

Informe:

Escenarios Futuros de Cambio Climático, incluyendo el análisis de la precipitación en las ciudades solicitadas, de acuerdo al Ítem IV, Inciso B.

Autoría: Dr. Ricardo Castro-Díaz (Consultor Responsable), en colaboración con Mag. Ignacio Gatti (Consultor Asistente)

Diciembre de 2023.

Este documento ha sido elaborado en el marco de la implementación del proyecto regional (Argentina-Uruguay) Adaptación al cambio climático en ciudades y ecosistemas costeros vulnerables del río Uruguay. Se ha recibido una donación del Fondo de Adaptación para su realización y se implementa a través de CAF (Banco de Desarrollo de América Latina). Los componentes regionales del proyecto son ejecutados por PNUD y los componentes nacionales son ejecutados, respectivamente, por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Argentina y por la Corporación Nacional para el Desarrollo de Uruguay.

El análisis, las observaciones, las recomendaciones de políticas que contiene este documento corresponden exclusivamente a quienes lo han preparado y no reflejan

necesariamente las opiniones de las entidades implementadoras y ejecutoras del Proyecto.

Highlights

1. Entre Ríos muestra un incremento de las precipitaciones medias del 20% en las últimas décadas (1960-2010), probablemente asociado a cambios en ENOS. Sin embargo, hubo un periodo previo más seco y árido entre 3500-1000 años AP según análisis paleoclimáticos.
2. La provincia registra una marcada variabilidad climática histórica en términos de precipitación, con alternancia de ciclos húmedos y secos que han provocado tanto severas inundaciones como intensas sequías.
3. Se proyecta un aumento sustancial en la frecuencia e intensidad de eventos extremos de precipitación en Entre Ríos, con registros diarios que podrían superar los 350 mm hacia fines de siglo según el escenario RCP 8.5. Esto duplicaría los máximos históricos.
4. Los mayores incrementos en precipitaciones extremas se concentrarían en el norte del área de estudio, especialmente en los departamentos de Colón y Concepción del Uruguay, de acuerdo a las interpolaciones realizadas.
5. Si bien las precipitaciones medias no cambiarían significativamente, la ocurrencia de eventos por encima de los 500 mm mensuales se multiplicaría, pasando de un máximo de 3-4 casos históricos a entre 5 y 15 casos futuros hacia 2039 para ambos escenarios RCP.

Resumen

El presente informe analiza las tendencias y proyecciones de precipitación para la provincia de Entre Ríos, Argentina, enfocándose en los departamentos de Concordia, Colón, Uruguay y Gualguaychú. Se parte con una introducción sobre los escenarios RCP de emisiones de gases de efecto invernadero que se utilizan en los modelos climáticos para proyectar el cambio climático futuro, explicando las diferencias entre el escenario RCP 4.5 de estabilización moderada y el RCP 8.5 más pesimista.

Se presenta el contexto pre e histórico climático de Entre Ríos, indicando que investigaciones sugieren la existencia de un periodo más árido entre 3500-1000 AP, contrastante con el 20% de exceso de agua actual por precipitaciones. De esta manera, se establece la dimensión de peligrosidad asociada a la distribución y variabilidad de las precipitaciones en la región de estudio para los cuatro Departamentos. Se explicita el comportamiento de ciclos secos y húmedos extremos que impactan la producción agropecuaria, con aumento de áreas cultivables beneficiadas por mayor humedad y precipitaciones.



En la metodología, se utilizan datos de la Tercera Comunicación Nacional de Argentina a la CMNUCC, en particular el capítulo sobre tendencias y proyecciones climáticas para la región Húmeda del país, que comprende a Entre Ríos. Emplea los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de los modelos climáticos globales y anida el modelo regional Eta en ellos para obtener mayor resolución sobre la provincia. Se presentan los resultados del análisis para cada departamento, con gráficos de evolución de la precipitación media mensual en los períodos histórico, 2015-2039 y 2075-2099 y también analiza en detalle los eventos extremos mayores a 500 mm.

Por último se concluye que en todos los departamentos la precipitación media mensual histórica y futura cambia poco, pero se proyecta un aumento muy significativo de eventos extremos según ambos RCP, con máximos de hasta 15 eventos sobre 500 mm en el norte de Colón hacia fines de siglo.

Introducción

Los RCP (Representative Concentration Pathways) son escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero utilizados en los modelos climáticos para proyectar el cambio climático futuro. Chou et al., (2004) presentan diversas simulaciones regionales anidadas para Sudamérica utilizando los RCP 4.5 y 8.5. El primero es un escenario más moderado de estabilización, donde las emisiones se estabilizan a mediados de siglo para luego descender, mientras que el segundo es el escenario más pesimista, que supone que las emisiones continuarán aumentando fuertemente durante todo el siglo XXI.

Los resultados de Chou et al., (2004) muestran que ambos escenarios proyectan un calentamiento para toda Sudamérica, pero es mucho mayor en el RCP 8.5, especialmente hacia fin de siglo (2071-2100) con aumentos de temperatura de hasta 9°C según el modelo Eta-HadGEM1.

En términos generales se puede indicar que el RCP 8.5 representa un escenario climático futuro mucho más severo para Sudamérica, con mayor calentamiento, menores precipitaciones en zonas claves y eventos extremos más frecuentes e intensos. El RCP 4.5 tiene impactos más moderados pero igual significativos. Los resultados resaltan la necesidad de mitigación de emisiones a nivel global para evitar los peores impactos en la región.

El contexto pre- e histórico climático para la Provincia de Entre Ríos

Según Tonni (2006) las investigaciones paleoclimáticas y paleobiológicas del Holoceno tardío en Argentina, con énfasis en los últimos 1000 años para la Provincia de Entre Ríos sugieren la existencia de condiciones más áridas que las actuales entre ca. 3500-1000 AP, lo que concuerda con la hipótesis de un evento semiárido a nivel regional para ese periodo. A partir de dicho análisis de moluscos terrestres de la Formación San Guillermo (i.e. *Gastrocopta nodosaria*, *Scolodonta semperi* y *Bulimulus apodemetes*) en el Departamento de Diamante, sugiere que en ese lapso hubo en Entre Ríos un periodo árido en la región

¹ *Eta* es el modelo climático regional desarrollado en el Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) de Brasil. Mientras que HadGEM2-ES es un modelo climático global desarrollado por el Hadley Centre del Servicio Meteorológico del Reino Unido y pertenece a la familia de modelos HadGEM. Al anidar o incrustar el modelo Eta dentro del HadGEM2-ES, se está haciendo una regionalización o downscaling climático. Esto significa tomar los resultados del modelo global a menor resolución (HadGEM2-ES) y dinamizarlos a mayor resolución sobre la región de interés (Sudamérica) utilizando el modelo regional (Eta). De esta manera, Eta-HadGEM se refiere específicamente a una simulación climática regional generada por el modelo Eta, forzado en sus condiciones de contorno por el modelo global HadGEM2-ES. Permite obtener proyecciones de cambio climático a mayor resolución espacial sobre Sudamérica.



pampeana entre 3500-1000 AP. Igualmente, la vegetación xerofítica que prospera en suelos desarrollados sobre los sedimentos eólicos en este sector de la Provincia, constituye también evidencia de ese periodo más seco indicando que su depositado habría resultado de la aridez del Holoceno tardío entre 3500-1400 AP. Sin embargo, esto contrasta con el periodo contemporáneo donde se presenta un 20% de exceso de agua causado por precipitaciones en la región.

Los cambios climáticos acontecidos en la Provincia son evidencia del paso de condiciones climáticas beneficiosas para la humedad y la consecuente precipitación. Probablemente estas implicaciones son considerables incluso ante el escenario de deforestación acelerada pero que influye positivamente en la expansión de las áreas cultivables para soja, maíz, girasol y forrajeros.

La dimensión de la peligrosidad

Distribución de la precipitación

Derivado del trabajo de Aliaga et al. (2016) se puede considerar que la Región Pampeana que incluye la Provincia de Entre Ríos, relaciona la dependencia al secano y sus recursos hídricos para la producción agrícola de la zona. Actualmente esta región alterna periodos secos y húmedos tal como se presentó el periodo tardío, con mayor alternancia de dichos ciclos durante las últimas décadas. Entre 1977-2006 aumentaron las precipitaciones respecto a 1947-1976 (Ver Informe 2 de esta misma consultoría), especialmente en el noreste de Entre Ríos, propiciando la expansión agrícola que se ve beneficiada por el aumento de factores climático para el área cultivable debido al desplazamiento de la isohieta de 500 mm hacia el occidente. Ello implica un aumento de las áreas de alta precipitación con reducción de las áreas con baja precipitación en la región (Figura 1).

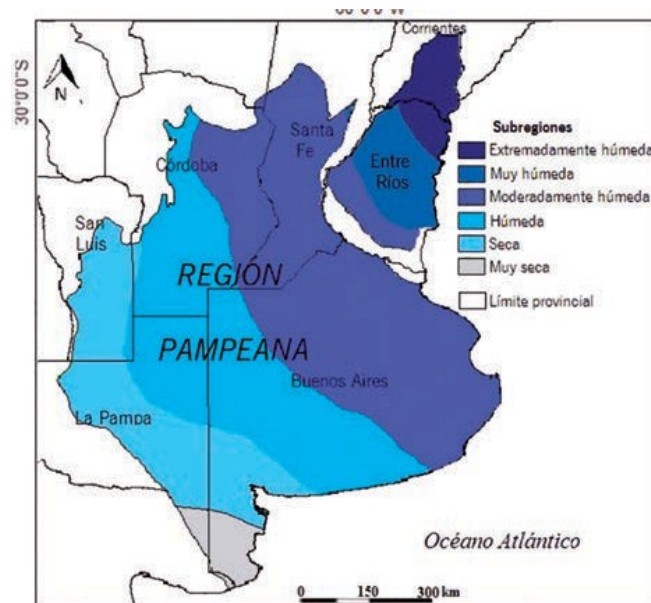


Figura 1. Mapa de zonificación de la región pampeana según su régimen pluviométrico.
Extraído de Aliaga et al. (2016: fig 4)

Por tal motivo, la distribución de la precipitación desciende de noreste a suroeste con máximas de humedad para la Provincia de Entre Ríos siendo consistente con un régimen de lluvias norte-sur observable en la caracterización sobre la costa del Río Uruguay. Aliaga et al. (2016) definieron el mapa de zonificación (Figura 1) donde se observa que las precipitaciones con mayor intensidad se localizan en el extremo noreste de la Región Pampeana (i.e. EH y MH), presentando una disminución hacia el sudoeste causada por cambios en la latitud. En la subregión MS (pp mensual 90 mm) resultó menor que en las áreas más húmedas (pp mensual 80-120 mm).

Variabilidad de la precipitación

Los efectos de los cambios abruptos o extremos entre ambos ciclos (i.e. inundaciones y sequías) afectan constantemente la producción agropecuaria en la zona generando una reducción importante en la disponibilidad de agua superficial (Quirós et al., 2002; Geraldés y Boavida, 2005). Incluso se observó en eventos extremos de sequía (1988, 2009) e inundaciones (1997, 2000-2002), graves consecuencias socioeconómicas por la disminución de área cultivada y aumento de suelos erosionable (Aliaga et al., 2016).

Esta variabilidad puede deberse principalmente a las frecuencias de 3, 5 y 6 meses en la subregión norte de la Provincia y podrían relacionarse con la Oscilación Madden-Julian (60-90 días) que afecta precipitaciones, sobre todo en el noreste pampeano influenciado por el anticiclón del Atlántico Sur (Bridgman y

Oliver, 2006). Esta Oscilación se debe al comportamiento acoplado mar-atmósfera con aumento particular de lluvias (de ascenso) y una vez que se presenta la inhibición marcada por sequías (SMN, 2023)

Sin embargo, cabe destacar que las tendencias positivas de precipitación anual se atribuyen a cambios en frecuencia e intensidad de ENOS (Grimm et al., 2000). Las lluvias intensas ocurren en periodos cortos pero más frecuentes entre 30-40°S (Grimm et al., 2000), aumentando la frecuencia de eventos extremos por encima de anomalías mensuales/estacionales, aumentando los riesgos asociados a inundaciones rápidas (Grimm, 2011). Para la Región Pampeana la variabilidad anual de lluvia se presenta principalmente a otoño y verano (Grimm, 2011).

