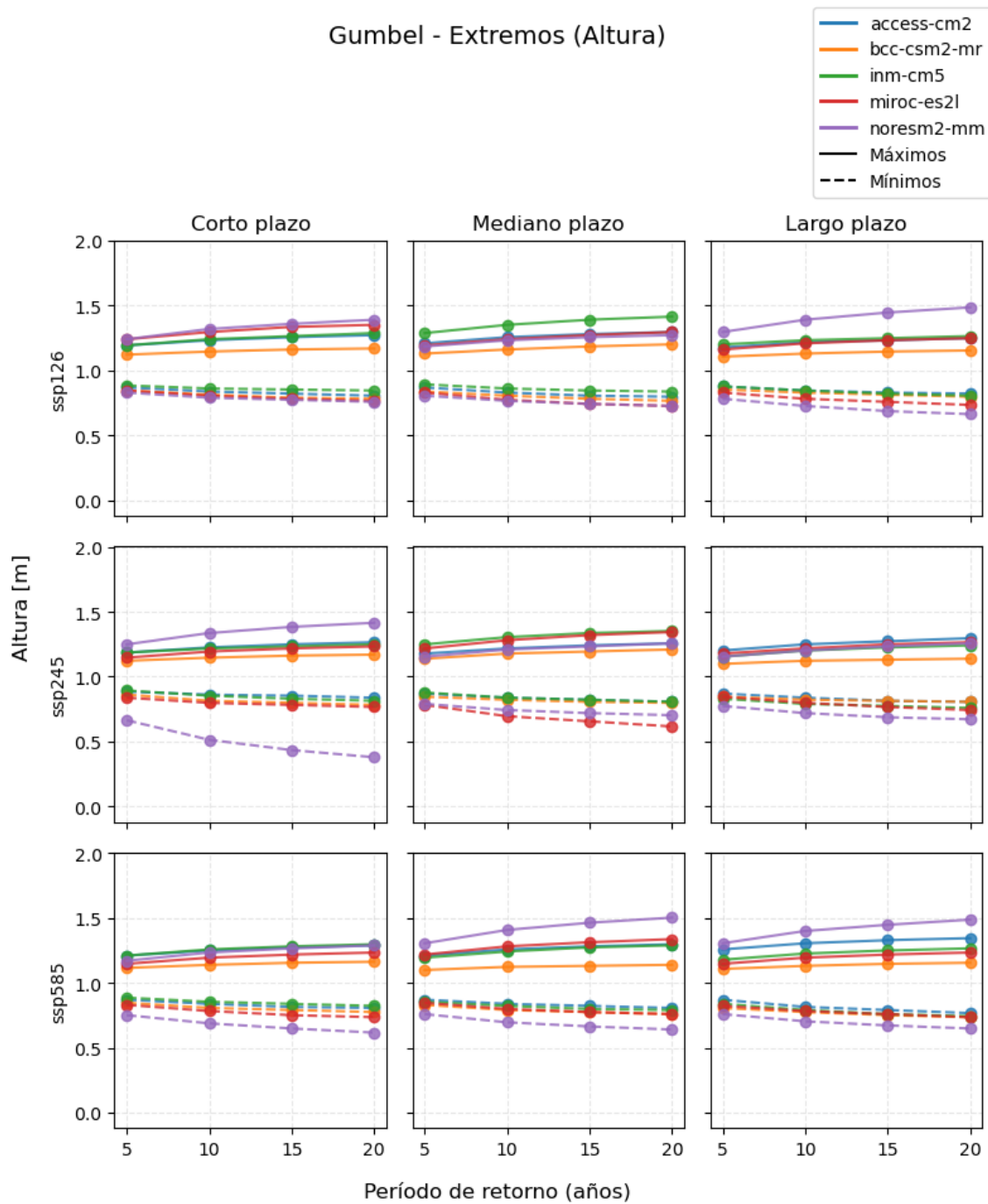


Figura 66. Ajuste de valores extremos - Escobar

4.2. Resumen de resultados

En esta sección se presentan las anomalías de caudales y niveles a lo largo del tramo del río Paraná, incluyendo parcialmente el río Coronda. Los resultados confirman de manera integrada lo observado en cada una de las tomas analizadas previamente.

En el caso de los caudales, se observa que a partir de la confluencia con el río Paraguay las anomalías asociadas a condiciones de bajante tienden a disminuir en magnitud (Figura 67). Asimismo, el análisis desagregado por condición hidrológica (Figura 68) muestra que, en términos generales, el sistema presenta una tendencia predominante hacia anomalías negativas. La principal diferencia entre sectores no radica en el signo de las anomalías, sino en su dispersión. En condiciones de crecida, si bien se registran anomalías positivas, estas corresponden a casos más aislados dentro del conjunto de simulaciones, manteniéndose la tendencia global hacia valores relativamente bajos.

En cuanto a los niveles, se destaca el efecto regulador del embalse de Yacyretá, que reduce significativamente las anomalías en su entorno inmediato, para luego observarse un incremento progresivo hacia aguas abajo. Entre las secciones de Corrientes y San Nicolás se evidencian extremos relativamente consistentes. En Victoria se identifica el límite superior impuesto por la expansión hacia la planicie del delta, mientras que en Escobar se observa el límite inferior asociado a la influencia del estuario del Río de la Plata.

