

DOI: 10.24850/j-tyca-14-03-08

Artículos

**Estimación de las precipitaciones diarias de diseño en
Argentina a partir de datos derivados de satélite**
**Estimation of daily design rainfall in Argentina from
satellite-derived data**

Juan F. Weber¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3958-9580>

Pablo T. Stehli²

Gabriel A. Bogino-Castillo³

¹Laboratorio de Hidráulica, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba, Argentina, jweber@frc.utn.edu.ar

²Laboratorio de Hidráulica, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba, Argentina, pstehli@frc.utn.edu.ar

³Laboratorio de Hidráulica, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba, Argentina, gbogino@frc.utn.edu.ar

Autor para correspondencia: Juan Francisco Weber,
jweber@frc.utn.edu.ar



Resumen

Se presentan los resultados de la estimación de las precipitaciones diarias de diseño en Argentina para el 97 % del territorio nacional continental. Este análisis se basó en el procesamiento de los datos de precipitación derivados de satélite (DPDS) del producto CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), con una resolución espacial de 5 km y una cobertura temporal de 37 años. La extracción de los mapas de precipitación diaria máxima anual (pdMa) se efectuó por medio de códigos *ad hoc* desarrollados a través de la plataforma Google Earth Engine. Se compararon las series de pdMa provenientes de CHIRPS con las obtenidas a partir de 64 estaciones pluviométricas provistas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), determinando las pendientes de la regresión lineal. Estos parámetros de la regresión fueron interpolados al territorio bajo estudio para corregir los mapas de pdMa. Los mapas corregidos se procesaron a través de códigos desarrollados en Python para asociar probabilidades empíricas de no excedencia y ajustar la distribución teórica óptima de probabilidades a cada uno de los 106 778 píxeles considerados. A partir de estos resultados se generaron mapas de precipitaciones diarias de diseño para periodos de retorno comprendidos entre 2 y 100 años. Los resultados se validaron contra 30 estaciones provenientes del Sistema Nacional de Información Hídrica, obteniéndose un acuerdo aceptable. Se considera que los resultados obtenidos serán de utilidad en tareas de diseño hidrológico, en especial en las regiones que carecen de registros pluviométricos adecuados para un análisis estadístico tradicional.

Palabras clave: hidrología estadística, sistemas de información geográfica, lluvias de diseño.



Abstract

The results of the estimation of the daily design rainfall in Argentina are presented for 97 % of the continental national territory. This analysis was based on the processing of the Satellite-Derived Precipitation Data (DPDS) of the CHIRPS product (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), with a spatial resolution of 5 km and a temporal coverage of 37 years. The extraction of the Annual Maximum Daily Precipitation (pdMa) maps was carried out by means of *ad-hoc* codes developed through the Google Earth Engine platform. The pdMa series from CHIRPS were compared with those obtained from 64 rainfall stations provided by the National Meteorological Service (SMN), determining the slopes of the linear regression. These regression parameters were interpolated to the territory under study, to enhance the pdMa maps. These corrected maps were processed through codes developed in Python, to associate non-exceedance empirical probabilities and adjust the optimal theoretical probability distribution to each of the 106 778 pixels considered. From these results, daily design rainfall maps were generated for 2-100 year return periods. These results were validated against 30 stations from the National Water Information System, obtaining an acceptable agreement. It is considered that the results obtained will be useful in hydrological design, especially in regions that lack adequate rainfall records for a traditional statistical analysis.

Keywords: Statistical hydrology, geographic information systems, design rainfall.

Recibido: 10/08/2021

Aceptado: 27/12/2021

Introducción

Generalidades

Los sistemas hidrológicos son afectados algunas veces por eventos extremos, tales como tormentas severas, crecientes y sequías. La magnitud de un evento extremo está inversamente relacionada con su frecuencia de ocurrencia, es decir, eventos muy severos ocurren con menor frecuencia que eventos más moderados. La información hidrológica empleada debe seleccionarse cuidadosamente de tal manera que satisfaga las suposiciones de independencia y de distribución idéntica. En la práctica, esto por lo general se lleva a cabo seleccionando el máximo anual de la variable bajo análisis, con la expectativa de que observaciones sucesivas de esa variable de un año a otro sean independientes (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

En la ingeniería de los recursos hídricos se denominan lluvias de diseño a eventos pluviales idealizados que reflejan las exigencias de origen hidrometeorológico a las que se verían sometidas las obras de infraestructura bajo un cierto nivel de riesgo (Caamaño-Nelli & Dasso, 2003). Se caracterizan a través de tres componentes: duración, intensidad y probabilidad de no excedencia, y surgen del análisis

estadístico de series de valores extremos (máximos, en este caso) de precipitaciones reales, registradas de forma habitual por pluviómetros.