En el estudio realizado por Aliaga et al., (2016) se considera la distribución y características pluviométricas subregionales, estableciendo nuevos límites representativos de la región templada húmeda/subhúmeda: subregiones MH, ModH, H y S (Figura 2). Sin embargo, se indicó que el comportamiento norpatagónico y EH (subtropical del norte de Entre Ríos) se excluyeron por no relacionarse con el régimen pampeano según lo manifestado por Soriano (1956)

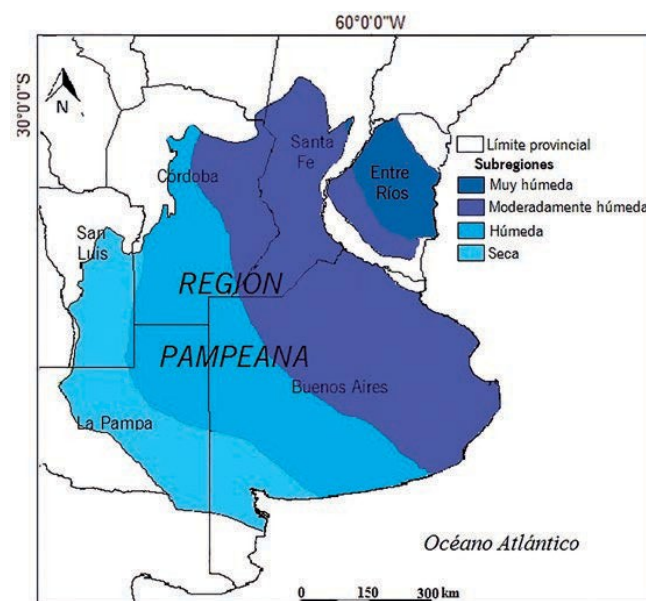


Figura 2. Nueva delimitación de la Región Pampeana según su régimen pluviométrico para el período 1960-2010. Extraído de Aliaga et al. (2016: fig. 7)

Según Aliaga (2020) la subregión MS en el sudoeste bonaerense, bajo un régimen pluviométrico de menos de 500 mm, ha podido conservar sus ecosistemas en periodos secos debido a la cobertura de vegetación arbórea, arbustos y pastizales. Sin embargo, la expansión agrícola en la zona, que implica la eliminación de esa cobertura vegetal, ha propiciado la degradación de los suelos, con procesos de desertificación crecientes. Estos últimos impactan

negativamente en la producción agroganadera de la región y disminuyen la capacidad de resiliencia de los ecosistemas ante los efectos del cambio climático.

De otra parte, la subregión EH presenta condiciones subtropicales, con dificultades para la ganadería por las altas temperaturas y pastos de pobre desarrollo, lo que genera un contexto especial para la producción de arroz y yerba mate similar al de la Provincia de Corrientes (Alarcón, 2013). Las condiciones ambientales de ambas subregiones (MS y EH) difieren del comportamiento pluviométrico pampeano, justificando su exclusión en la delimitación propuesta por Aliaga et al., (2016).

Metodología

A partir del Primer Reporte Bienal de Actualización de la República Argentina a la Convención Marco de Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (SAyDS, 2015), en particular, el capítulo titulado “Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones” ofrece una amplia recopilación de resultados y simulaciones de diversos parámetros climáticos para cuatro regiones del país: Húmeda, Centro, Andina y Patagonia. La primera de ellas incluye los cuatro departamentos de Entre Ríos analizados en este informe.



Figura RE1.1: Regiones consideradas: Húmeda (1), Centro (2), Andes (3) y Patagonia, Antártida e Islas del Atlántico Sur (4)

Figura 3 Delimitación de regiones consideradas en la Tercera Comunicación Nacional (extraído SAyDS (2015) Res. Eje. pág. 2.)

Para la región Húmeda del país, que incluye a la Provincia de Entre Ríos, se han registrado cambios que incluyen aumentos en las temperaturas máximas, una mayor cantidad de precipitación y una mayor frecuencia de eventos extremos

entre 1960 y 2010. Para los cambios previstos en el futuro cercano, se prevé un aumento de la temperatura media entre 0.5° y 1°C (con poca dependencia de los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero), una variación de la precipitación media entre -10 % y 10 % (poco relevantes) y aumentos en los índices extremos de temperaturas y precipitaciones extremas.

Los modelos climáticos consultados en este informe

Las proyecciones incluidas por SAyDS (2015) se basa en los resultados obtenidos por el Modelo Climático Global (MCG) utilizado para simular las condiciones verticales de la atmósfera con una resolución espacial de 60 a 200 km y contribuye como herramienta en la determinación de escenarios climáticos futuros basados en las consideraciones futuras de gases de efecto invernadero. Se debe tener en cuenta que al ser un tipo de modelo climático sobre variables de alta complejidad, éstas pueden contener una alta incertidumbre debido a factores de incidencia climática que pueden incluir sesgos producidos por factores como la presencia de nubes, vapor de agua, calor interatmosférico y aerosoles. Además, para el caso particular de las precipitaciones en América del Sur, los resultados pueden ser limitados.

Para reducir dicha incertidumbre, el grupo CIMA (i.e. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera) quien fue responsable de estas proyecciones y simulaciones, introduce el Proyecto de Intercomparación de Modelo Acoplado Fase 5 (CMIP5), que aunque se han hecho algunas observaciones sobre errores sistémicos relacionados con la incertidumbre, las predicciones futuras pueden sobreestimar o subestimar patrones de lluvia.

La resolución temporal del estudio establece tres escenarios: "clima futuro cercano (2015-2039), que es importante para las políticas de adaptación, y clima futuro lejano (2075-2099), que es informativo sobre el largo plazo" (SAyDS, 2015: Resumen Ejecutivo: 9). La simulación de los escenarios futuros para el Siglo XXI resultó en la creación de escenarios de temperatura RCP4.5 y RCP4.6 después de la sistematización de datos, modelación, índices, validación y corrección de errores correspondientes a la metodología desarrollada por el CIMA. La simulación de los escenarios futuros para el Siglo XXI condujo a la construcción de escenarios de temperatura RCP4.5 y 8.5 y A1B y de precipitación sobre bases de la Series Temporales de la Unidad de Investigación Climática del Reino Unido.

Síntesis de cambios y tendencias de precipitación en la región húmeda (incluye Entre Ríos)

La variable "Precipitación" según registros del Informe CIMA, entre 100 y 200 mm principalmente entre los años sesenta y noventa, presentando indicios que la ubican como una de las regiones del planeta con mayor aumento de precipitación para la segunda mitad del siglo XX (Ibidem e "IPCC AR5, Fig. 2 del



WGI SPM”); incluso en los denominados periodos secos, también se presenta una tendencia positiva para la precipitación anual y con valores diarios en aumento mayores a 1 mm. En el informe también se menciona que según Castañeda y Barros (1994) el aumento significativo promedio es de 150 mm considerándose como tendencia de largo plazo.

La Figura 4 muestra la Provincia de Entre Ríos con una media anual superior al resto de provincias de la zona Húmeda (a), considerándose importante el aumento de precipitación anual como se observa en las isolíneas (b). Se observa una importante correlación entre las variables de temperatura y precipitación, ya que se indican aumentos en ambas variables, en particular la precipitación durante el periodo cálido, mientras que se señala una tendencia negativa en el periodo frío (-44.2 mm en Santa Fe y Entre Ríos, según Fig. 5.2.2.4., Cap. 5: 102).

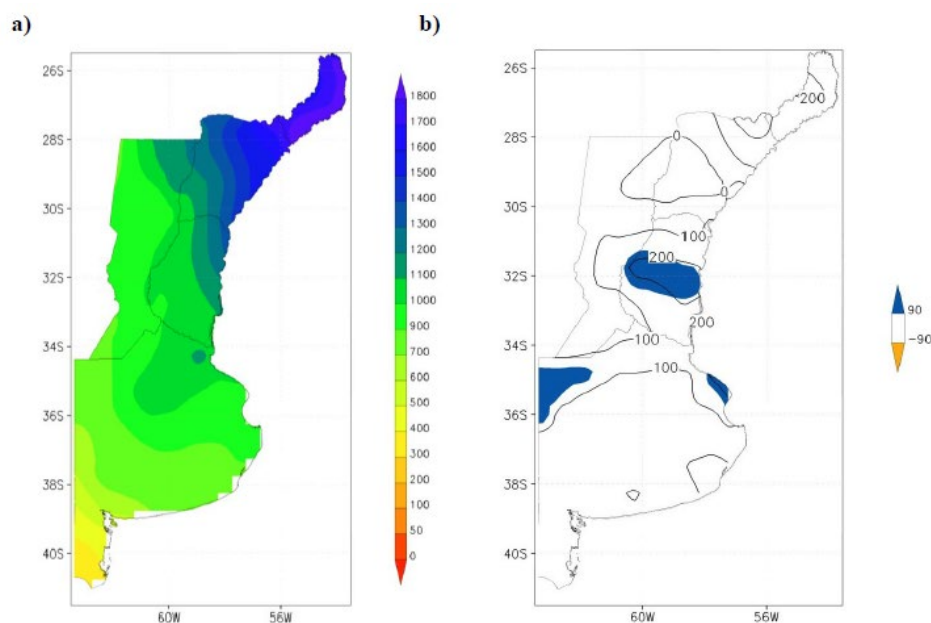


Figura 4. a) campo medio de la precipitación media anual, periodo 1960-2010, b) cambio en la precipitación anual entre 1960 y 2010. Fuente: extraído de SAYDS (2014. Cap 5: 99: Fig. 5.2.2.1.)

Eventos extremos de precipitación

En términos generales se observa un aumento generalizado de frecuencia e intensidad de precipitación y con una importante reducción de periodos secos, siendo la tendencia de precipitación diaria máxima anual positiva en las observaciones históricas de 18.2 como cambio para la región de Santa Fe-Entre Ríos. Ambas provincias registran 33 unidades (superior al resto de provincias de la región húmeda) de la diaria máxima anual de cinco días consecutivos y 104,3

unidades en todos los casos donde la precipitación diaria superior al percentil 95. (SayDS, 2014: Fig. 5.2.2.6-8, Cap. 5: 104-105).

Precipitación media

Las precipitaciones estimadas están por debajo del 10% de aumento, dentro del margen de error del informe SAyDS (2015). Aunque se pueden esperar tendencias moderadas al este mesopotámico, hay algunas disminuciones en algunos sectores aislados. El escenario A1B (MRI/JMA), según el informe, sí estima aumentos mayores al indicado y de 40% en el periodo lejano (Figura 5).

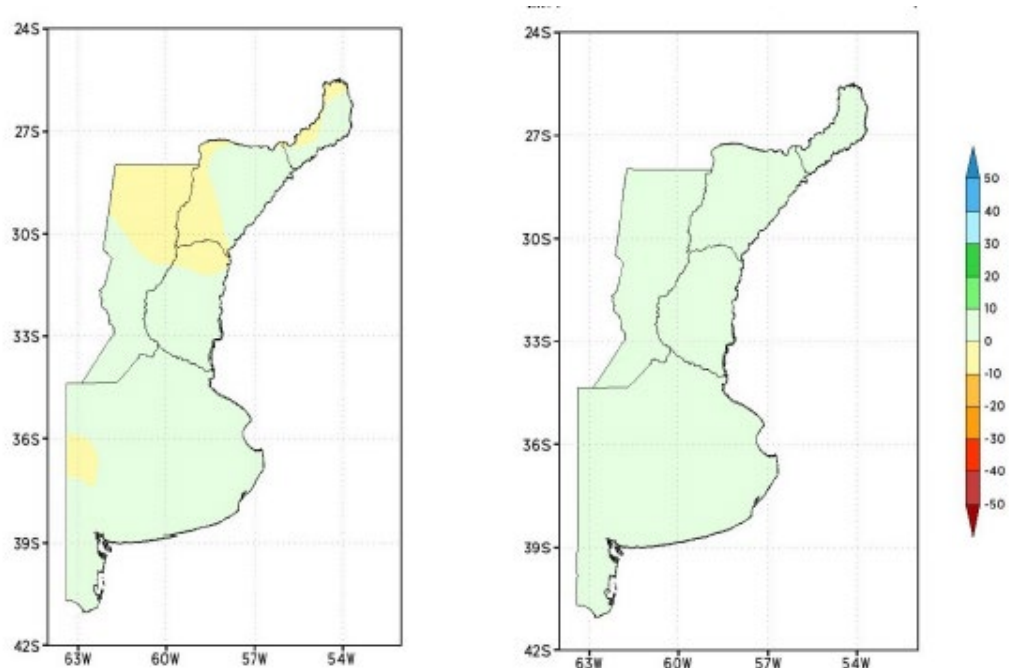


Figura 5 Cambio en la precipitación anual con base en los datos históricos. Promedio de modelos aplicados en la TCN para el escenario RCP 8.5. 2015-2039 (izq.) y 2075-2099 (der.)
Fuente: extraído de Fig. 5.4.2.2. SAyDS (2015, Cap 5: 132).