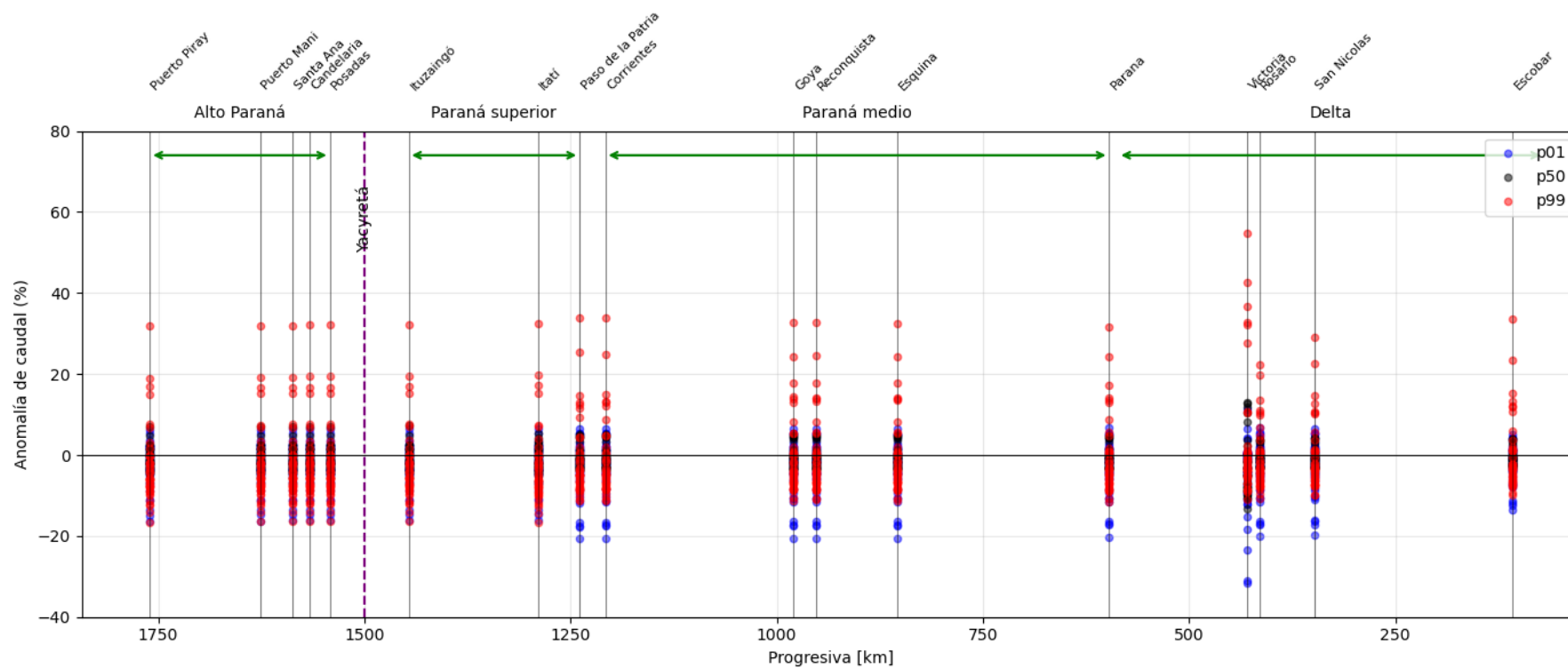


Figura 67. Anomalía de caudales en todas las tomas

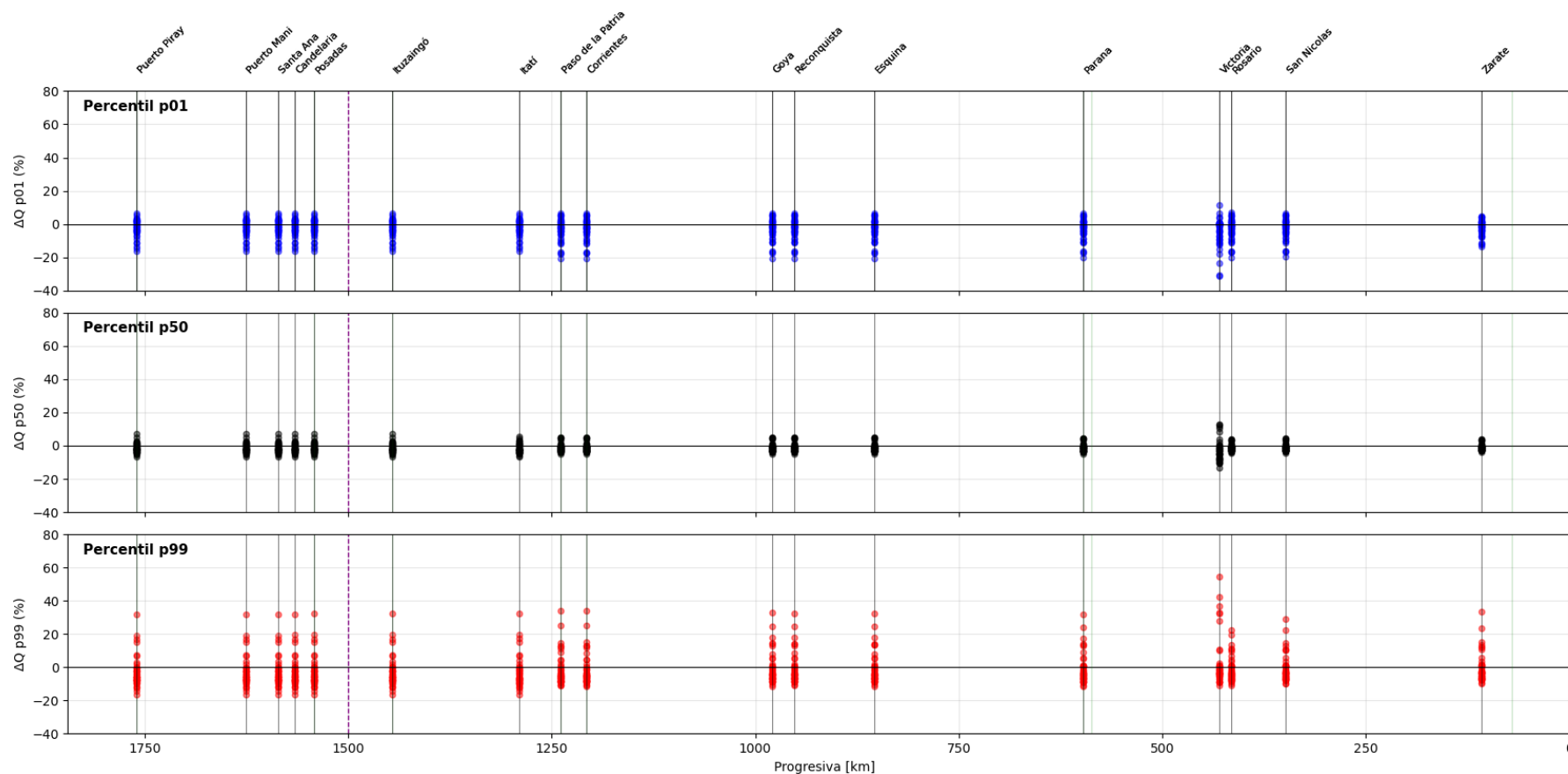


Figura 68. Anomalía de caudales en todas las tomas - desagregado por condición hidrológica

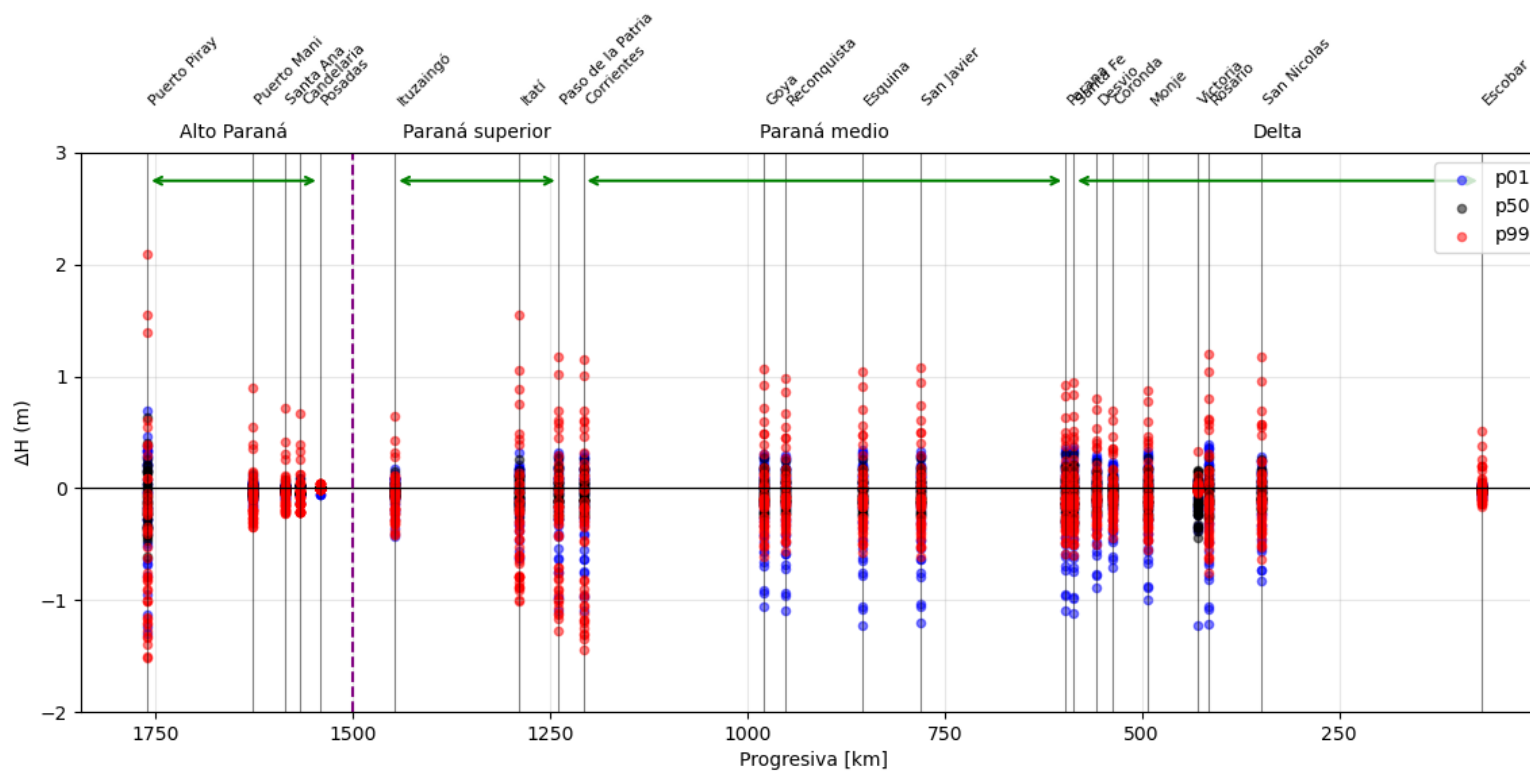


Figura 69. Anomalía de niveles en todas las tomas

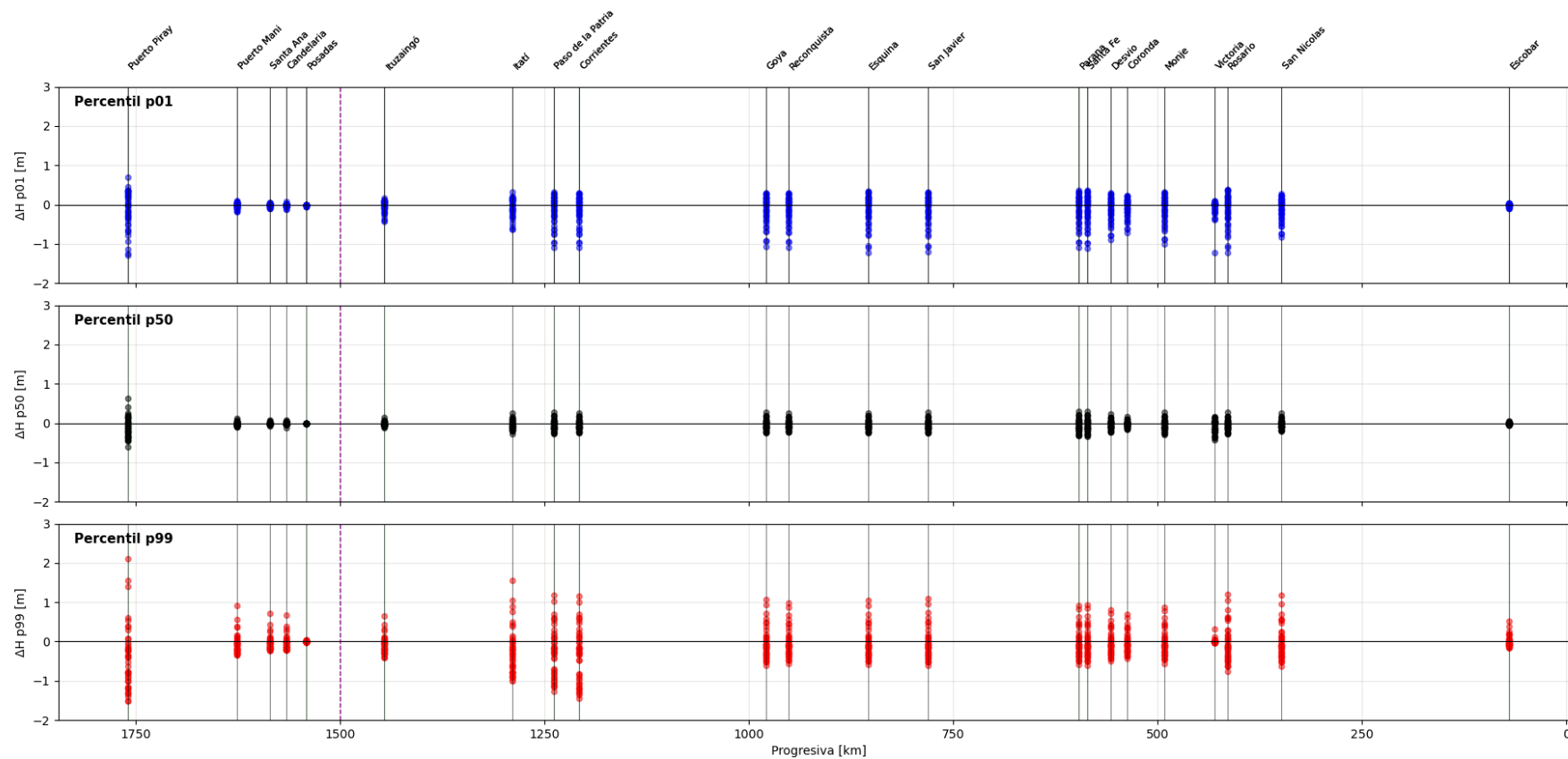


Figura 70. Anomalía de niveles en todas las tomas - desagregado por condición hidrológica

5. ACLARACIÓN

Los percentiles de caudales y niveles presentados en este estudio representan la respuesta de los modelos para los distintos escenarios de cambio climático analizados y deben interpretarse principalmente en términos de anomalías respecto de las condiciones históricas, más que como valores absolutos.

Durante la evaluación de los resultados se observó que las curvas de excedencia obtenidas para los escenarios futuros presentan una amplitud inferior a la registrada en las series históricas observadas. La menor amplitud de las curvas de excedencia simuladas no implica necesariamente una reducción de la variabilidad hidrológica futura, sino que responde, en parte, a las características de la cadena de modelación utilizada (forzantes climáticos, modelo hidrológico e hidráulico y su representación de los procesos físicos). Por ello, las proyecciones son más robustas para estimar la magnitud y el sentido del cambio (anomalía) que para reproducir la distribución absoluta de frecuencias. En consecuencia, el uso directo de los valores absolutos de los percentiles puede conducir a una subestimación de la variabilidad natural del sistema.