En Argentina, como en otros países, las mediciones diarias de precipitación son llevadas a cabo mediante el empleo de estaciones pluviométricas de superficie. Como resultado, las observaciones puntuales a veces no representan de modo adecuado la variabilidad espacio-temporal de los sistemas precipitantes, lo cual hace necesario la incorporación de otras fuentes de medición que puedan mejorar este aspecto (Vidal, Salio, & Pappalardo, 2011).

La regionalización de variables hidrológicas comprende un conjunto de técnicas de inferencia estadística y de modelos probabilísticos que utilizan el conjunto de datos observados, espacialmente distribuidos en puntos de una región considerada homogénea, para estimar los cuantiles asociados con diferentes probabilidades de excedencia en un punto cualquiera dentro de esa región (Zamanillo, Larenze, Tito, Pérez, & Garat, 2008).

La regionalización de precipitaciones máximas en Argentina

Se han desarrollado en diversas provincias del país procedimientos de validez local que han permitido en esos sitios la definición de estándares en la elección de lluvias de diseño. Entre esos casos se pueden citar los siguientes: el trabajo de Caamaño-Nelli y Dasso (2003) para la provincia de Córdoba; el llevado adelante por Zamanillo *et al.* (2008) para la

provincia Entre Ríos; el realizado por Fernández, Fornero y Rodríguez (1999) para el gran Mendoza; el presentado por Weber y Guillén (2018) para la provincia de La Rioja; el efectuado por Catalini, García-Rodríguez, Caamaño-Nelli y Ordoñez (2014), extendiendo la regionalización de precipitaciones máximas a las provincias de Santa Fe y San Luis; y el desarrollado por Guillén, Botelli, García y Catalini (2015), quienes presentan una extensión de la metodología de regionalización llevada a cabo en Córdoba a una parte importante de las provincias del norte argentino: Jujuy, Salta, Tucumán, Catamarca, Santiago del Estero, Chaco y Formosa.

Una de las principales limitaciones de la que adolece la regionalización de precipitaciones de diseño con base en el análisis estadístico de series de estaciones pluviométricas (en particular cuando la densidad espacial de las mismas es baja) radica en el uso de los métodos de interpolación espacial. Estos métodos en general no pueden considerar por sí mismos la variabilidad geográfica, en particular la asociada con la orografía y el clima, al momento de generar un campo continuo de la variable interpolada. Esta limitación, que sería sorteable con una adecuada densidad espacial de estaciones pluviométricas, resulta un limitante importante en la validez de la aplicación de estas técnicas en un país tan extenso y geográficamente diverso como Argentina, con el agravante de la escasa disponibilidad de series extensas y confiables.

El método de Devoto

Se describe a continuación una metodología disponible para la obtención de relaciones intensidad-duración-frecuencia de cobertura nacional.



Devoto (2002) desarrolló, con base en la información de 26 estaciones pluviográficas, un método para la estimación de las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) en la República Argentina en localidades sin información. Asumiendo válida la distribución de Gumbel, una relación de tipo hiperbólico entre intensidad y duración, y a partir de cuatro parámetros obtenibles de mapas (precipitaciones intensas medias de 1 y 12 horas de duración, y los correspondientes coeficientes de variación), permite obtener relaciones sintéticas IDF para todo el territorio nacional. De este modo se convierte en el único procedimiento accesible de regionalización de validez en todo el territorio.