Para ello en este apartado se genera el análisis sobre la información suministrada por el CIMA/CONICET-UBA por la provisión de los datos climáticos de la 3ra. Comunicación Nacional sobre Cambio Climático disponible en <http://3cn.cima.fcen.uba.ar>

A partir de los datos suministrados en la base de datos climáticos de la TCN, se realizó la extracción del valor central en el área de cada departamento para la variable de precipitación (Figura 6). La grilla de datos permite muestras cada 250 km que dentro del rango de estudios sobre cambio climático presenta una adecuada escala espacial. Los datos procesados provienen de los tres periodos ya mencionados: históricos, futuro cercano y futuro lejano, con ventanas vacías de información propias de los modelos.

En cada uno de los departamentos de la zona de estudio analizó la tendencia de la precipitación media mensual en ambas proyecciones, 4.5 y 8.5. Se tomaron los centroides de las celdas obtenidas de la 3ra. Comunicación Nacional de Cambio Climático de la Argentina por el CIMA/UBA-CONICET, utilizando la metodología de Taylor et al. (2012). Para Concordia existe un (1) punto de información, dos (2) para los departamentos de Colón y Uruguay y tres (3) para Gualeguaychú (Figura 6).

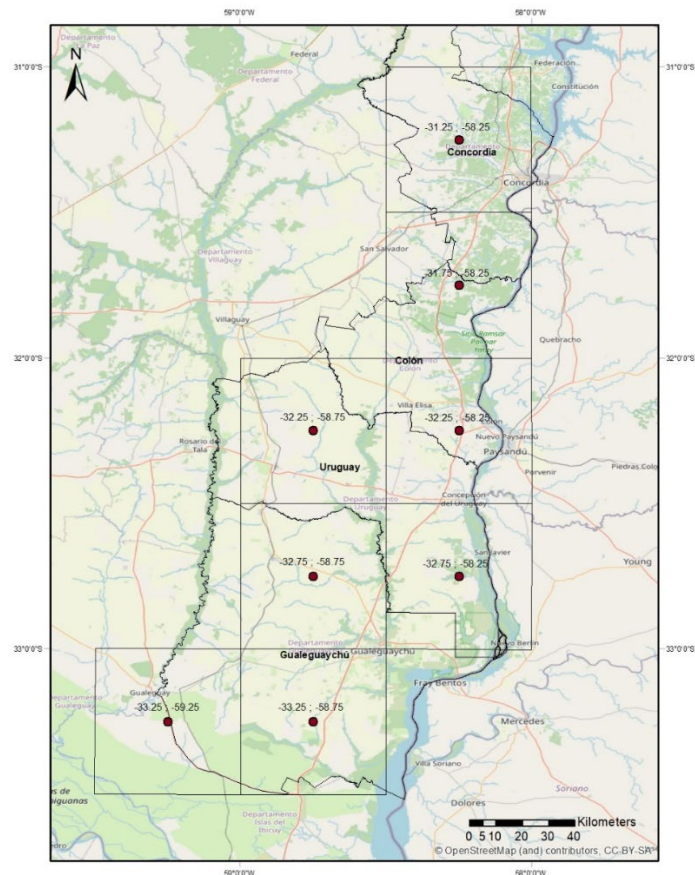


Figura 6. Distribución de la grilla de datos para análisis específico del área de estudio.
Fuente: elaboración propia con base en shapes y datos del CIMA/CONICET-UBA (2014)

El tratamiento de los datos contempló la adecuación contextual de la provincia de Entre Ríos (y su grilla asociada) y del uso de estadística básica para promedios en el caso del agrupamiento de datos trimestrales de temperatura máxima, media y mínima, y precipitación.

Finalmente se realizó una interpolación con base en la fecha de mayor precipitación para los tres periodos en el área de estudio (i.e. interpolación de precipitación en la provincia para la fecha de mayor precipitación de los departamentos para cada periodo).

Resultados

Departamento de Concordia

En el periodo 1961-2010, la precipitación media mensual se registra con 136 mm mientras que para el periodo 2015-2039 los valores se sitúan en 125.6 (RCP 4.5) y 121.7 (RCP 8.5) (Figura 2). Por el lado de las proyecciones a largo plazo, los valores son de 125.2 (RCP 8.5) y 135 mm (RCP 8.5). En cuanto a los valores extremos, se considera un aumento general para ambas proyecciones. De solo tres (3) valores mensuales superiores a 500 mm registrados entre 1969-2010 se pasa a proyecciones que presentan siete (RCP 4.5) y ocho (RCP 8.5) valores para el periodo 2015-2039, con un incremento de más de 50%. Para el periodo 2075-2099, los valores llegan a cinco (RCP 8.5) y tres (RCP 4.5) con una leve disminución (Figura 7).

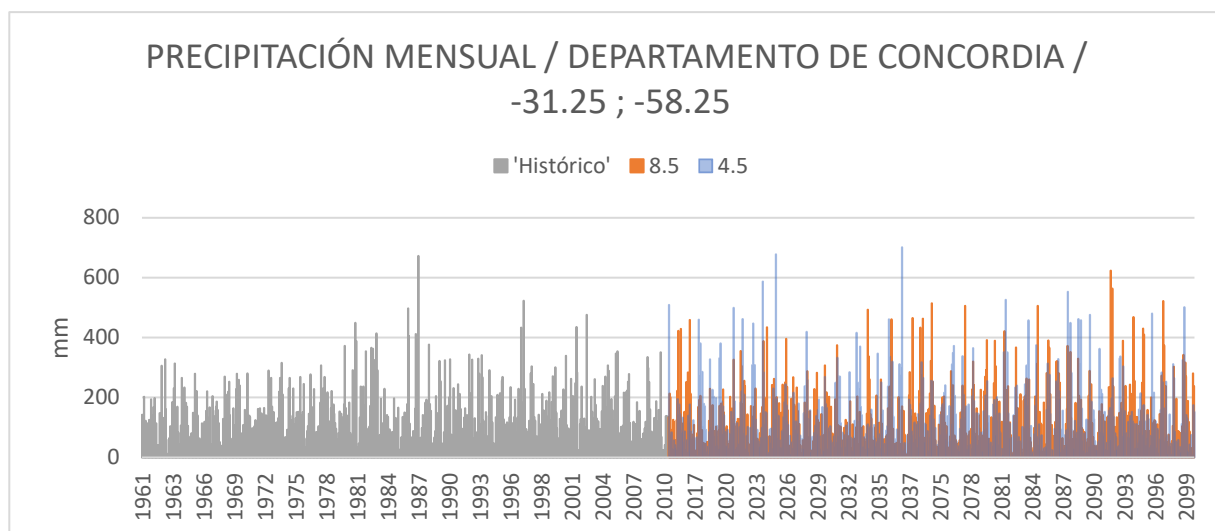


Figura 7. Precipitación mensual para el Departamento de Concordia. Fuente: elaboración propia con base en datos del CIMA/CONICET-UBA (2014)

Departamento de Colón

En el área que rodea la coordenada -31.75 / -58.25, y que incluye, por ejemplo, el Parque Nacional El Palmar, se registran valores medios históricos (1961-2010) de 134.2 mm mensuales (Figura 8) mientras que para el área correspondiente a -32.25 / -58.25 y que incluye las ciudades de Colón y San José, la precipitación media ocurrida fue de 127.1 mm (Figura 9). En cuanto a las proyecciones de un futuro cercano (2015-2039), se presentan valores medios mínimamente inferiores para el norte del departamento (-31.75 / -58.25) y levemente superiores para el sur del mismo (-32.25 / -58.25), con una máxima de 137.9 mm (RCP 4.5).

En cuanto a los extremos los valores históricos se determinan tres eventos mayores a 500 mm para el norte y un evento superador para el sur. Los valores proyectados entre 2015-2039 nos dan seis eventos mayores a este umbral en el norte del departamento (en ambos RCP) y la cantidad aumenta hasta quince (RCP 8.5) y trece (RCP 4.5). Para el periodo 2075-2099, se proyectan cinco eventos (RCP 8.5) y tres eventos (RCP 4.5) mayores a 500 mm en el norte. En el sur se proyectan diez (RCP 8.5) y cinco (RCP 4.5) eventos, respectivamente.

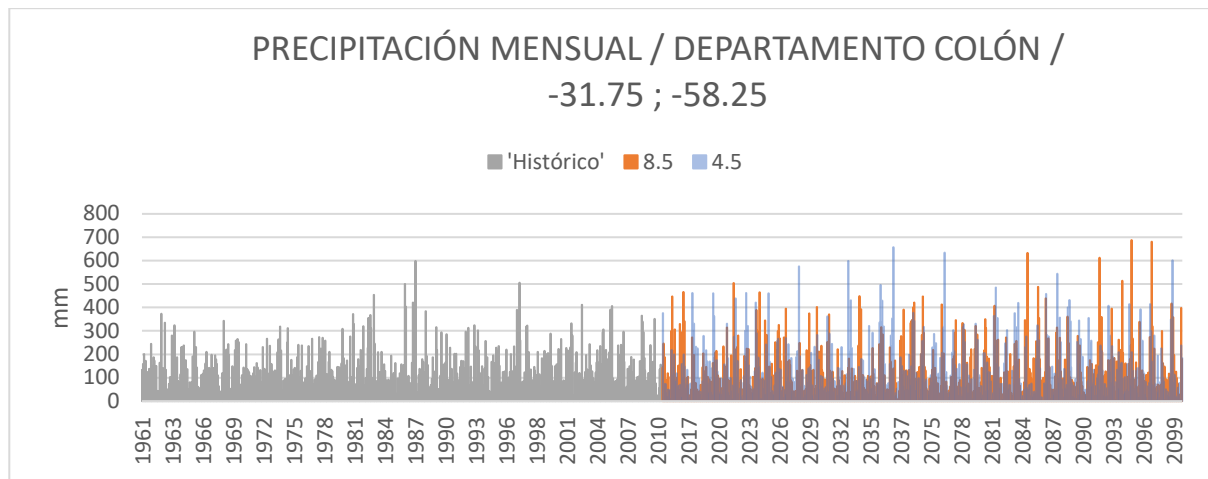


Figura 8. Precipitación mensual para el Departamento de Colón (-31.75 / -58.25). Fuente: elaboración propia con base en datos del CIMA/CONICET-UBA (2014)

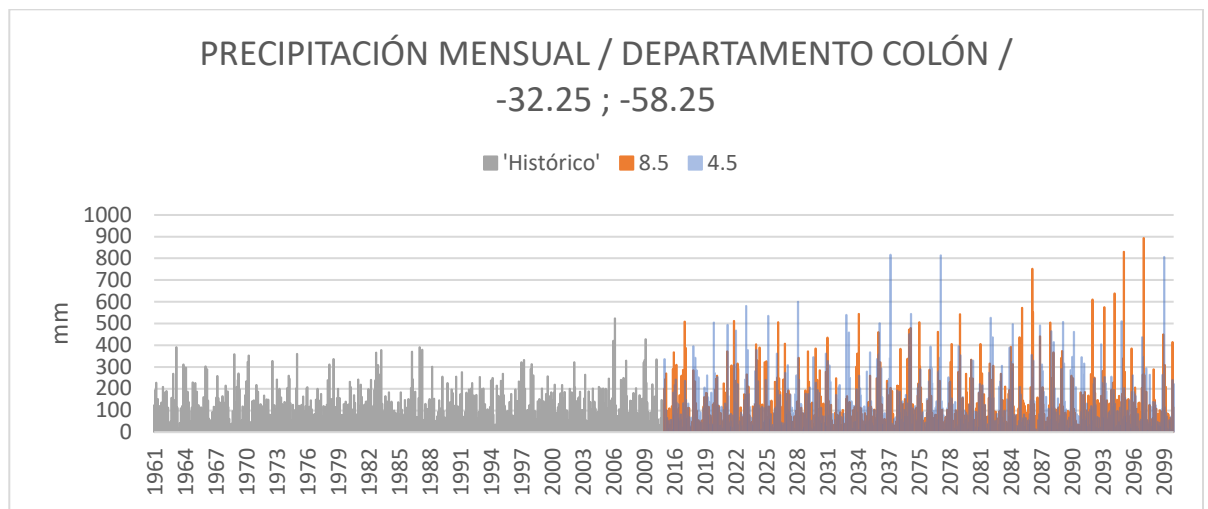


Figura 9. Precipitación mensual para el Departamento de Colón (-31.75 / -58.25). Fuente: elaboración propia con base en datos del CIMA/CONICET-UBA (2014)

Departamento de Uruguay

Los valores medios históricos (1961-2010) son de 121.2 y de 125.2 para el noroeste (-32.25/-58.75) (Figura 10) y sudeste (-32.75/-58.25) respectivamente (Figura 11). Se presenta en este periodo un evento extremo, de más de 500 mm, para ambas regiones.