Por este motivo, se recomienda que los productos sean utilizados de la siguiente manera:

- Caudales: utilizar las anomalías (diferencias o variaciones porcentuales, según corresponda) obtenidas para cada percentil y aplicarlas sobre las curvas de excedencia históricas de referencia. Este procedimiento preserva la variabilidad observada históricamente e incorpora la señal proyectada por los escenarios de cambio climático.
- Niveles: se desaconseja el empleo directo de las anomalías derivadas de las curvas de excedencia de niveles, ya que la reducción de su amplitud está

influenciada no solo por la respuesta hidrológica del modelo sino también por las características topográficas e hidráulicas representadas en el dominio de cálculo. En estos casos, se recomienda aplicar las anomalías a los caudales históricos y posteriormente transformar dichos caudales en niveles mediante las relaciones hidrométricas (curvas H-Q o modelos hidráulicos) correspondientes a cada estación.

Los productos de este estudio deben considerarse como una herramienta para estimar el efecto relativo del cambio climático sobre el régimen hidrológico, mientras que la obtención de valores absolutos consistentes debe realizarse utilizando como base las condiciones hidrológicas históricas y las relaciones hidráulicas locales.

6. CONCLUSIONES

- Se simularon los escenarios futuros correspondientes a los SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5, los cuales fueron previamente obtenidos a partir de la modelación hidrológica y utilizados como condiciones de borde en el modelo hidrodinámico. Para cada escenario se consideraron cinco modelos climáticos distintos, con el fin de representar la incertidumbre asociada a las proyecciones climáticas.
- Asimismo, los análisis se realizaron para distintos horizontes temporales, tomando como período de referencia el histórico 2005–2015, lo que permitió evaluar las variaciones proyectadas respecto de condiciones actuales y caracterizar la evolución del sistema bajo diferentes trayectorias de forzamiento climático.
- Se procesaron percentiles de niveles y caudales, trabajando con promedios entre modelos climáticos para la representación del percentil 50, mientras que los percentiles 0.1 y 0.9 se construyeron a partir de envolventes de los distintos modelos, con el fin de caracterizar el rango de incertidumbre de las proyecciones.
- Las curvas de percentiles, en comparación con la condición histórica observada, presentan en general una consistencia satisfactoria, aunque se identifican algunas diferencias puntuales, principalmente asociadas a eventos de crecida.
- Asimismo, se observa que, en términos generales, los resultados de la modelación tienden a presentar un rango de extremos inferior al registrado en

la serie hidrológica observada. Esta discrepancia constituye una limitación del enfoque adoptado, particularmente en la representación de valores extremos, lo cual debe ser tenido en cuenta al momento de la interpretación de los resultados.

- Se analizaron y ajustaron distribuciones a los valores extremos de niveles y caudales, adoptándose la distribución de Gumbel como la de mejor desempeño tanto para los valores mínimos como máximos. La selección se basó en la calidad del ajuste respecto de las series observadas y su capacidad para representar adecuadamente el comportamiento de los extremos.
- Los resultados se presentan para períodos de retorno de hasta 20 años, evidenciando en todos los casos un comportamiento compatible y consistente con lo obtenido a partir del análisis basado en percentiles. En conjunto, ambas metodologías muestran coherencia en la caracterización de los extremos, reforzando la robustez de los resultados obtenidos.
- Dado que Candelaria y Posadas se encuentran fuertemente condicionadas por el efecto de remanso generado por el embalse de Yacyretá, no se procesan resultados detallados en esta instancia. Esta condición hidráulica domina la dinámica local, reduciendo la sensibilidad del análisis a las variaciones de los forzantes climáticos considerados.
- Se destaca que, en todos los casos analizados, el escenario SSP5-8.5 presenta las mayores anomalías asociadas a condiciones de bajante, de manera consistente en todos los horizontes temporales evaluados.

- Se observa, además, que las anomalías de caudales se incrementan aproximadamente un 5% a partir del ingreso del río Paraguay. Este aumento se mantiene de forma consistente a lo largo de los distintos escenarios y horizontes analizados, evidenciando el rol del aporte del sistema Paraguay-Paraná en la modulación de las variaciones hidrológicas aguas abajo.
- Se observan fuertes condicionantes en las anomalías de niveles, asociados a las características del entorno geomorfológico e hidráulico del sistema. En particular, en sectores como Victoria, se evidencia que durante condiciones de aguas altas la interacción con la planicie de inundación actúa como un mecanismo de regulación, limitando los incrementos de nivel.
- Por otro lado, en condiciones de aguas bajas, se identifica la influencia de efectos de remanso vinculados a la operación del sistema Yacyretá y del Río de la Plata, los cuales condicionan la propagación de las variaciones de nivel y modulan la respuesta hidrodinámica del tramo inferior del sistema.

7. REFERENCIAS

INA (2023). SDP N° 23/2022 - “Estudio sobre variables de diseño para la provisión de agua potable en las principales localidades sobre el Río Paraná para distintos escenarios de clima futuro (etapa 1) - Proyecto ARG 19003: Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático”.

Dominguez Ruben, L., Szupiany, R., Ramonell, C. y García Marcelo (2023), Hydrogeomorphological and sedimentological processes along the major fluvial-lacustrine delta of the Paraná River (Argentina): Their role in floodplain construction, Earth Surface Processes and Landforms, DOI: 10.1002/esp.5570.

HEC-RAS Manual (2010) HEC-RAS, Hydraulic, Reference Manual, Hydrologic Engineering Centre, Davis. Version 4.1.

Li, Z. y García, M.H. (2021), pyRiverBed: A Python framework to generate synthetic riverbed topography for constant-width meandering rivers, Computers & Geosciences, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104755>.

Re, M., Sabarots Gerbec, M., & Storto, L. (2015). Estadística de niveles en el Delta del río Paraná mediante modelación hidrodinámica. In VII Simposio Regional sobre Hidráulica de RIOS.

Sabarots Gerbec, M., Re, M., Storto, L. Análisis de repartición de caudales en bifurcaciones del delta del río Paraná. XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Buenos Aires, Argentina, 2018.

8. ANEXO

Se presentan las curvas percentiles de niveles para las distintas ubicaciones desagregados por escenario de cambio climático y horizonte.