El método asume que para cada periodo de retorno considerado existe una relación entre la intensidad i (en mm/h), la duración t de la tormenta (en minutos) dada por:

$$i = \frac{a}{t^{b+c}} \quad (1)$$

donde a , b y c son parámetros a determinar. Devoto (2002) asume un valor constante para $b = 0.80$, de modo que los parámetros a y c se obtienen a partir de un par de valores i_1 e i_2 para las duraciones $t_1 = 1$ hora y $t_2 = 12$ horas. Las precipitaciones asociadas X_1 y X_2 se obtienen a partir de las precipitaciones medias $\bar{X}$ de esa duración, de su coeficiente de variación Cv y del periodo de retorno Tr , asumiendo válida la distribución de Gumbel, como:

$$X = \bar{X} \cdot \left\{ 1 - \frac{0.5772}{1.282} Cv - \frac{1}{1.282} Cv \cdot \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{Tr} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

Devoto (2002) asume que las precipitaciones intensas medias de 1 h y 12 h de duración, y sus correspondientes coeficientes de variación son campos continuos. Determinando esos valores para las 26 estaciones pluviográficas consideradas, y con base en ello, publica cuatro mapas de isolíneas para estas magnitudes, a partir de los cuales sugiere obtener, por interpolación lineal, los correspondientes valores para cualquier otro sitio del país. En la Figura 1 se presentan las precipitaciones intensas medias de 1 y 12 horas de duración publicadas por Devoto (2002) para la aplicación de su metodología.

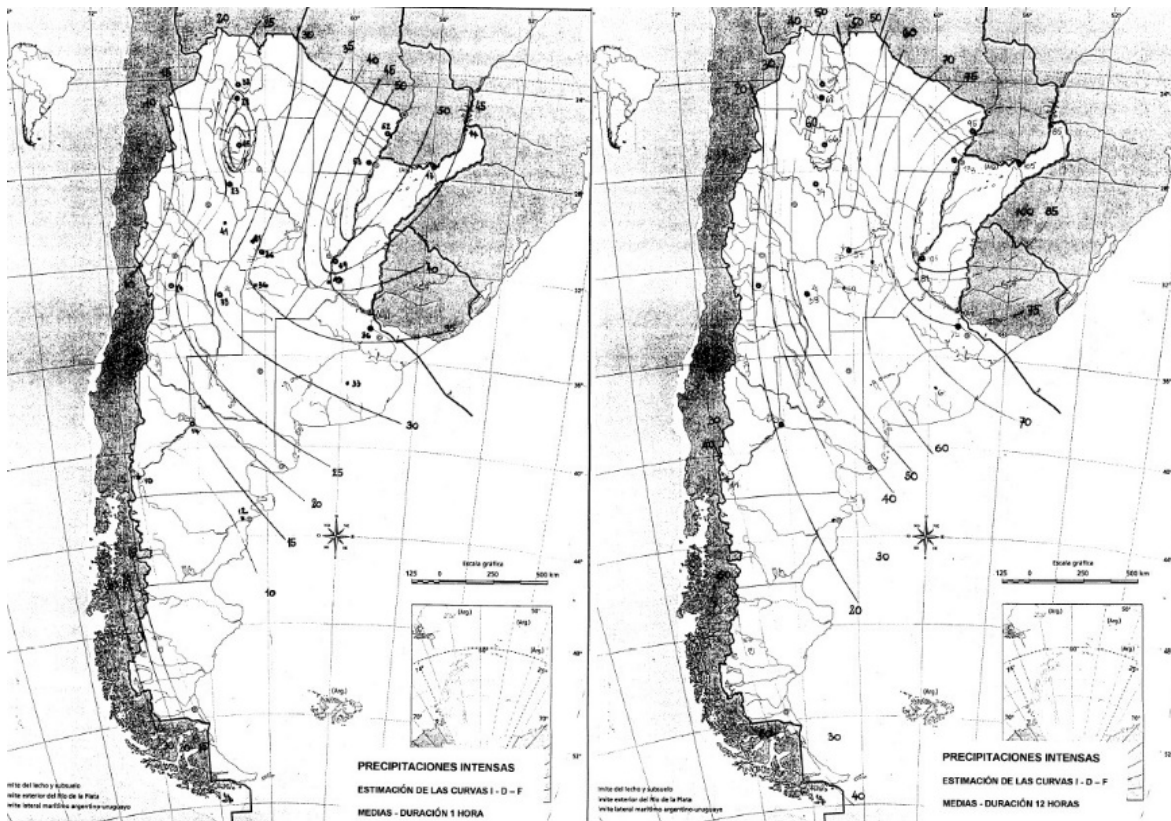


Figura 1. Precipitaciones intensas medias de 1 hora y 12 horas de duración presentadas por Devoto (2002).