Las proyecciones con respecto al futuro cercano (2015-2039) muestran medias similares para el noroeste en cuanto a valores medios, con 129.7 mm (RCP 4.5) y 123.1 (RCP 8.5) y para el sudeste del departamento los valores se sitúan en 127.2 (RCP 4.5) y 122.7 (RCP 8.5). Las diferencias nuevamente son muy poco significativas. Los meses con precipitación de más de 500 mm en este periodo es entre 9 y 12 eventos dependiendo del escenario y ubicación dentro del municipio. El aumento esperado en intensidad de precipitaciones es muy significativo.

Con respecto al futuro lejano (2075-2099), se puede observar que medias entre 124.7 y 128.6 mm para ambos escenarios divergen de los registros históricos. Las precipitaciones extraordinarias mayores a 500 mm son nueve (RCP 8.5) y cinco eventos (RCP 4.5) para el noroeste y de siete (RCP 8.5) y seis eventos (RCP 4.5). Nuevamente los aumentos en este sentido son muy sustanciales.

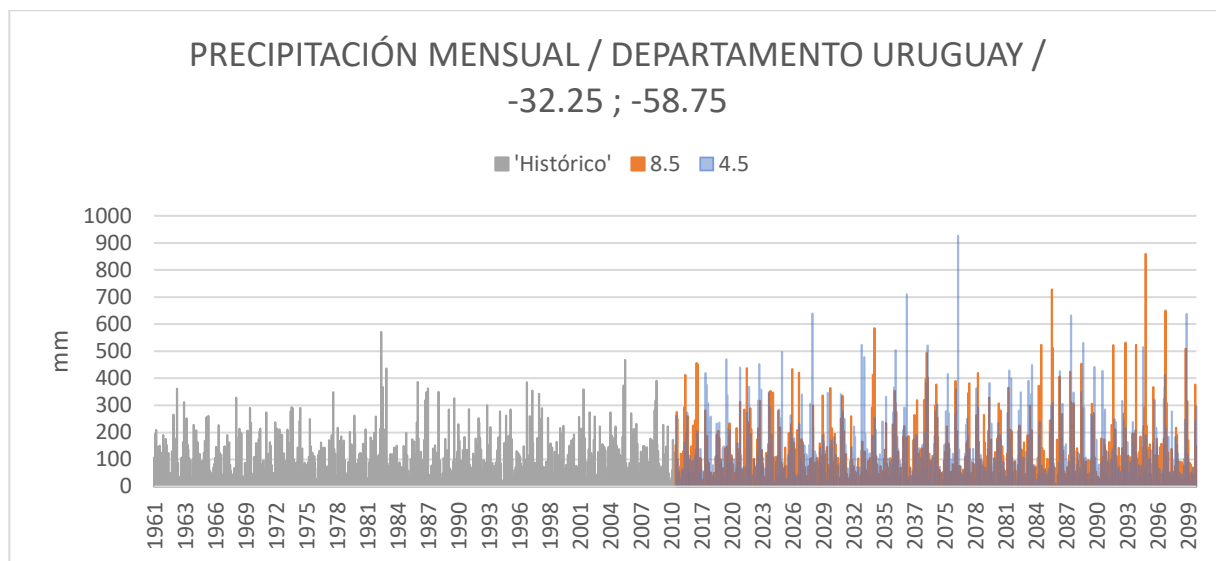


Figura 10. Precipitación mensual para el Departamento de Uruguay (-32.25 / -58.75).
Fuente: elaboración propia con base en datos del CIMA/CONICET-UBA (2014)

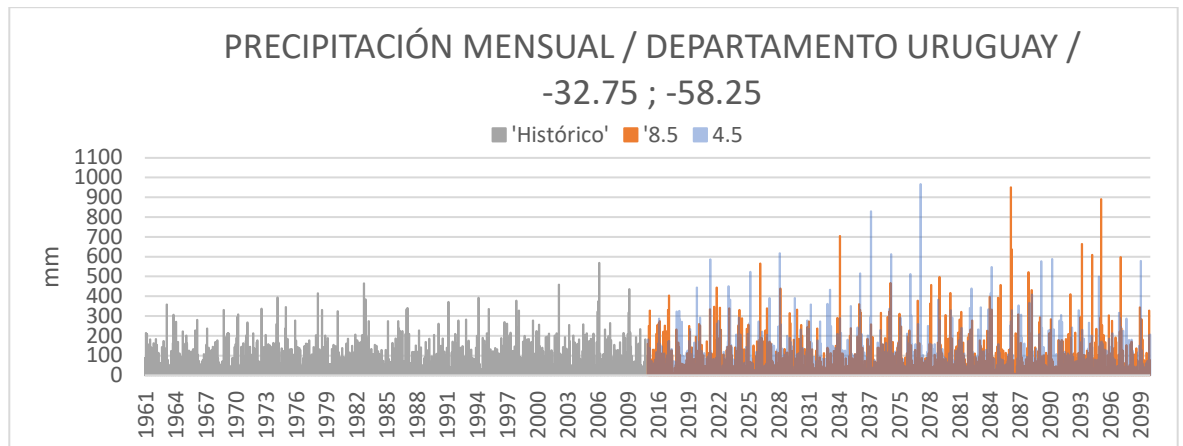


Figura 11. Precipitación mensual para el Departamento de Uruguay (-32.75 / -58.25).
Fuente: elaboración propia con base en datos del CIMA/CONICET-UBA (2014)

Departamento de Gualeguaychú

Finalmente, el departamento de Gualeguaychú presenta 3 puntos de información climática distribuidos dentro del territorio (Figura 12, Figura 13 y Figura 14). Las medias mensuales en esta parte de la región se presentan entre 109.9 a 124.6 mm (1961-2010). Las proyecciones muestran que para el periodo 2015-2039 son entre 107.3 y 120.5 mm, dependiendo de la zona y el RCP. La precipitación media estimada entre 2075-2099 presenta el mismo patrón, con valores entre 107.3 a 119.4 mm.

Por el lado de la precipitación extrema, valores mayores a 500 mm en el periodo histórico se registran entre dos y cuatro eventos. En el caso de las proyecciones del 2015-2039, las precipitaciones extremas rondan se ven aumentados entre seis y diez eventos, tanto para RCP 8.5 como para el RCP 4.5. Según las proyecciones 2075-2099, se presenta la probabilidad de 3 a 8 eventos, según la región del departamento.

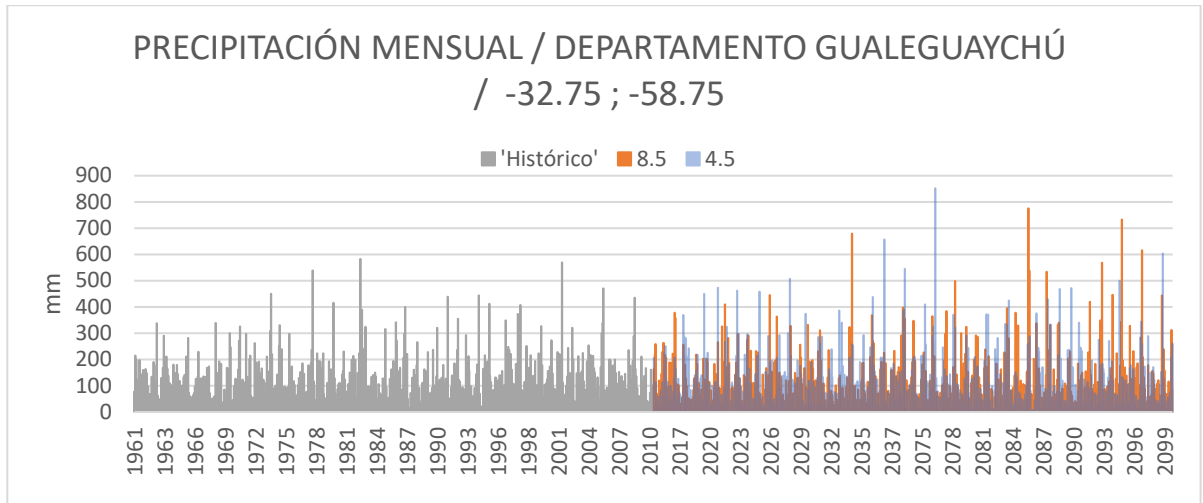


Figura 12. Precipitación mensual para el Departamento de Gualeguaychú (-32.75 / -58.75). Fuente: elaboración propia con base en datos del CIMA/CONICET-UBA (2014)

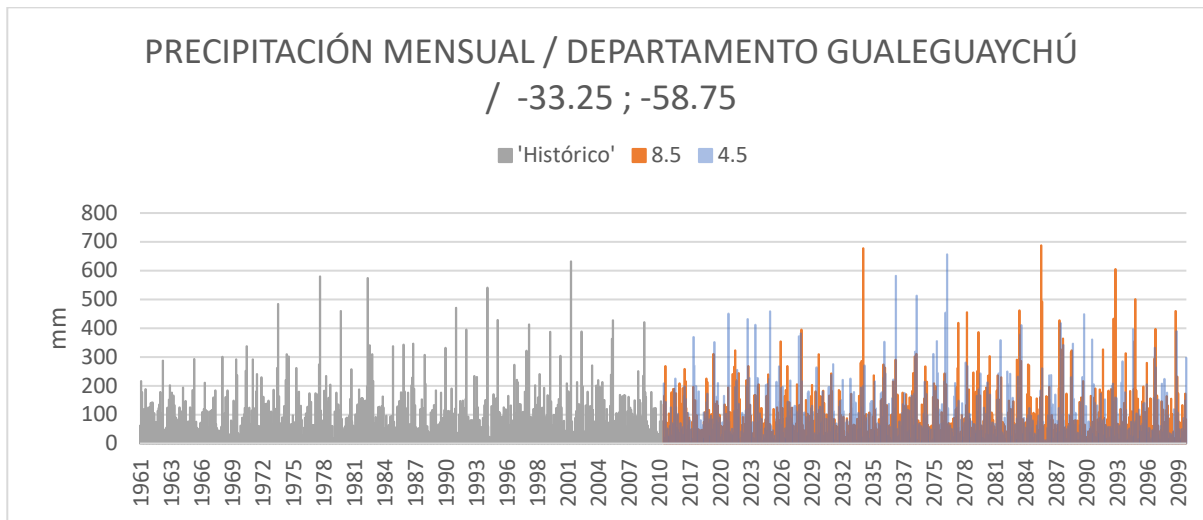


Figura 13. Precipitación mensual para el Departamento de Gualeguaychú (-33.25 / -58.75). Fuente: elaboración propia con base en datos del CIMA/CONICET-UBA (2014)