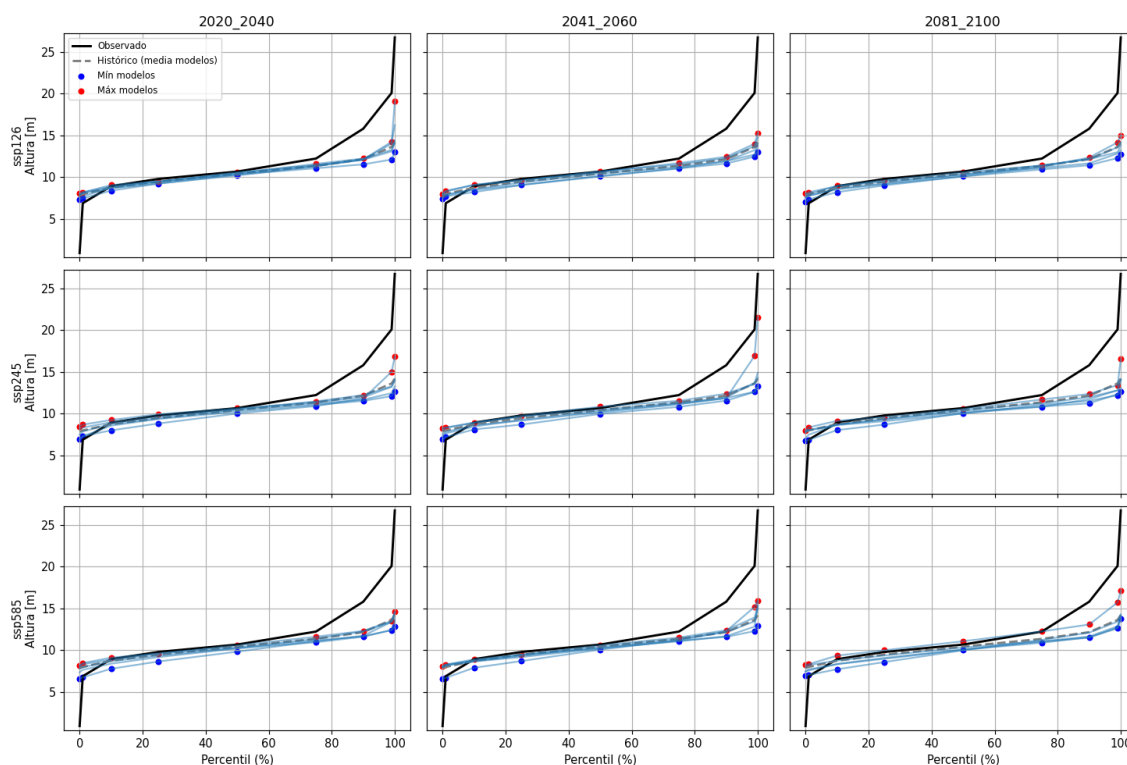


Figura 71. Curva de percentiles de Niveles desagregado - Puerto Piray

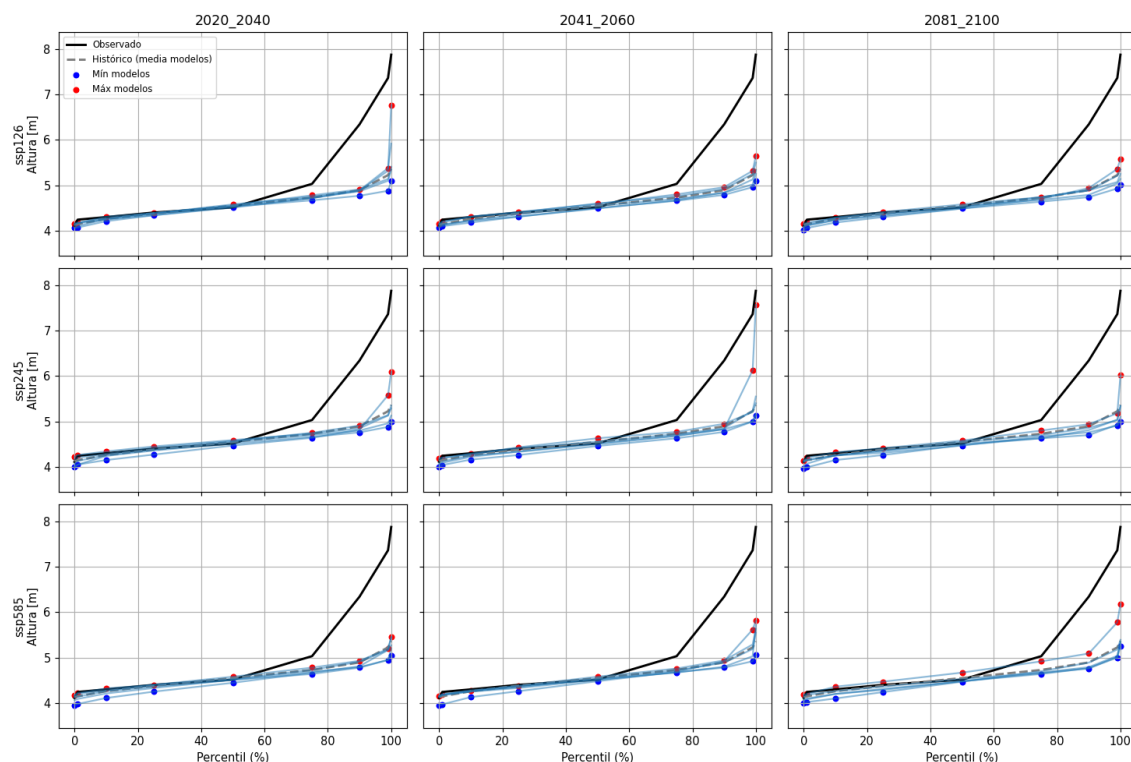


Figura 72. Curva de percentiles de Niveles desagregado - Corpus

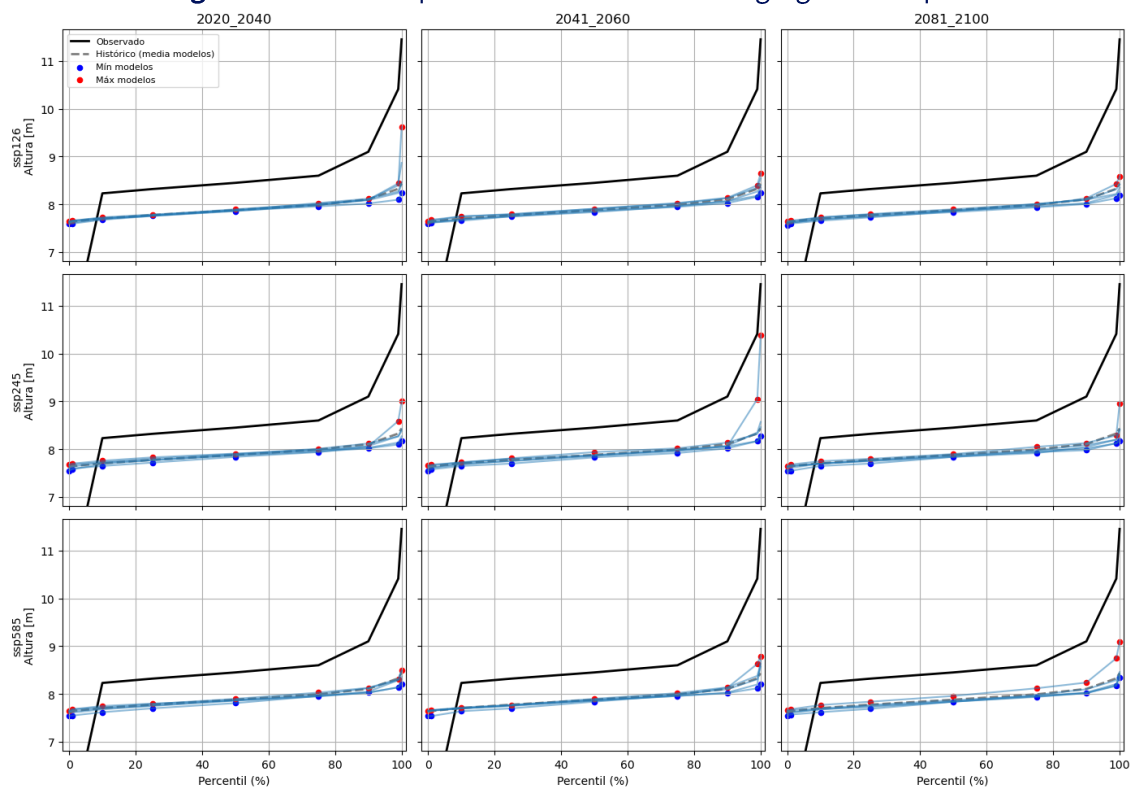


Figura 73. Curva de percentiles de Niveles desagregado - Santa Ana

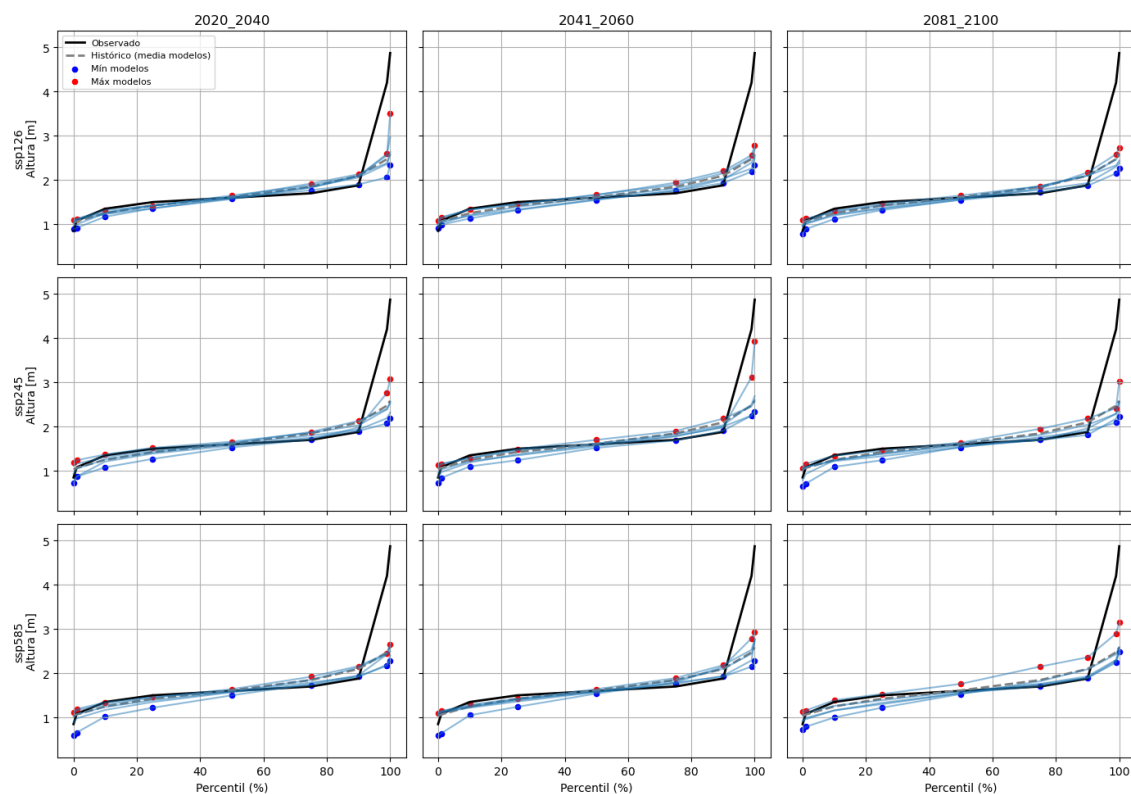


Figura 74. Curva de percentiles de Niveles desagregado - Ituaingó