Los datos de precipitación derivados de satélite (DPDS)

Las mediciones *in situ* tienen varios inconvenientes, como una cobertura areal incompleta, y deficiencias en la mayoría de las áreas oceánicas y escasamente pobladas. Con los instrumentos avanzados basados en el infrarrojo (IR) y microondas (MW), las observaciones satelitales compensan estas deficiencias al proporcionar una cobertura que es más homogénea espacialmente y que se completa temporalmente para vastas áreas del globo.

La intermitencia, junto con el muestreo en el tiempo y el espacio, es el principal desafío para la observación de la precipitación. Los pluviómetros son indispensables para medir la precipitación de forma directa, pero la densidad global de estaciones pluviométricas es limitada. Además, las observaciones se someten a una interpolación para formar conjuntos de datos cuadrículados para cubrir todo el mundo; esto suaviza los valores extremos y afecta las tendencias a largo plazo, en especial en regiones con puntos de medición dispersos.

Los datos satelitales proporcionan una resolución temporal adecuada y una resolución espacial fina con una amplia cobertura, lo que permite estimar con precisión las precipitaciones en algunas regiones no monitoreadas, como los océanos, áreas montañosas complejas y desiertos (Sun *et al.*, 2018).

Algunos conjuntos de DPDS están disponibles operativamente, entre ellos se pueden citar TRMM (Huffman *et al.*, 2007), PERSIANN (Ashouri *et al.*, 2015), CMORPH (Joyce, Janowiak, Arkin, & Xie, 2004),

CFSR (Saha *et al.*, 2014) y CHIRPS (Funk *et al.*, 2015). Además, se han diseñado productos que combinan mediciones satelitales y de campo para mejorar la precisión de las mediciones de variables climáticas; se asume que este enfoque maximiza los beneficios relativos de cada tipo de datos. La Tabla 1 presenta algunos datos de precipitación derivados de satélites y sus principales características.

Tabla 1. Características de los algunos datos de precipitación derivados de satélites (DPDS).

DPDS	Resolución	Frecuencia	Cobertura	Periodo
TRMM	0.25°	3 h/diario	35° S-35° N	1998-2014
PERSIANN-CDR	0.25°	Diario	60° S-60° N	1983-presente
CMORPH	0.25°	30 min/3 h/diario	60° S - 60° N	2002-presente
CHIRPS	0.05°/0.25°	Diario	50° S - 50° N	1981-presente

El uso más frecuente de estas tecnologías ha sido habitualmente a paso de tiempo mensual o semanal (Hurtado-Montoya & Mesa-Sánchez, 2014). Son menos frecuentes las aplicaciones vinculadas con precipitaciones diarias (Gebremichael & Hossain, 2010), principalmente asociada con la incertidumbre de estas estimaciones. En Argentina se han realizado trabajos en este sentido, en especial con el producto TRMM (Brito-Hoyos, 2015; Sepulcri, Di-Bella, & Moschini, 2009; Brizuela, Noretto, Aguirre, & Bressán, 2015; Su, Hong, & Lettenmaier, 2008), con aplicaciones vinculadas con el modelado hidrológico y la predicción climática. También se han explorado herramientas que facilitan el manejo

de información dinámica espacialmente distribuida en un ambiente GIS (Bortagaray, 2018) o en forma independiente (Gavilán *et al.*, 2019).

Son menos frecuentes las aplicaciones de estos productos vinculadas con el análisis de eventos extremos de precipitación, y los existentes están principalmente asociados con el estudio de huracanes y eventos excepcionales (Miao, Ashouri, Hsu, Sorooshian, & Duan, 2015; AghaKouchak, Behrangi, Sorooshian, Hsu, & Amitai, 2011). Dado que los productos descritos cuentan ya en muchos casos con varias décadas de registros disponibles, son susceptibles de ser evaluados en cuanto a su capacidad para el análisis de series de extremos; en Argentina, incluso, estas series son aún más extensas que muchos de los registros pluviométricos tradicionales (ver, p. ej., Weber, González-Castillo, & Peña-Pollastri, 2017).