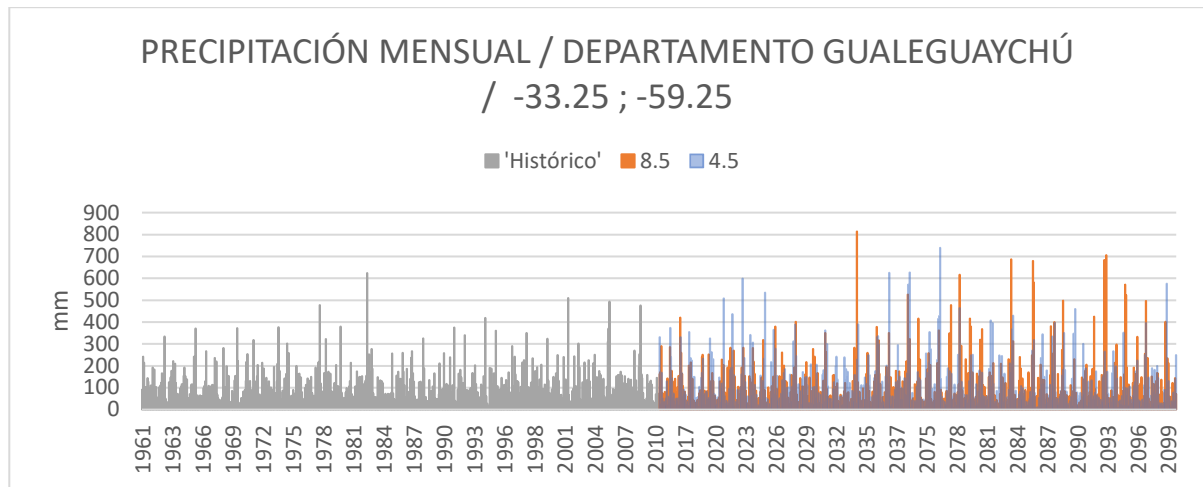


Figura 14. Precipitación mensual para el Departamento de Gualeguaychú (-33.25 / -59.25). Fuente: elaboración propia con base en datos del CIMA/CONICET-UBA (2014)

Síntesis de los Resultados Estadísticos

Se observa que la precipitación media mensual tanto en el periodo histórico como en las proyecciones futuras disminuye levemente de norte (Concordia) a sur (Gualeguaychú) con valores que van de 136 a 107.3 mm. En los cuatro departamentos, la tendencia de los valores medios no posee cambios significativos, sin embargo, hay una notable diferencia general en la identificación de extremos mayores a 500 mm. Las proyecciones tanto del RCP 4.5 como del RCP 8.5 dan valores de aumento muy significativos. De un máximo de tres eventos de este tipo registrados en algunas celdas, se llega a un máximo de quince (RCP 8.5) y trece (RCP 4.5), en particular para el norte del departamento de Colón.

Características Generales

A continuación, se analiza la precipitación diaria que caracteriza el área de estudio con el objetivo de estudiar la distribución de los eventos extremos (EE) (i.e. máximo registro o estimación diaria de lluvia por mm) para cada uno de los periodos considerados (1961-2010/histórico; 2015-2039; 2075-2099) en ambos RCP (4.5 y 8.5) (Tabla 1). Se consideraron los mismos centroides de las celdas utilizados en la estimación de la precipitación mensual, obtenidas de la 3ra. Comunicación Nacional de Cambio Climático de la Argentina por el CIMA/UBA-CONICET (Taylor et al. 2012).

Los resultados de la Tabla 1 que realiza la comparativa de valores máximos de precipitación en los cuatro departamentos, indica que se espera una intensificación de los eventos extremos en la zona de Concordia para fines de siglo. Cuando analizamos los valores históricos del período 1960-2010, el pico

máximo registrado fue de 192,9mm en el departamento de Colón en enero de 1975. En comparación, las proyecciones para los escenarios futuros RCP 4.5 y RCP 8.5 de los períodos 2015-2039 y 2075-2099 muestran sistemáticamente valores más elevados.

Tabla 1. Máximos valores registrados y estimados de precipitación diaria (mm). En negrita los valores mas extremos por regiones dentro de la zona de estudio.

Departamento	Coordenadas (centroide)	Histórico (1960-2010)	Escenario					
			2015-2039		2075-2099			
			RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5		
Concordia	-31.25 / -58.25	4/14/19 87 164.6 mm	3/24/20 25 221 mm	3/23/20 39 173.2 mm	3/31/20 88 234.8 mm	12/2/20 81 212.4 mm		
		Colón	- 31.75 / -58.25	1/16/19 75 148.2 mm	2/28/20 33 253.5 mm	11/22/2 021 186.8 mm	11/19/2 084 201.8 mm	2/25/20 95 279.4 mm
Uruguay	-32.25 / -58.25	1/16/19 75 192.9 mm	2/28/20 33 271.7 mm	1/11/20 36 216.4 mm	1/2/209 9 284 mm	2/25/20 95 375.3 mm		
		Uruguay	-32.25 / -58.75	10/18/1 996 157.9 mm	2/23/20 28 281.3 mm	2/10/20 39 181 mm	12/2/20 75 232.5 mm	2/25/20 95 350.4 mm
Gualeduy chú	-32.75 / -58.25	3/21/20 06 198.9 mm	2/23/20 28 288.6 mm	3/10/20 26 178.2 mm	1/2/209 9 225.4 mm	2/25/20 95 428.1 mm		
		Gualeduy chú	-32.75 / -58.75	3/22/20 03 191.4 mm	2/23/20 28 222.7 mm	11/2/20 38 159.5 mm	1/2/209 9 250.8 mm	2/25/20 95 302 mm
		-33.25 / -58.75	3/7/199 4 220.1 mm	10/20/2 023 189.2 mm	2/27/20 35 180.3 mm	3/24/20 90 196.2 mm	3/11/20 86 248.9 mm	
Gualeduy chú	-33.25 / -59.25	3/21/20 06 221.7 mm	3/10/20 34 214.7 mm	1/21/20 39 250.5 mm	1/2/209 9 272.9 mm	1/26/20 93 330.6 mm		

Fuente: elaboración propia con base en datos del CIMA/CONICET-UBA (2014)

Para el período 2075-2099 bajo el escenario RCP 8.5, que supone emisiones continuas muy altas, los registros máximos absolutos se disparan substancialmente. En concreto, se esperan precipitaciones diarias récord de 375,3mm en Colón y de 428,1mm en Concepción del Uruguay en febrero de 2095. Estos valores casi duplican el máximo del período histórico disponible. En comparación con otros departamentos, Colón y Uruguay son los que presentarían los episodios más extremos de acuerdo a estos datos. Un patrón que también se observa en el período 2015-2039 bajo RCP 4.5, aunque con valores pico algo menos pronunciados.

El análisis efectuado apunta a la ocurrencia cada vez más frecuente de eventos extremos de precipitación diaria en la zona, con registros que podrían exceder los 375mm según estas proyecciones para clima futuro. Se trataría de un cambio sustancial respecto a las precipitaciones máximas observadas históricamente en la región.

Interpolación de eventos extremos de precipitación para los tres periodos

Con el uso de datos suministrados por CIMA/CONICET-UBA (2014) se realizó la interpolación espacial de precipitación para la fecha de evento máximo de la ciudad de Concordia en los tres periodos de análisis: histórico, futuro cercano y futuro lejano.

Se realizó la interpolación espacial de precipitación para la fecha de eventos máximos para los tres periodos de referencia (histórico, 2015-2039, 2075-2099). Se dividió en dos regiones, sur (Gualeduaychú y Uruguay) y norte (Colón y Concordia). Si comenzamos con los registros históricos, en la Figura 15 se observa una precipitación muy alta (superior a 171 mm) para las localidades de Colón y San José, al sur del Departamento de Colón. En la región sur, la precipitación más intensa se concentra al sur de Gualeduaychú, con valores superiores a 212 mm (Figura 16).

Por el lado de las precipitaciones proyectadas se observan máximos en el RCP 4.5, dentro del periodo 2015-2039. Específicamente se realizó una simulación de una posible situación extrema el 2/28/2033, con valores mayores a 233 mm al sur y norte del departamento de Colón (Figura 17). La ciudad de Concordia en cambio posee valores entre 133.2 y 166.6 mm. En cambio, en la zona sur, la precipitación mayor se alcanza en el departamento de Uruguay, con valores para Concepción del Uruguay entre 224 y 256 mm (Figura 18).

Finalmente, para las estimaciones de fin de siglo (2075-2099), encontramos valores máximos diarios más extremos en el RCP 8.5. En la zona norte vemos nuevamente valores muy extremos, de más de 333 mm, en las localidades de San José y Colón (Figura 19). Por el lado de la precipitación al sur de la zona de estudio, el extremo se ubica al sur de Concepción del Uruguay, más



específicamente sobre Colonia Elia. En la ciudad de Gualeguaychú los valores se sitúan entre 237 y 285 mm (Figura 20).

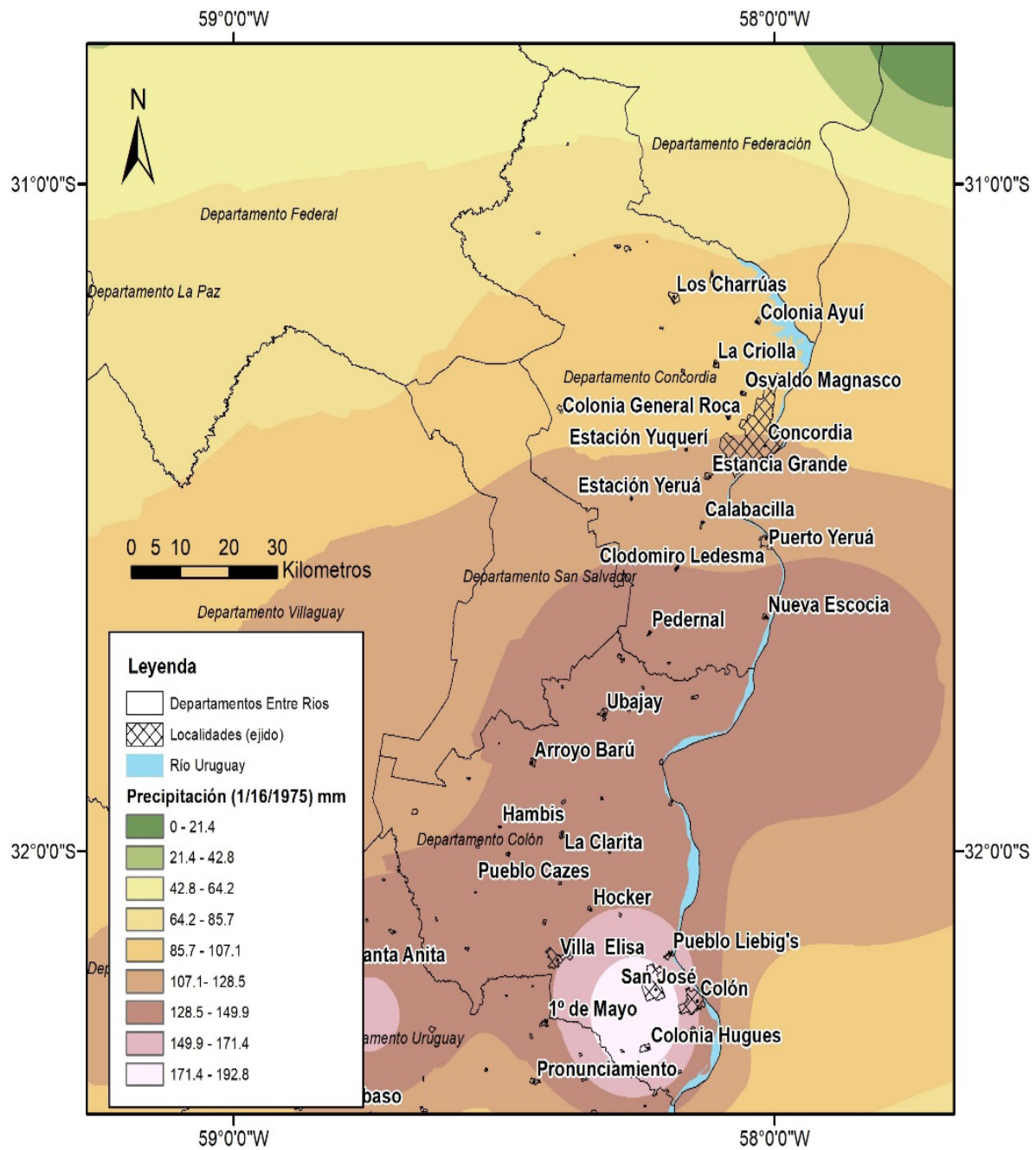


Figura 15. Precipitación máxima diaria histórica para la región norte en base al evento 1/16/1975. Fuente: elaboración propia con base en datos del CIMA/CONICET-UBA (2014)