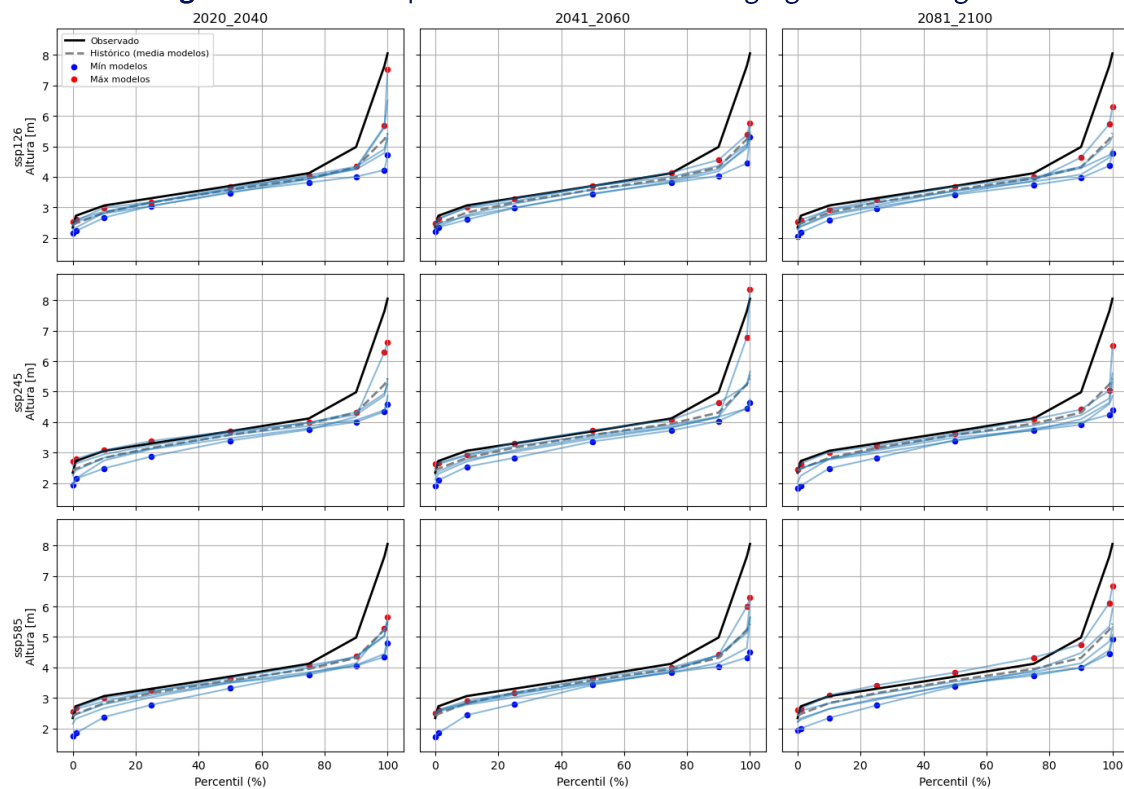


Figura 75. Curva de percentiles de Niveles desagregado - Itatí

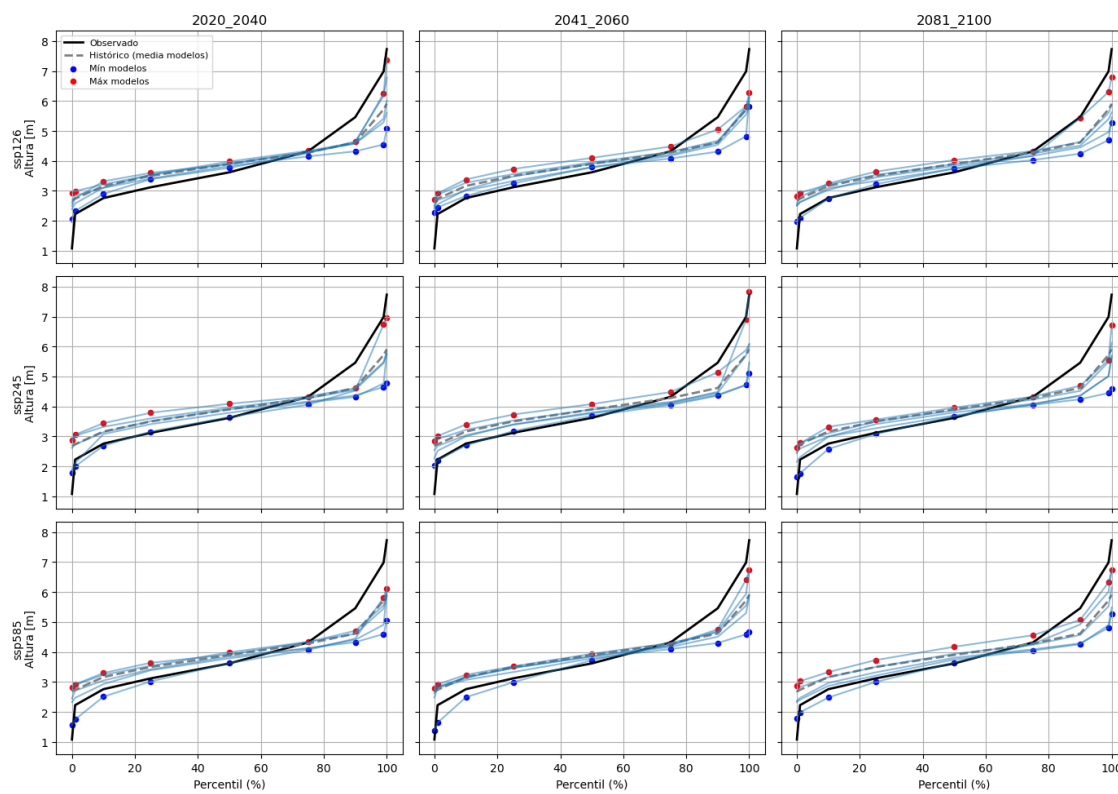


Figura 76. Curva de percentiles de Niveles desagregado - Paso de la Patria

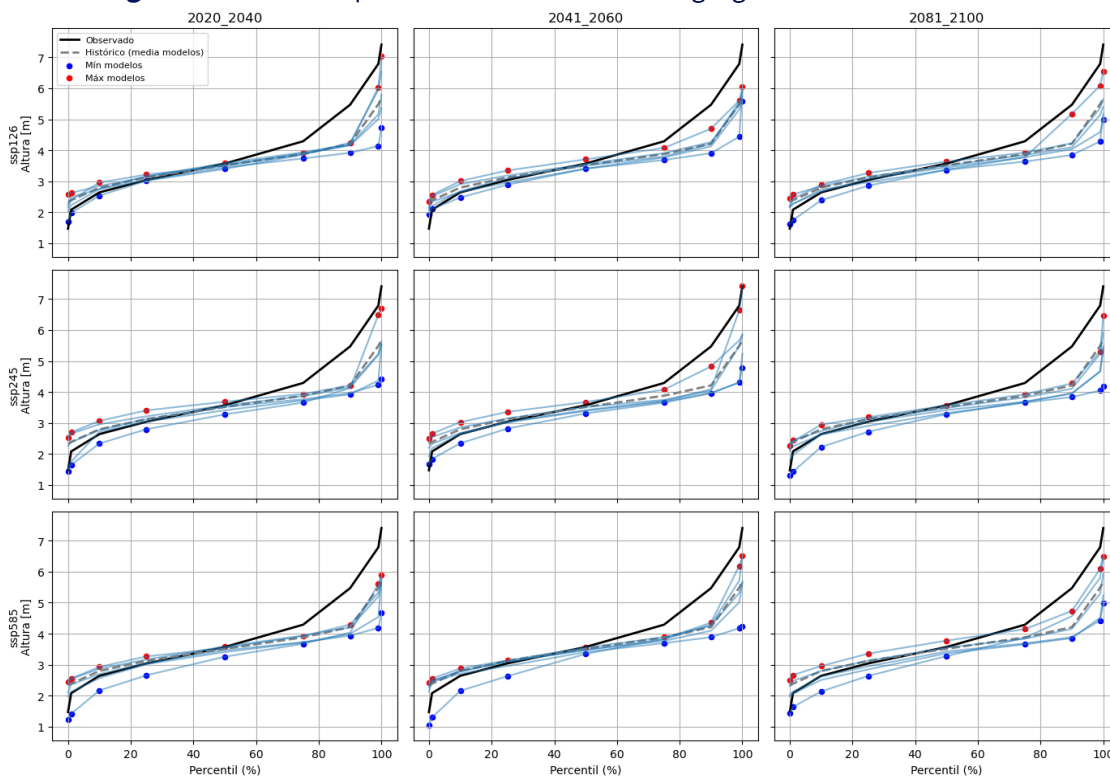


Figura 77. Curva de percentiles de Niveles desagregado – Corrientes

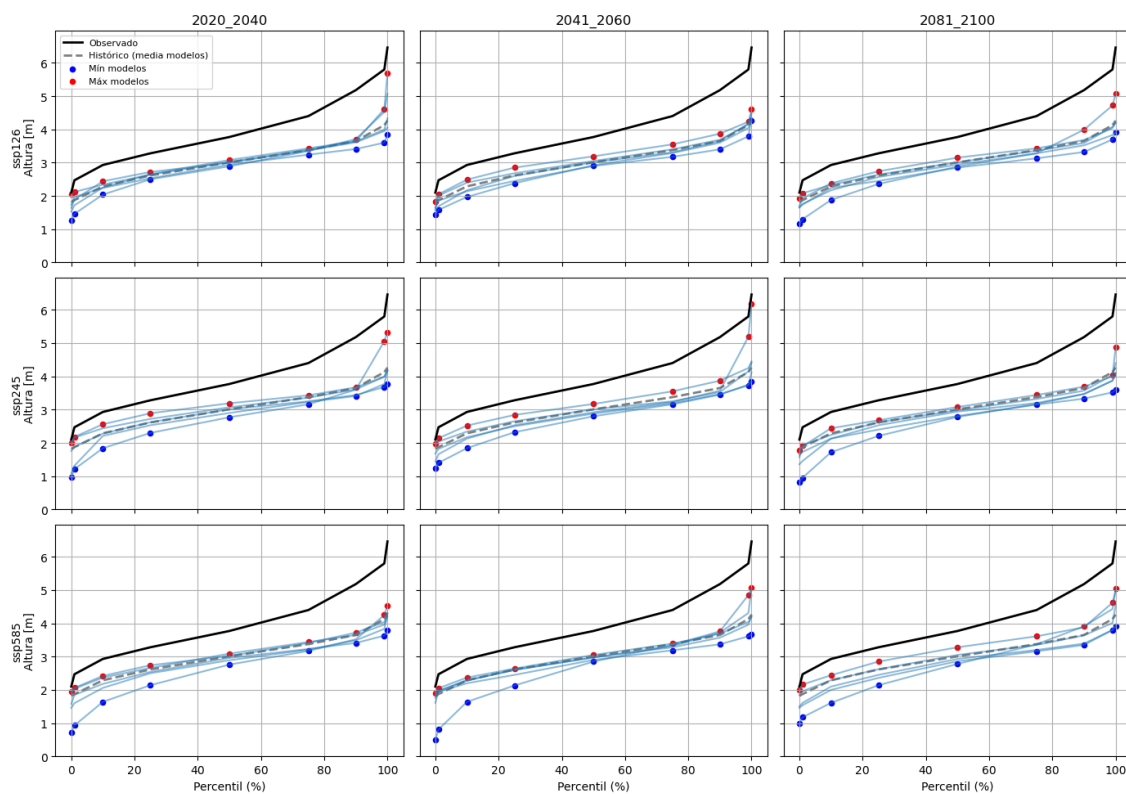


Figura 78. Curva de percentiles de Niveles desagregado - Goya