Objetivos

Como objetivo general de este trabajo se establece evaluar la utilidad del conjunto de datos de precipitación derivados de satélites (DPDS) CHIRPS en la generación de campos de lluvias diarias de diseño en Argentina.

Entre los objetivos específicos se pueden indicar:

- Desarrollar herramientas que permitan la adquisición y análisis automático de datos de precipitación derivados de satélites en general y del producto CHIRPS en particular.
- Analizar el grado de correlación espacial y temporal de estos datos con la información pluviométrica existente en el país.

- Caracterizar estadísticamente las series de precipitaciones diarias máximas anuales (pdMa) obtenidas a partir de los datos de precipitación derivados de satélites.
- Generar mapas de lluvias diarias de diseño para el país a partir del producto satelital considerado, que describan de modo adecuado la variabilidad espacial de las precipitaciones, considerando los efectos orográficos y climáticos en la amplia extensión territorial de Argentina.

Materiales y métodos

Información pluviométrica

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizó la información pluviométrica diaria provista por el Servicio Meteorológico Nacional en 64 estaciones pluviométricas, cuya distribución geográfica puede verse en la Figura 2. Para cada una de las estaciones se determinó el mes de precipitación media mensual mínima, definiendo de este modo el inicio del año hidrológico en cada una de ellas. Dicha información se agregó como un atributo adicional a una capa vectorial en un modelo geográfico desarrollado en el sistema de información geográfica QGIS.