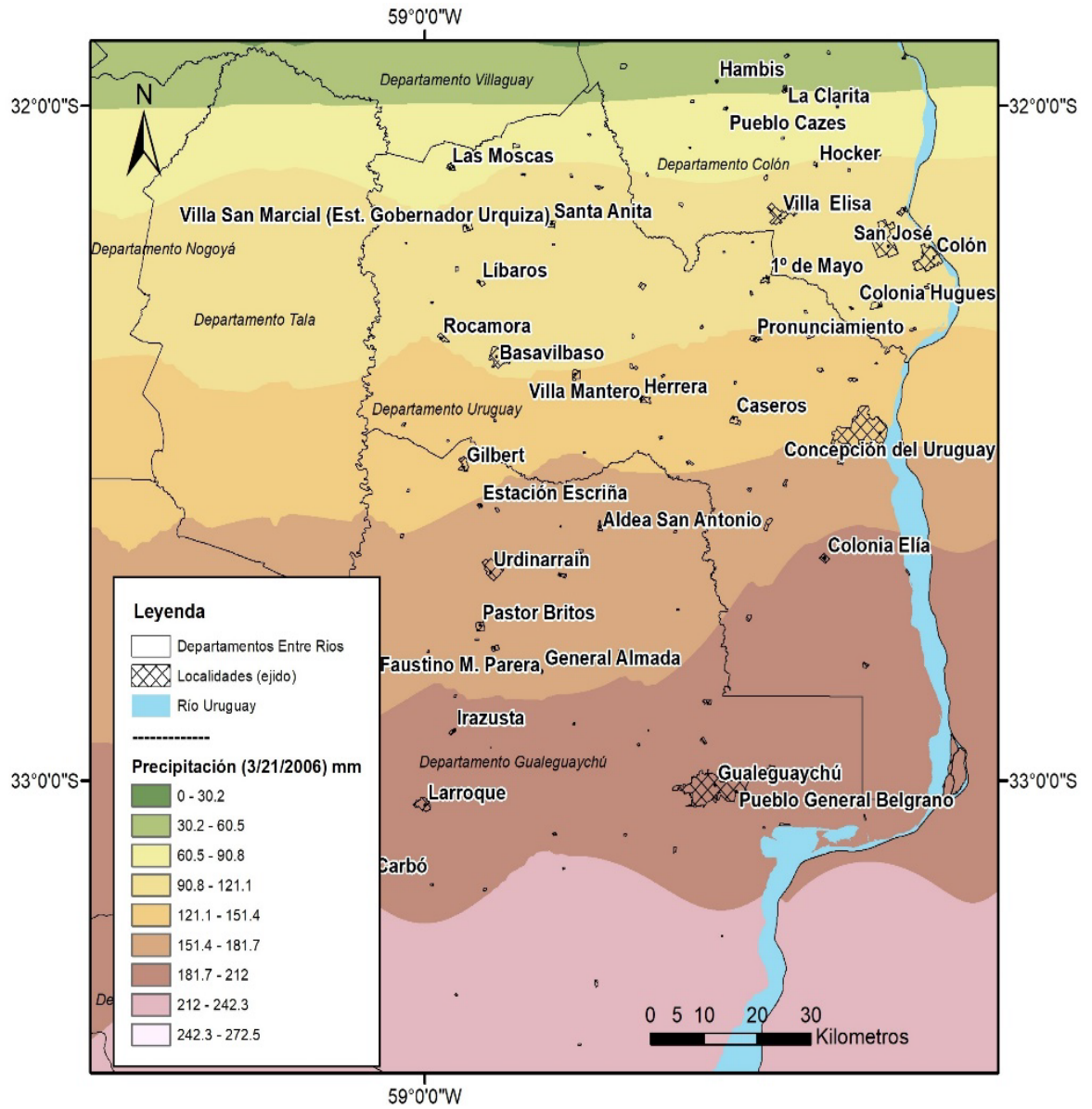


Figura 16. Precipitación máxima diaria histórica para la región sur en base al evento 3/21/2006. Fuente: elaboración propia con base en datos del CIMA/CONICET-UBA (2014)

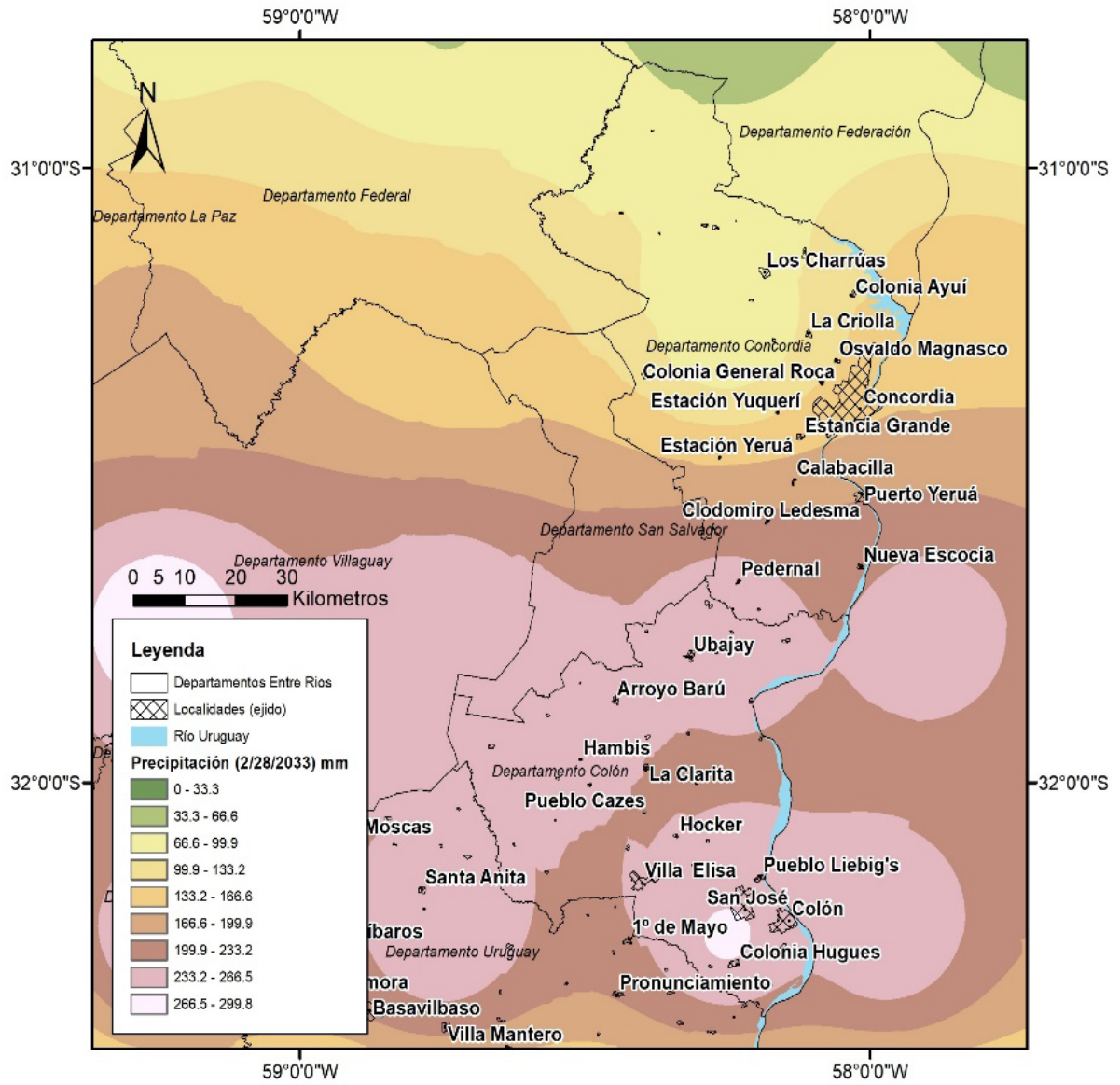


Figura 17. Precipitación máxima diaria para la región norte en base a un evento simulado para el 2/28/2033. Fuente: elaboración propia con base en datos del CIMA/CONICET-UBA (2014)

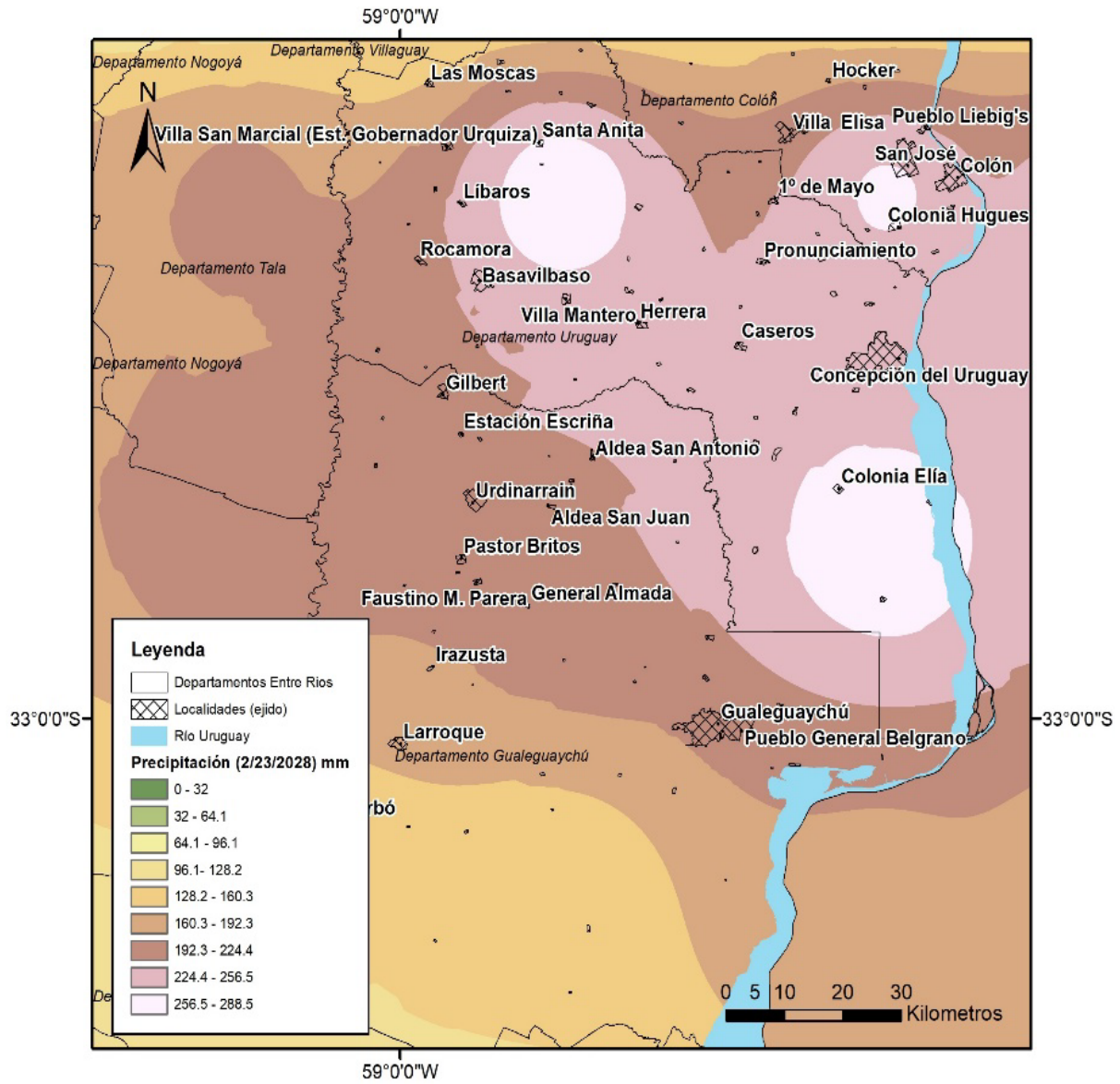


Figura 18. Precipitación máxima diaria para la región sur en base a un evento simulado para el 2/23/2028. Fuente: elaboración propia con base en datos del CIMA/CONICET-UBA (2014)