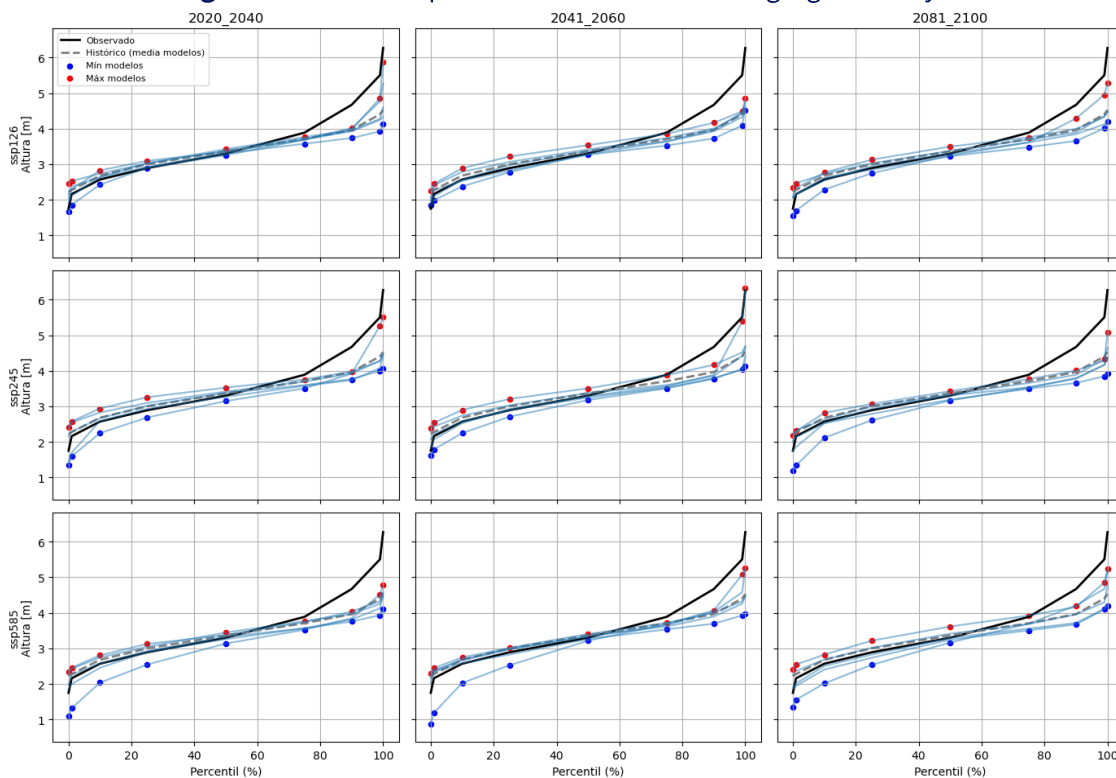


Figura 79. Curva de percentiles de Niveles desagregado - Reconquista

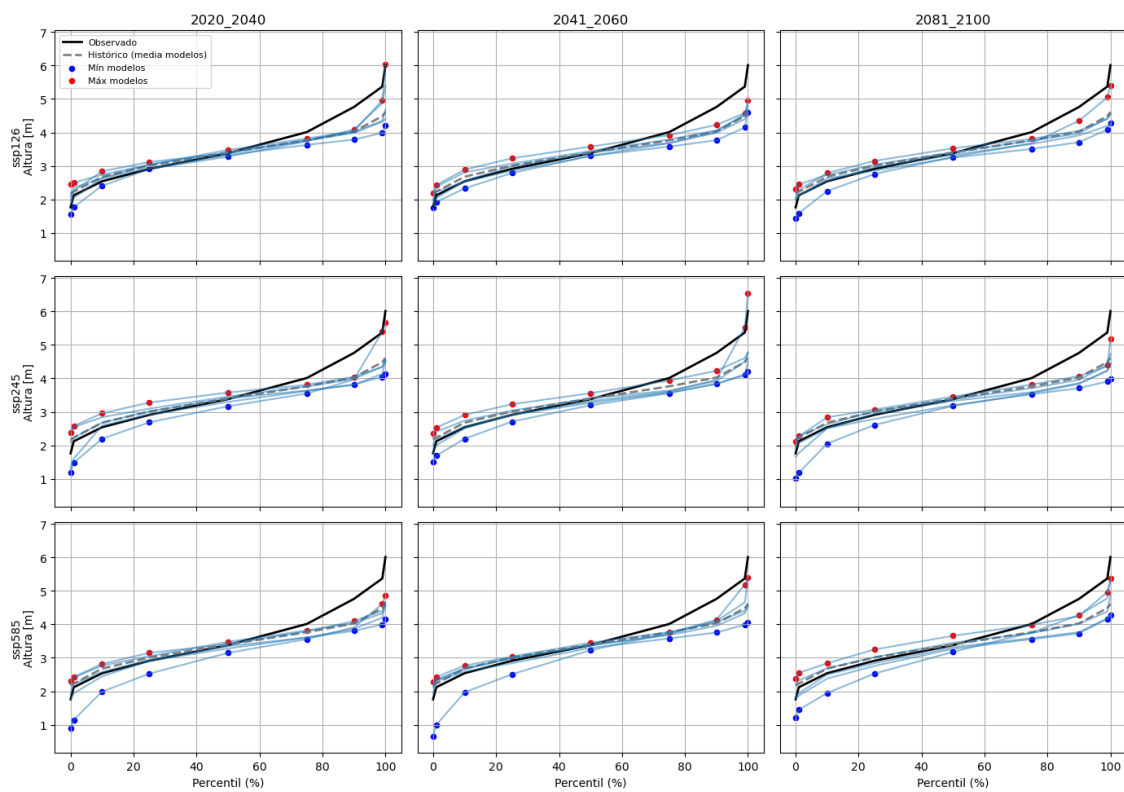


Figura 80. Curva de percentiles de Niveles desagregado - Esquina

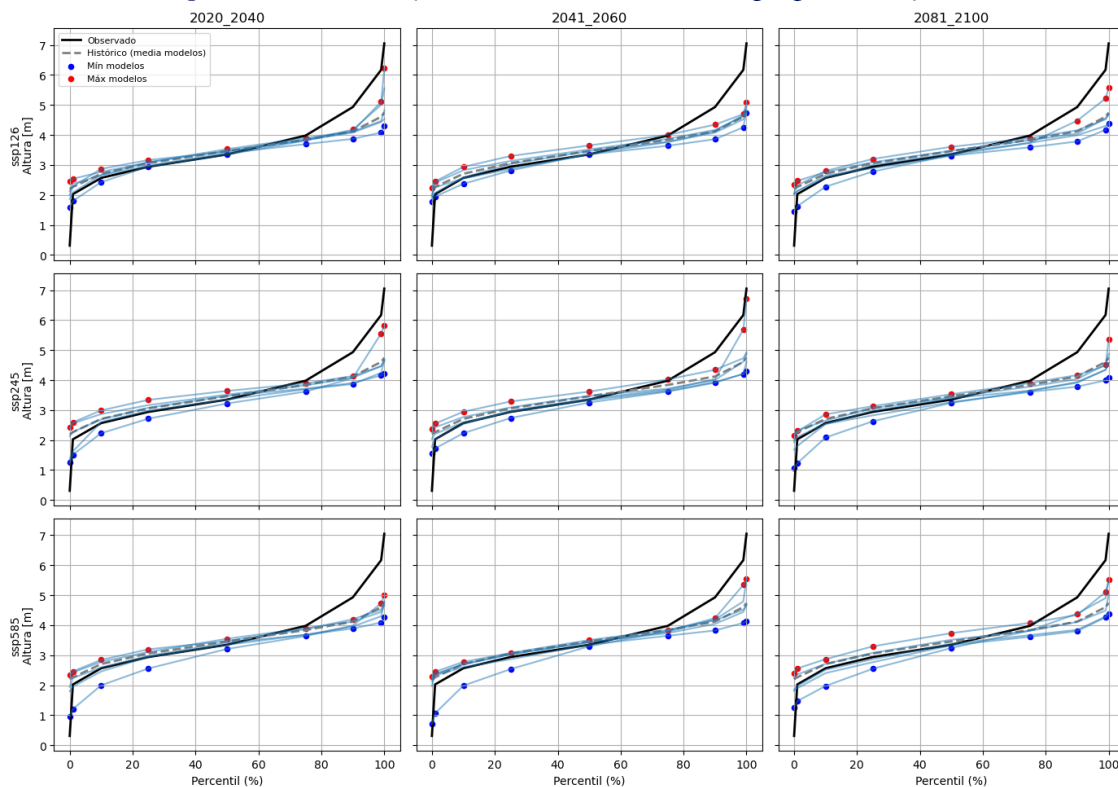


Figura 81. Curva de percentiles de Niveles desagregado - San Javier

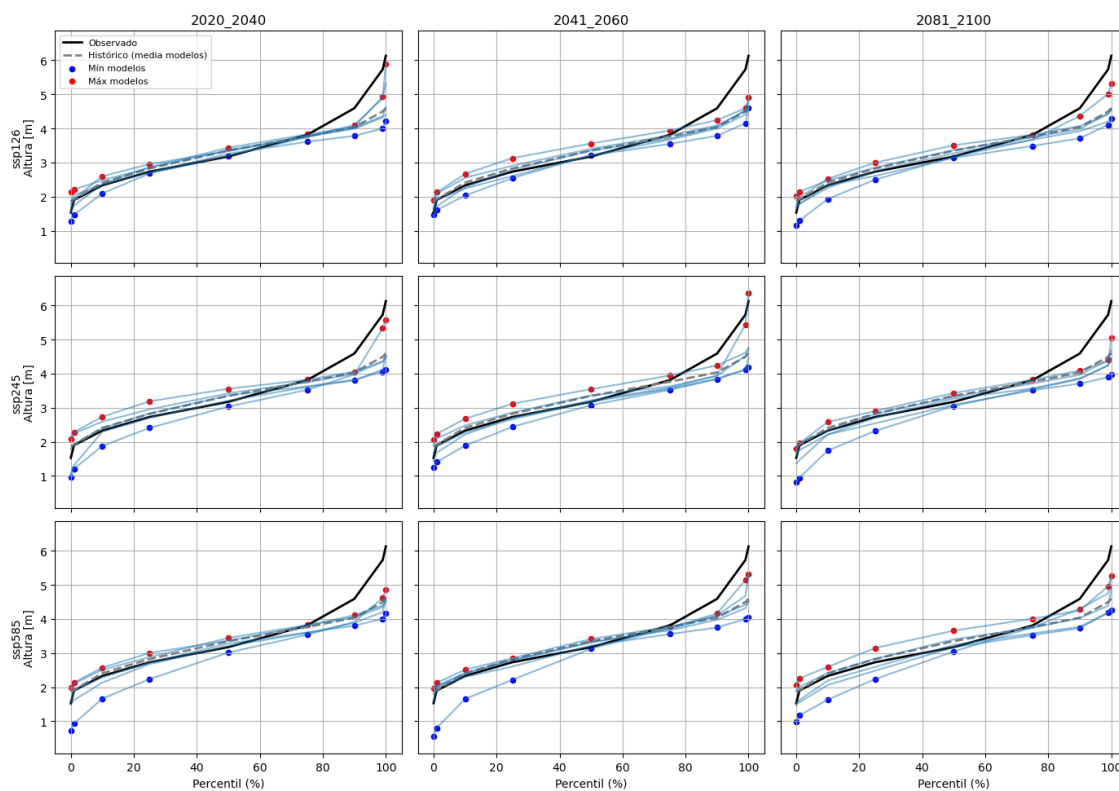


Figura 82. Curva de percentiles de Niveles desagregado - Santa Fe