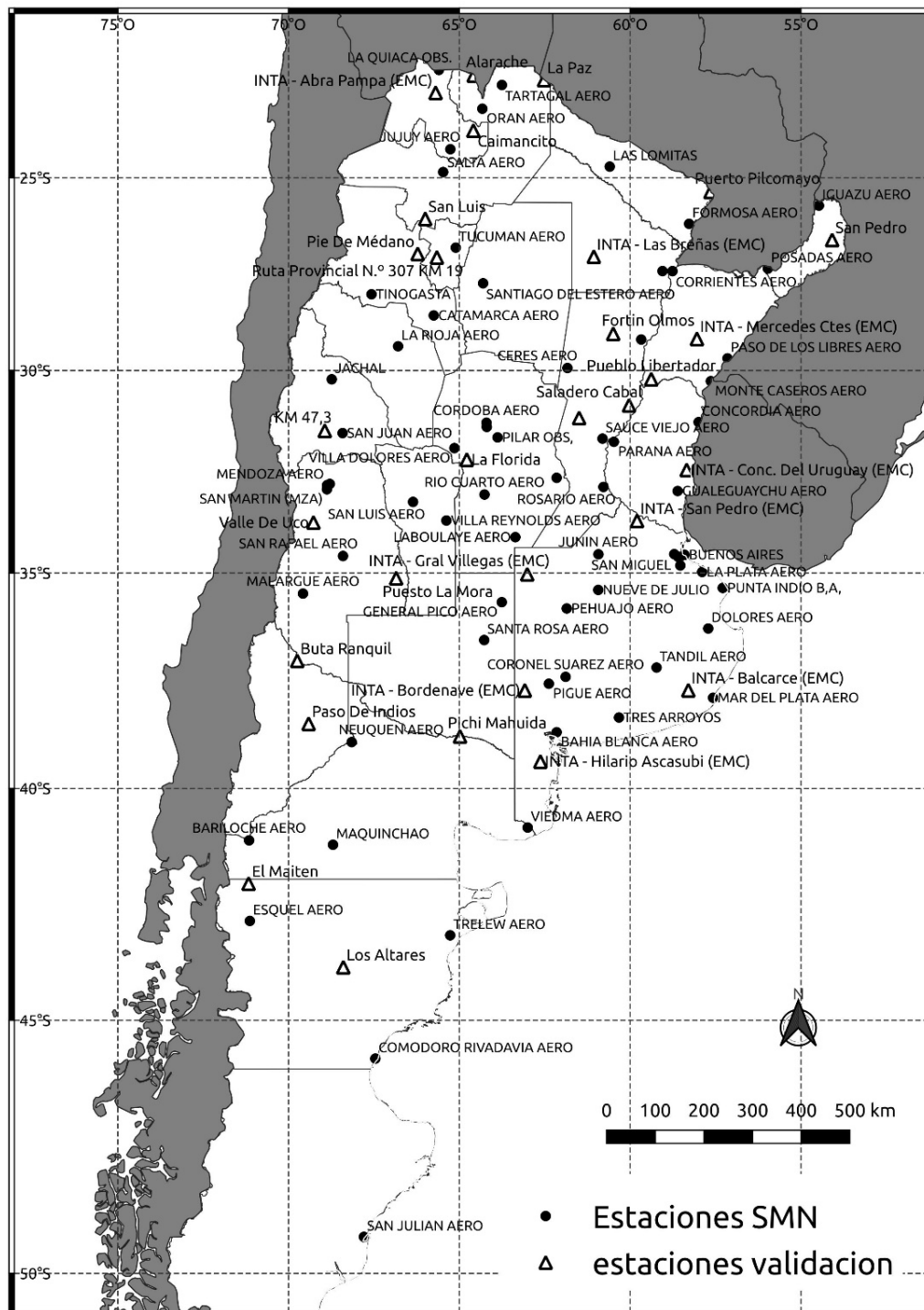


Figura 2. Estaciones pluviométricas del Servicio Meteorológico Nacional (●) y para la validación (Δ) consideradas.

Además, para la validación de los resultados, se consideró un conjunto de 30 estaciones pluviométricas disponibles a través del Sistema Nacional de Información Hídrica (anteriormente conocido como BDHi-Base de Datos Hidrológica Integrada) disponible públicamente por la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, dependiente del Ministerio de Obras Públicas. De las estaciones seleccionadas, nueve pertenecen a la red de estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y el resto a la Red Hidrológica Nacional o redes provinciales. Tales estaciones se seleccionaron a fin de validar la respuesta del modelo en las áreas geográficas no cubiertas por las estaciones del SMN (Figura 2), con coberturas temporales iguales o superiores a la de los datos sintéticos utilizados.

Datos de precipitación derivados de satélites

Debido a la resolución espacial, frecuencia, y cobertura temporal disponible se optó por trabajar con la información del producto CHIRPS (Funk *et al.*, 2015).

CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations) nace de la colaboración entre el Servicio Geológico de EUA (USGS) y el Earth Resources Observation and Science (EROS). CHIRPS es un conjunto de datos de precipitaciones cuasi global de más de 30 años de cobertura temporal continua. CHIRPS incorpora imágenes satelitales de resolución de 0.05° (unos 5.4 km) con datos de estaciones *in situ*

(reanálisis) para crear series de tiempo de lluvia grilladas (ráster). El producto utilizado tiene una resolución temporal de un día, con una disponibilidad continua desde el 01/01/1981. Los datos son provistos por el Climate Hazards Center, University of California, Santa Barbara (EUA).

La estimación de la precipitación de CHIRPS no está ligada solo a estaciones meteorológicas sino que combina estaciones meteorológicas junto a estimaciones de precipitación basadas en satélites de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Con esta fusión de recursos se evita el sesgo que sufren las estimaciones de los pluviómetros en zonas rurales (por escasez de estaciones) y las estimaciones de datos satélites en territorios complejos, obteniendo un producto mixto mejorado. CHIRPS ofrece información de precipitación mundial (entre latitudes 50° S y 50° N) de libre disponibilidad. Los datos pueden ser descargados en mosaicos globales bajo resoluciones temporales diarias, cada dos meses, cada tres meses, y bajo formatos georreferenciados BIL, TIF o NetCDF (Funk *et al.*, 2015).