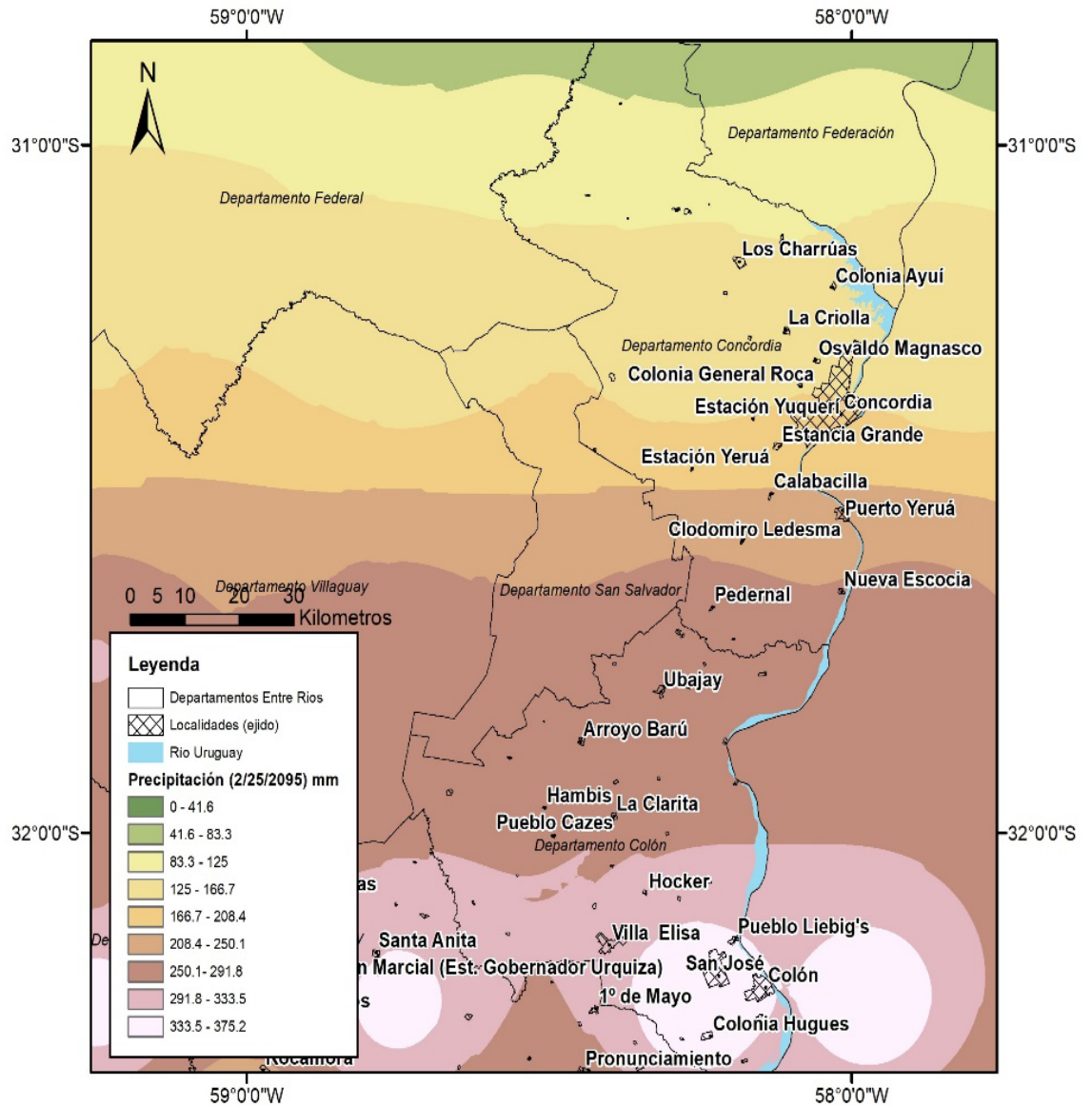


Figura 19. Precipitación máxima diaria para la región norte en base a un hipotético evento el 2/25/2015. Fuente: elaboración propia con base en datos del CIMA/CONICET-UBA (2014)

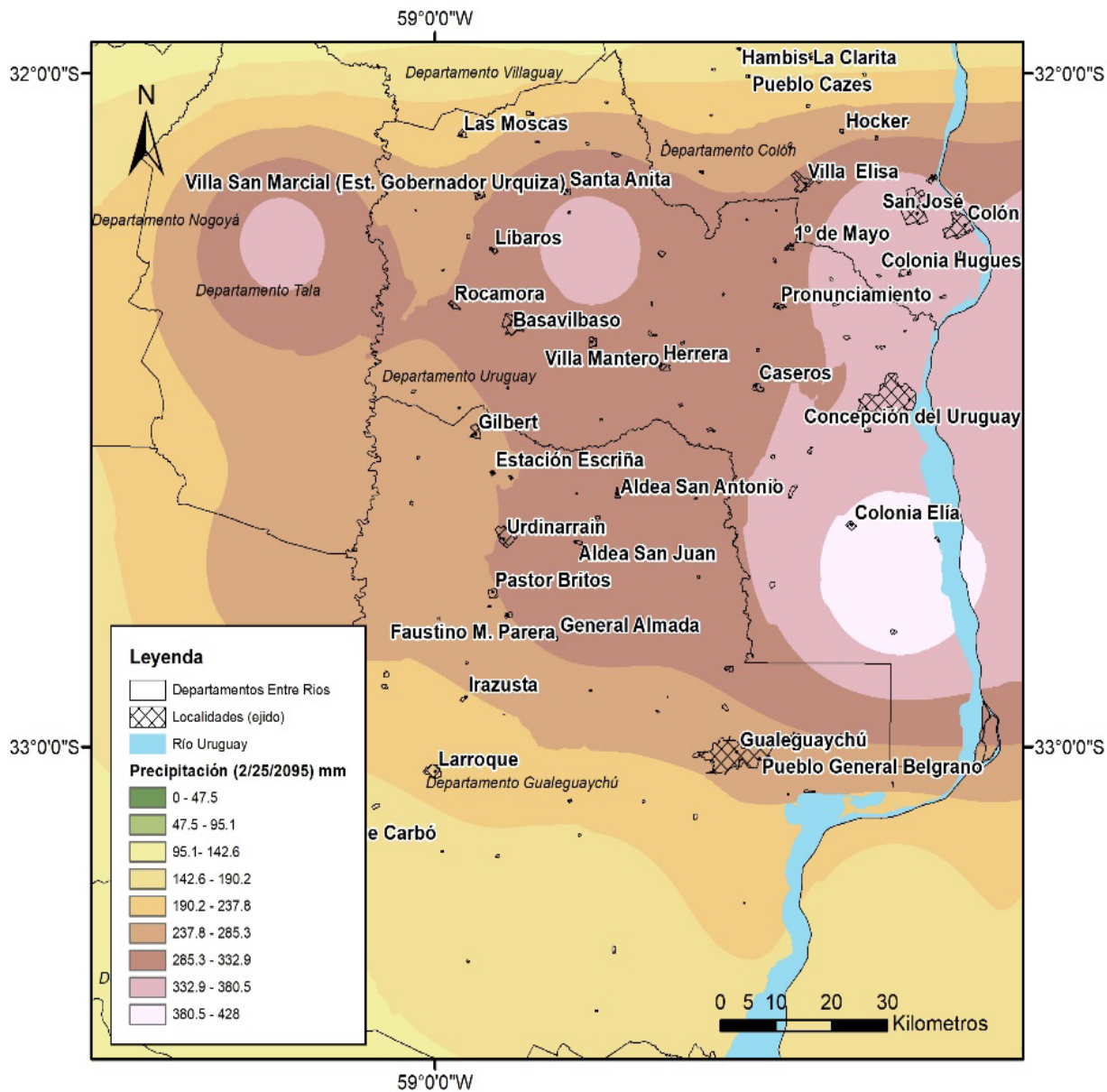


Figura 20. Precipitación máxima diaria para la región sur en base a un evento simulado el 2/25/2095. Fuente: elaboración propia con base en datos del CIMA/CONICET-UBA (2014)

Síntesis de los Resultados de las Interpolaciones

Según la precipitación máxima diaria interpolada espacialmente para el área de estudio en tres períodos: histórico, futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099). En el período histórico, se observan precipitaciones superiores a 171mm, concentradas al sur del departamento de Colón. En la zona sur, los máximos superan los 212mm al sur de Gualeguaychú.

Para el futuro cercano, en el escenario RCP 4.5 para 2033 se proyectan máximos de precipitación mayores a 233mm al norte y sur del departamento de Colón, mientras que para Concordia se estiman entre 133-166mm. En la zona sur, la mayor precipitación se ubica en el departamento de Uruguay, con máximos en Concepción del Uruguay entre 224-256mm.

Ya en el largo plazo (2075-2099), el escenario RCP 8.5 proyecta extremos más intensos. Al norte, en San José y Colón, se esperan extraordinarios valores de precipitación máxima diaria de más de 333mm. Al sur de Concepción del Uruguay, en Colonia Elia, también se prevén extremos intensos. En Gualaguaychú los valores máximos se situarían entre 237-285mm.

CONCLUSIONES

Se identifica un periodo más árido y seco en la región durante el Holoceno tardío, específicamente entre 3500-1000 años AP. Los análisis de moluscos fósiles y sedimentos eólicos dan cuenta de este evento prolongado de aridez, contrastante con el clima actual más húmedo. Durante las últimas décadas (1960-2010) se registra un aumento significativo de las precipitaciones medias anuales en Entre Ríos, del orden del 20% con respecto a periodos previos. Esta tendencia positiva se vincula a cambios en la frecuencia e intensidad del fenómeno ENOS.

Por ello, el escenario panorámico de la Provincia de Entre Ríos expresa igualmente un comportamiento cambiante frente al clima, frente a la distribución como a la intensidad. En esto cabe destacar que se presenta un gradiente nortesur en los montos de precipitación media anual, siendo mayores en el extremo noreste (>1200mm) y descendiendo hacia el suroeste (<800mm).

Se puede concluir que Entre Ríos alterna ciclos secos y húmedos conduciendo años con eventos extremos que desencadenan tanto severas inundaciones (1982, 1997, 2000-2002) como intensas sequías (1988, 2009) con graves impactos socio-productivos por pérdida de cultivos. Dicha variabilidad interanual de las precipitaciones se concentra en otoño y verano, vinculada a la Oscilación Madden-Julian con períodos de 60-90 días, que afecta el paso de sistemas frontales en la región.

Frente a la relación con las tendencias observadas, en este informe se presentan los resultados del análisis basado en la precipitación histórica y proyectada bajo diferentes escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y 8.5) para la provincia de Entre Ríos y los cuatro departamentos de interés: Concordia, Colón, Uruguay y Galeguaychú. Para ello, se centra en el análisis de los datos de la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de Argentina que permite evaluar la variabilidad temporal y espacial de este parámetro a lo largo del siglo XXI.

Se observa que, si bien los valores medios mensuales de precipitación no varían significativamente entre las distintas proyecciones de clima futuro (i.e. mediano y lejano), sí se espera un aumento muy importante en la frecuencia e intensidad de eventos extremos de precipitación diaria en toda la zona de estudio. Estos extremos alcanzarían niveles sin precedentes históricos.