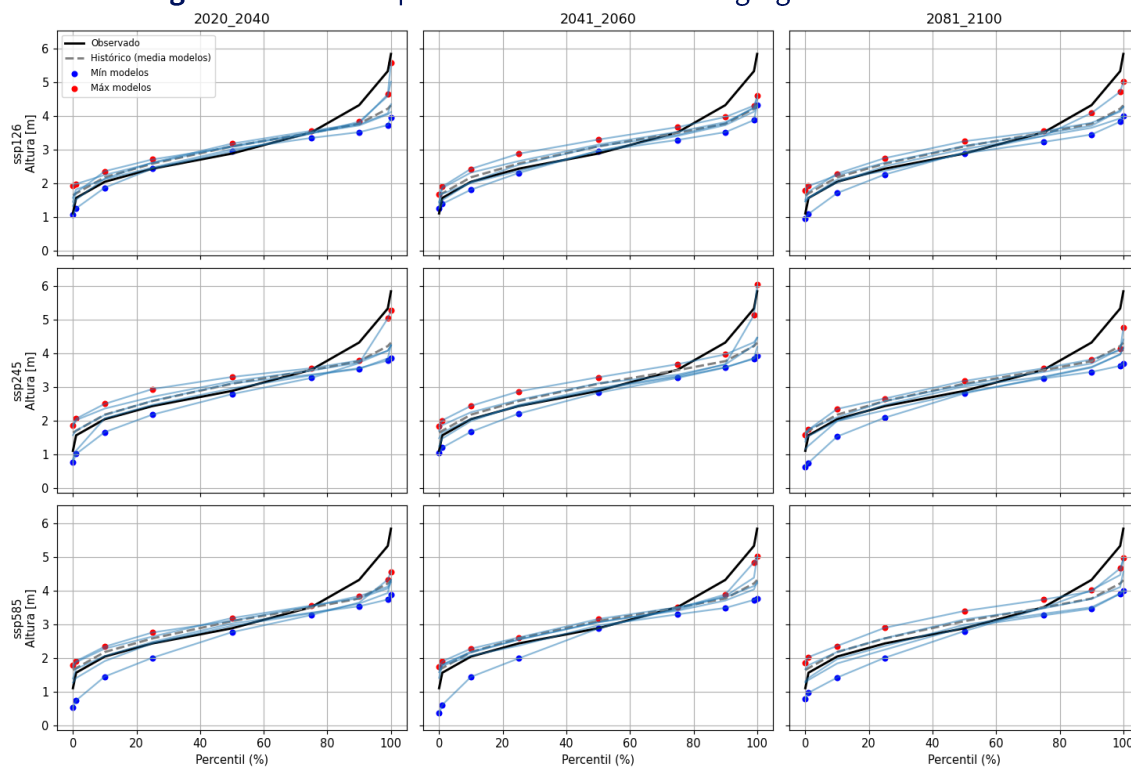


Figura 83. Curva de percentiles de Niveles desagregado - Paraná

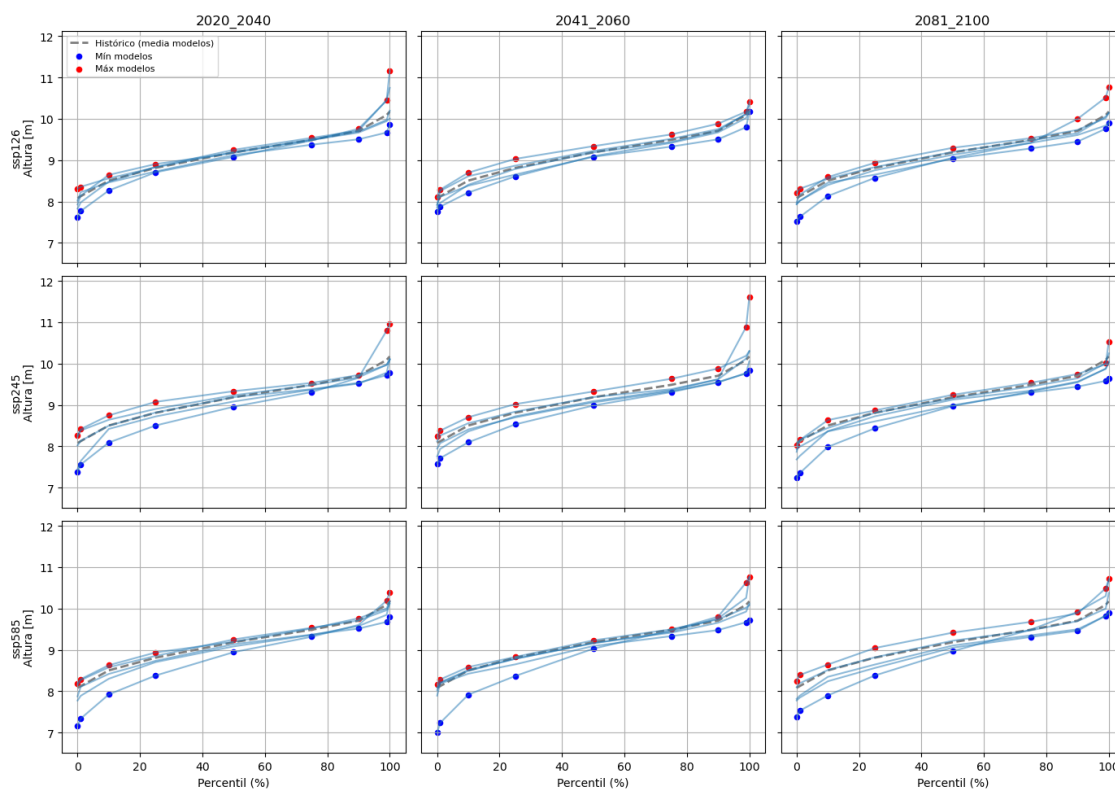


Figura 84. Curva de percentiles de Niveles desagregado - Desvío Arijón

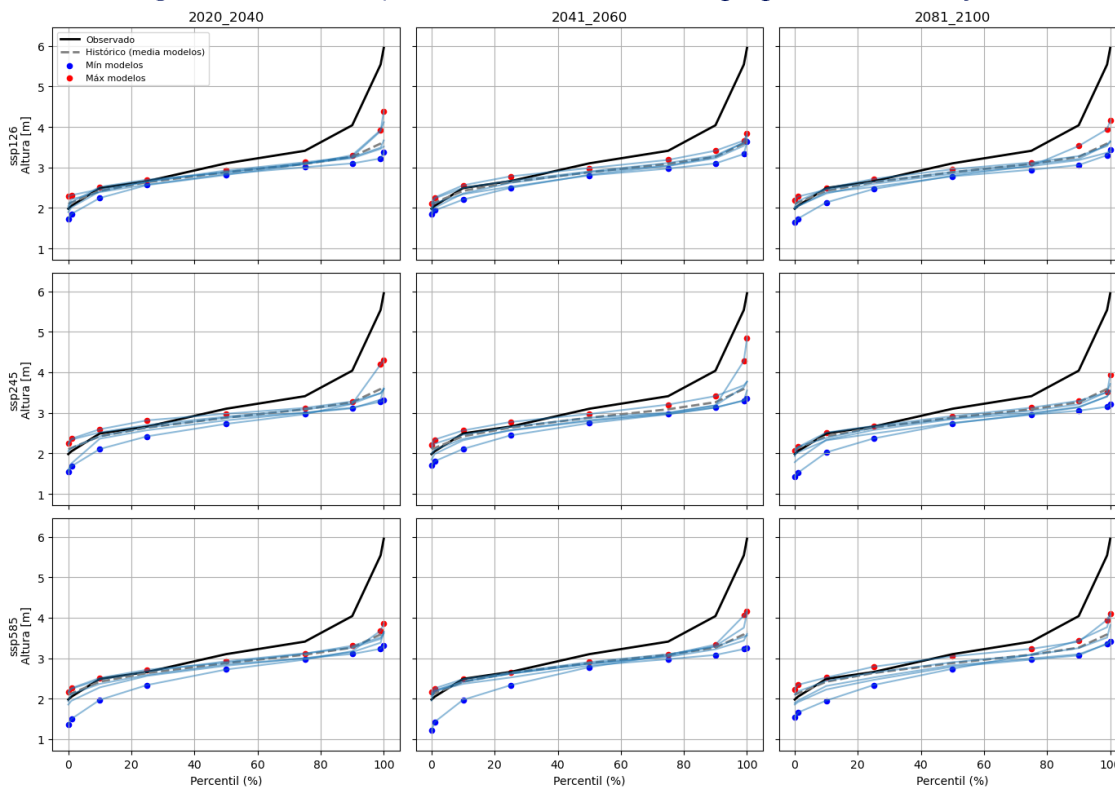


Figura 85. Curva de percentiles de Niveles desagregado - Coronda

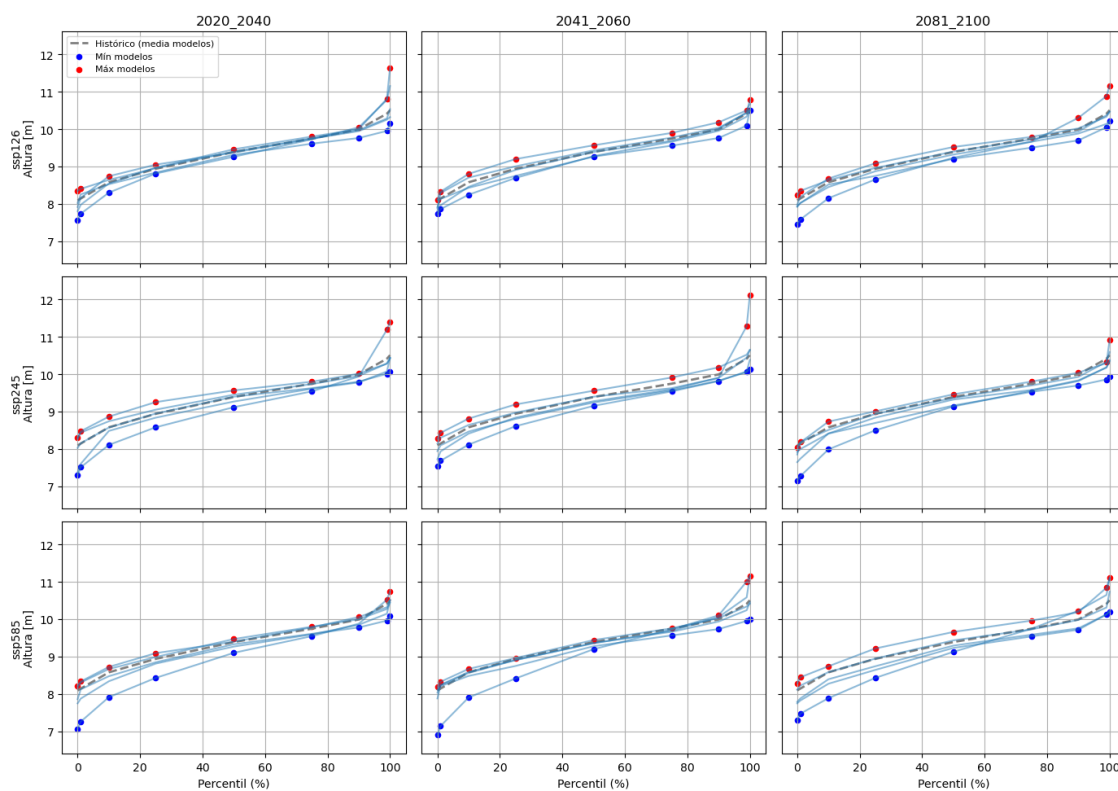


Figura 86. Curva de percentiles de Niveles desagregado - Monje