CHIRPS fue desarrollado para apoyar a la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional de la Red de Sistemas de Alerta Temprana (FEWS NET), aprovechando los enfoques utilizados en productos exitosos de precipitación por infrarrojos térmicos (TIR), como la estimación de precipitaciones (RFE2) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) y la RAINAT Climatology de África o la serie TAMSAT African Rainfall Climatology and Time de la Universidad de Reading (TARCAT). CHIRPS utiliza el Análisis de Precipitación Multisatélite de la Misión de Medición de Lluvias Tropicales, versión 7 (TMPA 3B42 v7)

para calibrar las estimaciones globales de lluvia de la duración de nube fría (CCD) (Funk *et al.*, 2015).

Digitalización del método de Devoto

Con fines comparativos fue necesario implementar una versión digital del método de Devoto (2002) antes descrito debido a que este procedimiento es de carácter manual en su versión original. Para ello, los cuatro mapas publicados por el autor (precipitaciones medias intensas de 1 y 12 horas, y sus correspondientes coeficientes de variación) fueron georreferenciados y se digitalizaron sus isolíneas. Luego, por interpolación lineal, y mediante el uso del sistema de información geográfica QGIS, se construyeron campos ráster continuos para estas magnitudes. Posteriormente, mediante operaciones del álgebra de mapas y para cada periodo de retorno considerado (2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años), se determinaron las precipitaciones X_1 y X_2 , y las correspondientes intensidades i_1 e i_2 para duraciones de 1 y 12 horas, aplicando la Ecuación (2). Asumiendo $b = 0.80$, se determinaron los parámetros a y c de la Ecuación (1) para cada periodo de retorno; a partir de estos parámetros se obtuvieron las precipitaciones de 24 horas de duración; finalmente, estos valores se dividieron por el coeficiente de relación de duraciones $X_{24h} / X_{1 \text{ día}} = 1.08$, sugerido por Caamaño-Nelli y Dasso (2003) como valor medio para todo el país.

De este modo se obtuvieron siete campos ráster continuos (uno por periodo de retorno) para las estimaciones de las precipitaciones diarias

de diseño con base en el método actualmente disponible para todo el territorio nacional.

Metodología

La metodología desarrollada consistió de los pasos indicados y esquematizados en el diagrama de flujo de la Figura 3. A continuación se describen las herramientas y métodos empleados para llevar a cabo los pasos indicados.