En particular, en el departamento de Colón los registros máximos diarios podrían llegar a alcanzar los 375 mm bajo el escenario RCP 8.5 para fines de siglo (2075-2099), casi duplicando el récord histórico disponible para el periodo 1960-2010. Del mismo modo, las interpolaciones espaciales de eventos extremos efectuadas proyectan precipitaciones extraordinarias superiores a los 330 mm en las localidades de Colón y San José, también hacia fines del presente siglo.



Asimismo, en la zona sur del área analizada, en torno a las ciudades de Concepción del Uruguay y Gualeguaychú, los modelos climáticos estiman eventos extremos por encima de los datos históricos, con registros diarios que superarían los 400 y los 280 mm respectivamente en el escenario RCP 8.5 para el periodo 2075-2099.

En síntesis, este análisis climático señala la futura ocurrencia mucho más frecuente de eventos de precipitación extrema en toda la provincia de Entre Ríos, con registros diarios que podrían más que duplicar los valores históricos máximos observados en las últimas décadas. Este patrón representaría un cambio radical en el régimen de lluvias de la región, con serias consecuencias ambientales, sociales y económicas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al CIMA/CONICET-UBA por la provisión de los datos climáticos de la 3ra. Comunicación Nacional sobre Cambio Climático

BIBLIOGRAFIA

Alarcón, M.F. (2013). Aproximación al análisis de la capacidad de acogida del territorio para el desarrollo de la actividad agrícola: el caso de la cuenca del río Mlriñay, provincia de Corrientes (Argentina). XIV Encuentro de Geógrafos de América Latina (EGAL-2013). Unión Geográfica Internacional – Comité Nacional de Perú, Lima, 18 pp.

Aliaga, V. S., Ferrelli, F., Alberdi Algañaraz, E. D., Bohn, V. Y., & Piccolo, M. C. (2016). Distribución y variabilidad de la precipitación en la Región Pampeana, Argentina.

Aliaga, V. S. (2020). Variabilidad climática de la Región Pampeana y su efecto sobre las lagunas de la región. *Huellas*, 24(1), 243-249.

Castañeda, M. E., & Barros, V. (1994). Las tendencias de la precipitación en el Cono Sur de América al este de los Andes. *Meteorológica*, 19(1), 23-32.

Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., ... & Marengo, J. (2014). Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. *American Journal of Climate Change*, 3(05), 512.

CIMA – Centro de Investigaciones sobre el Mar y la Atmósfera (2014). Base de Datos Climáticos 3ra. Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Noviembre-Diciembre 2020. Disponible en <http://3cn.cima.fcen.uba.ar/>

Geraldes, A. M., & Boavida, M. J. (2005). Seasonal water level fluctuations: Implications for reservoir limnology and management. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 10(1), 59-69.

Quirós, R., Rennella, A., Boveri, M., Rosso, J., Sosnovsky, A. 2002. Factores que afectan la estructura y el funcionamiento de las lagunas pampeanas. *Ecología Austral* 12, 175-185.

Grimm, A. M., Barros, V. R., & Doyle, M. E. (2000). Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of climate*, 13(1), 35-58.

Grimm, A. M. (2011). Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25, 537-554.

SAyDS – Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (2015). Primer Reporte de Actualización Bienal de la República Argentina. Noviembre, 138 pp.

SMN – Servicio Meteorológico Nacional (2023). “Oscilaciones: el mundo en movimiento”. 5 de diciembre de 2023. Disponible en <https://www.smn.gov.ar/noticias/oscilaciones-el-mundo-en-movimiento>

Soriano, A. (1956). Aspectos ecológicos y pasturales de la vegetación patagónica relacionados con su estado y capacidad de recuperación. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Dirección General de Investigaciones Agrícolas, Instituto de Botánica.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American meteorological Society*, 93(4), 485-498.

Tonni, E. P. (2006). Cambio climático en el Holoceno tardío de la Argentina. Una síntesis con énfasis en los últimos 1000 años. *Folia Histórica del Nordeste*, (16), 187-195.

Informe:

Informe complementario del documento ‘Escenarios Futuros de Cambio Climático, incluyendo el análisis de la precipitación en las ciudades solicitadas, de acuerdo al Ítem IV, Inciso B.’

Autoría: Mag. Ignacio Gatti (Consultor Asistente)

Diciembre de 2023.

Este documento ha sido elaborado en el marco de la implementación del proyecto regional (Argentina-Uruguay) Adaptación al cambio climático en ciudades y ecosistemas costeros vulnerables del río Uruguay. Se ha recibido una donación del Fondo de Adaptación para su realización y se implementa a través de CAF (Banco de Desarrollo de América Latina). Los componentes regionales del proyecto son ejecutados por PNUD y los componentes nacionales son ejecutados, respectivamente, por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Argentina y por la Corporación Nacional para el Desarrollo de Uruguay.

El análisis, las observaciones, las recomendaciones de políticas que contiene este documento corresponden exclusivamente a quienes lo han preparado y no reflejan necesariamente las opiniones de las entidades implementadoras y ejecutoras del Proyecto.

INFORME

Se presentan en este informe resumen complementario los sets de datos utilizados de acuerdo con la metodología presentada y descripta en el informe principal. Asimismo, se adjunta un esquema resumen de los métodos utilizados para confeccionar los informes (Figura 1).

Se han realizado estimaciones en base a la metodología de Taylor et al. (2012), Proyecto de Intercomparación de Modelo Acoplado Fase 5 (CMIP5) para datos históricos y para los modelos RCPs 4.5 y 8.5.

Se descargó y analizó la información de precipitación desde el sitio web del CIMA, Base de Datos Climática 3CN <http://3cn.cima.fcen.uba.ar/> Se utilizó tanto datos de precipitación mensual como valores diarios, para una grilla determinada compuesta por 8 celdas. Se trabajó con los departamentos de Concordia, Gualeguaychú, Concepción del Uruguay y Colón.

Se estimó la distribución y la frecuencia de precipitaciones para cada uno de los puntos de la grilla para luego volcarse el análisis en el informe principal.

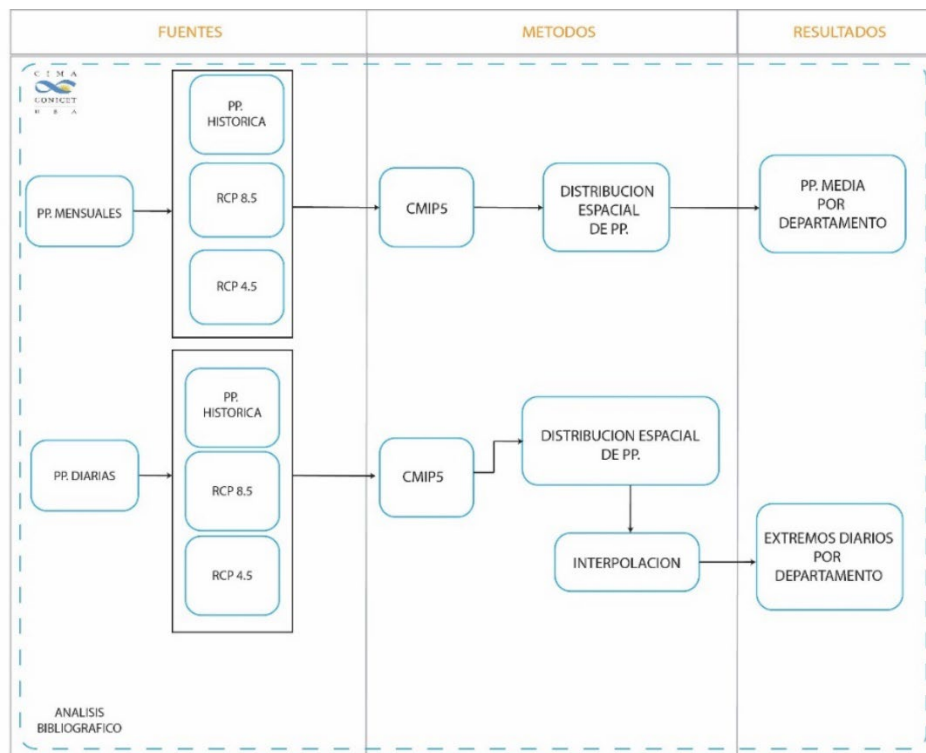


Figura 1. Esquema metodológico adoptado en el informe

En la lista 1 se detallan los archivos Excel utilizados para realizar el informe. Los mismos se han obtenido luego de incorporar información para una grilla determinada que corresponde a los departamentos limítrofes con el Río Uruguay.

Lista 1. Set de datos utilizados en el informe (formato xls.)

Tipo	Título
Precipitación Mensual	Gualeduaychu_final
	Uruguay-final
	Concordia-final
	Colón-final
Precipitación Diaria	Hist_Lat-31.25000_Lon-58.25000
	Hist_Lat-31.75000_Lon-58.25000
	Hist_Lat-32.25000_Lon-58.25000
	Hist_Lat-32.25000_Lon-58.75000
	Hist_Lat-32.75000_Lon-58.25000
	Hist_Lat-32.75000_Lon-58.75000
	Hist_Lat-33.25000_Lon-58.75000
	Hist_Lat-33.25000_Lon-59.25000
	2015-2039-RCP4.5_Lat-31.25000_Lon-58.25000
	2015-2039-RCP4.5_Lat-31.75000_Lon-58.25000
	2015-2039-RCP4.5_Lat-32.25000_Lon-58.25000
	2015-2039-RCP4.5_Lat-32.25000_Lon-58.75000
	2015-2039-RCP4.5_Lat-32.75000_Lon-58.25000
	2015-2039-RCP4.5_Lat-32.75000_Lon-58.75000
	2015-2039-RCP4.5_Lat-33.25000_Lon-58.75000
	2015-2039-RCP4.5_Lat-33.25000_Lon-59.25000
	2015-2039 RCP8.5_Lat-31.25000_Lon-58.25000
	2015-2039 RCP8.5_Lat-31.75000_Lon-58.25000
	2015-2039 RCP8.5_Lat-32.25000_Lon-58.25000
	2015-2039 RCP8.5_Lat-32.25000_Lon-58.75000
	2015-2039 RCP8.5_Lat-32.75000_Lon-58.25000
	2015-2039 RCP8.5_Lat-32.75000_Lon-58.75000
	2015-2039 RCP8.5_Lat-33.25000_Lon-58.75000
	2015-2039 RCP8.5_Lat-33.25000_Lon-59.25000
	2075-2099 RCP4.5_Lat-31.25000_Lon-58.25000
	2075-2099 RCP4.5_Lat-31.75000_Lon-58.25000
	2075-2099 RCP4.5_Lat-32.25000_Lon-58.25000
	2075-2099 RCP4.5_Lat-32.25000_Lon-58.75000
2075-2099 RCP4.5_Lat-32.75000_Lon-58.25000	
2075-2099 RCP4.5_Lat-32.75000_Lon-58.75000	
2075-2099 RCP4.5_Lat-33.25000_Lon-58.75000	
2075-2099 RCP4.5_Lat-33.25000_Lon-59.25000	



	2075-2099 RCP 8.5_Lat-31.25000_Lon-58.25000
	2075-2099 RCP 8.5_Lat-31.75000_Lon-58.25000
	2075-2099 RCP 8.5_Lat-32.25000_Lon-58.25000
	2075-2099 RCP 8.5_Lat-32.25000_Lon-58.75000
	2075-2099 RCP 8.5_Lat-32.75000_Lon-58.25000
	2075-2099 RCP 8.5_Lat-32.75000_Lon-58.75000
	2075-2099 RCP 8.5_Lat-33.25000_Lon-58.75000
	2075-2099 RCP 8.5_Lat-33.25000_Lon-59.25000

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al CIMA/CONICET-UBA por la provisión de los datos climáticos de la 3ra. Comunicación Nacional sobre Cambio Climático

BIBLIOGRAFIA

CIMA – Centro de Investigaciones sobre el Mar y la Atmósfera (2014). Base de Datos Climáticos 3ra. Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Noviembre-Diciembre 2020. Disponible en <http://3cn.cima.fcen.uba.ar/>

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. Bulletin of the American meteorological Society, 93(4), 485-498.