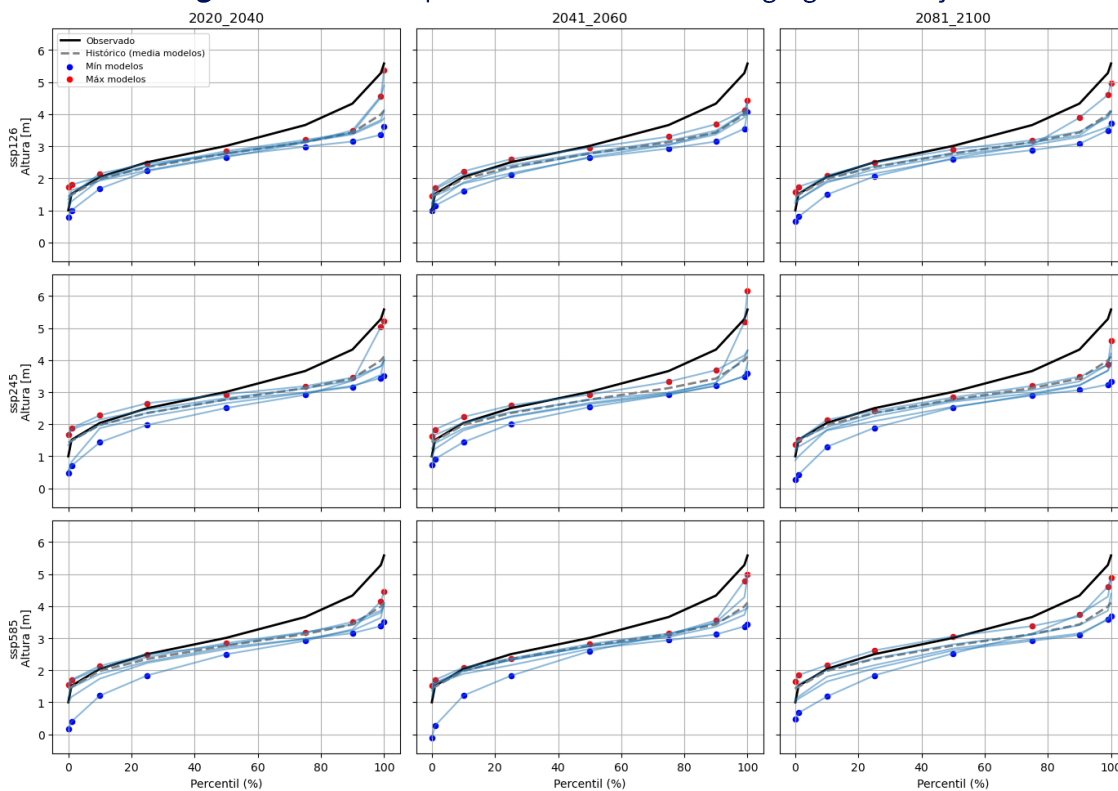


Figura 87. Curva de percentiles de Niveles desagregado - Rosario

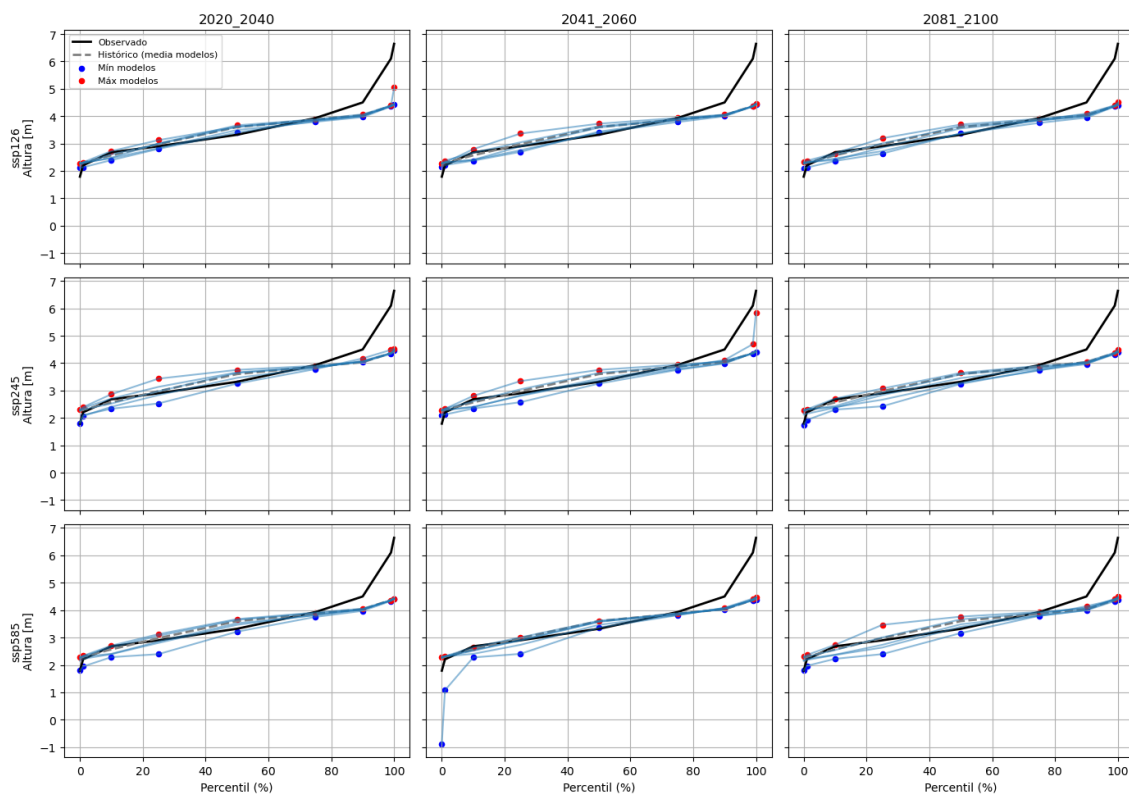


Figura 88. Curva de percentiles de Niveles desagregado - Victoria

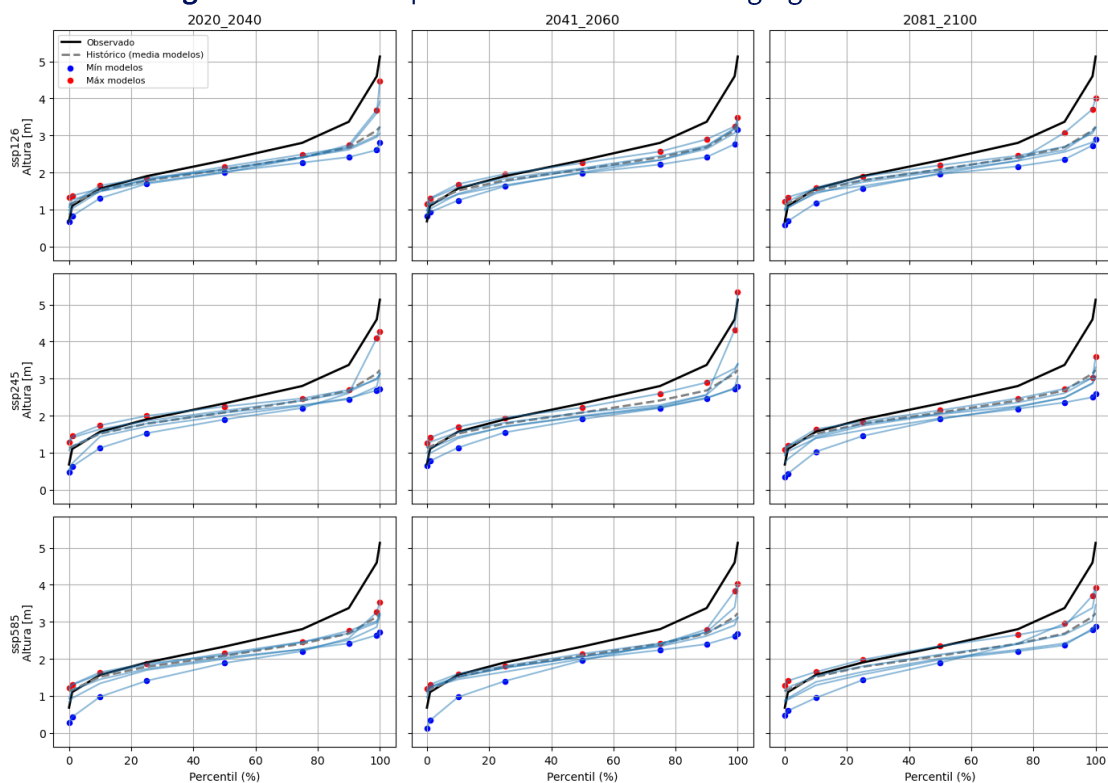


Figura 89. Curva de percentiles de Niveles desagregado - San Nicolás

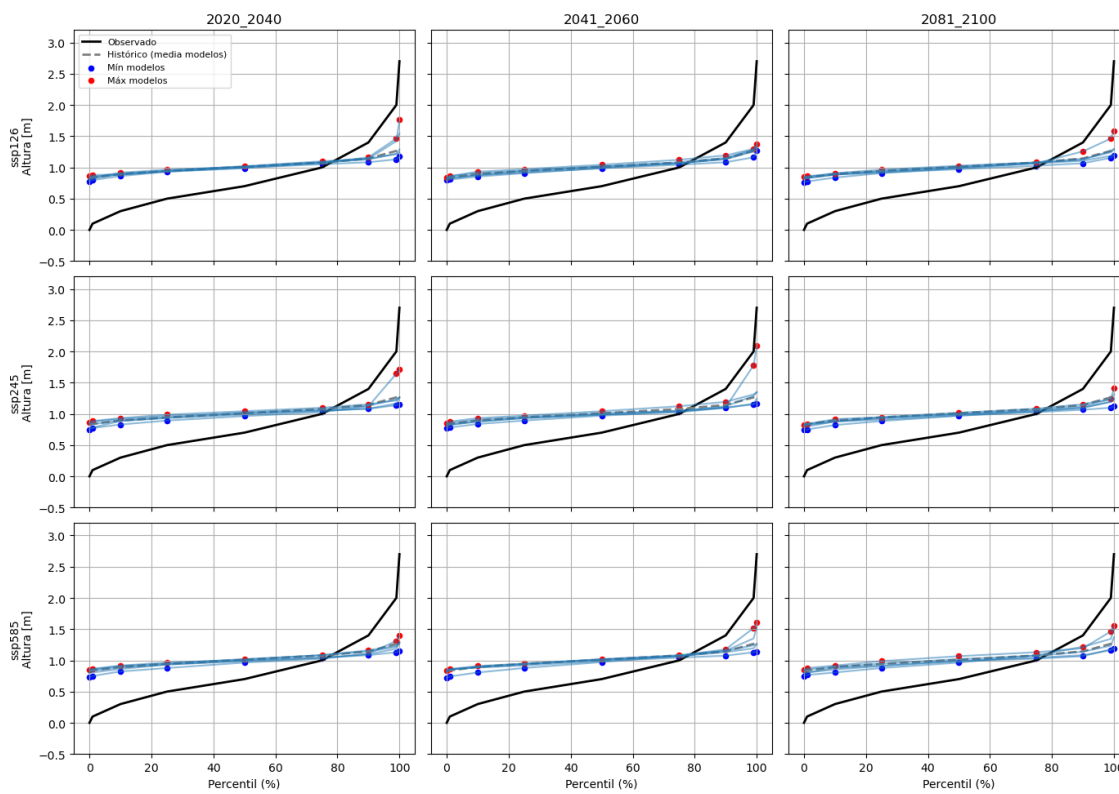


Figura 90. Curva de percentiles de Niveles desagregado - Escobar