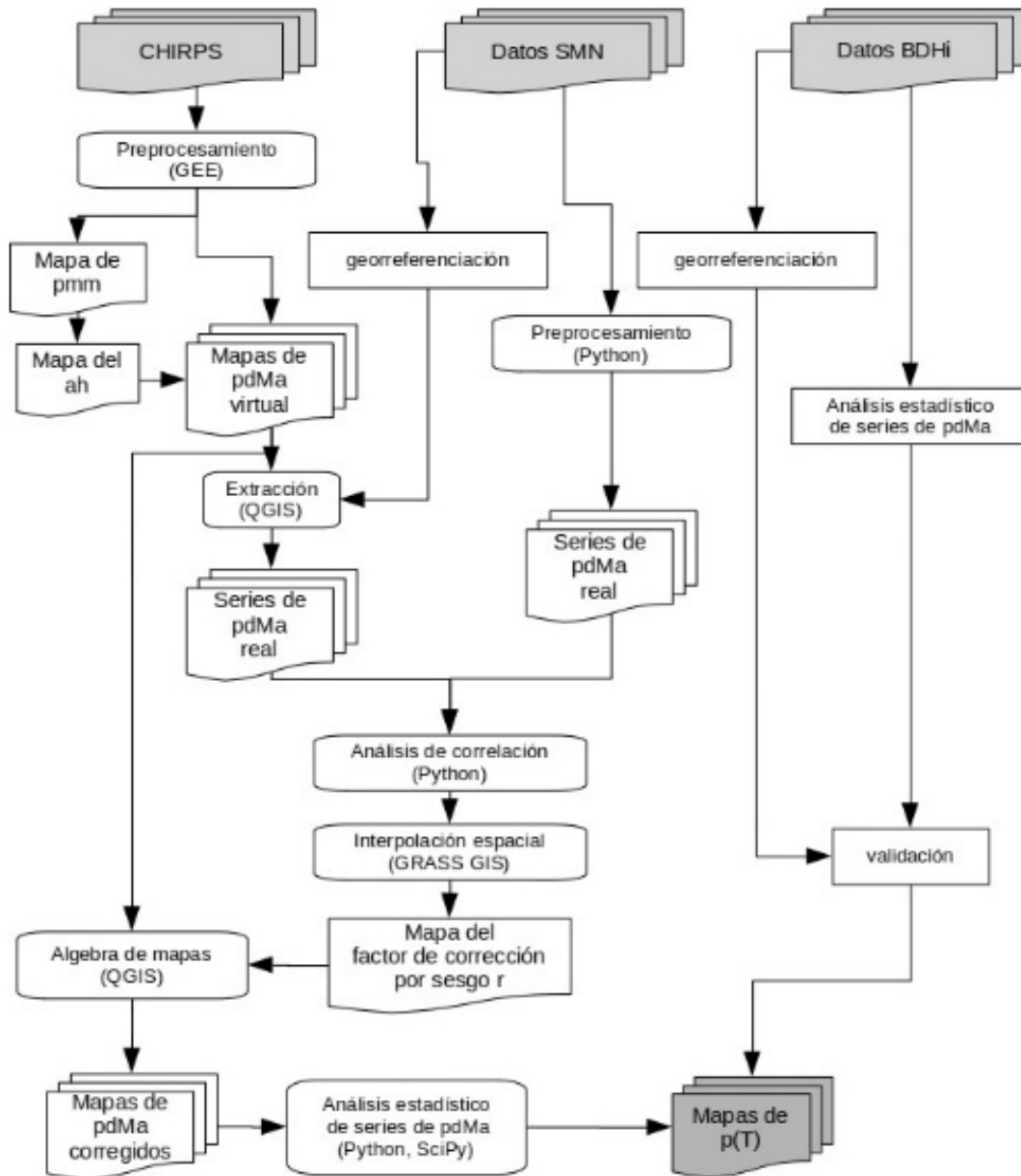


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología aplicada en este trabajo.

Preprocesamiento de los DPDS

Esta etapa incluye la descarga, y el recorte espacial y temporal de los DPDS. A partir de éstos, se obtienen los mapas de precipitación máxima diaria anual (pdMa) y de precipitaciones medias mensuales (pmm); de estos últimos se tiene la determinación del mapa del año hidrológico para el área de interés (identificado a través de mes de inicio).

Por la natural masividad de la información a procesar (Big Data) fue necesario recurrir a una herramienta que permitiera el manejo automatizado de grandes fuentes de datos espaciales. Este proceso se realizó mediante un conjunto de códigos *ad hoc* desarrollados en la API Code Editor de la plataforma Google Earth Engine (GEE) (Gorelick *et al.*, 2017).

Los procesos se recortaron a una cobertura espacial comprendida entre los 18° y 50° latitud sur, y los 48° y 77° de longitud oeste, permitiendo cubrir un 97 % del territorio nacional continental, quedando fuera de la cobertura la provincia de la Tierra del Fuego y el sector meridional de la provincia de Santa Cruz.

La extensión temporal considerada cubrió el periodo 1981-2017 para armonizar el desarrollo conjunto con las otras actividades, fuentes de datos y objetivos del proyecto; esto aseguró un total de 36 años hidrológicos considerados. Así, considerando la extensión temporal y espacial de los datos, se procesaron un total de 132 296 series de precipitación sintética en el país (una por píxel) de 13 514 días de extensión, es decir, un total de 1 787 848 144 ($\sim 1.8 \cdot 10^9$) datos pluviométricos virtuales.

Generación del mapa del año hidrológico. El año hidrológico es un periodo de 12 meses a lo largo del cual se consideran y analizan las diversas variables hidrológicas sobre una determinada cuenca hidrográfica. El año hidrológico no coincide necesariamente con el año natural, es decir, el periodo que convencionalmente transcurre entre el 1º de enero y el 31 de diciembre de un mismo año. Esto responde a la natural variabilidad espacial del clima (Linsley & Franzini, 1972).

Una forma de identificar el año hidrológico es encontrar el periodo sucesivo de 12 meses que de manera más consistente, año tras año, proporcione la mayor correlación entre la precipitación y el flujo superficial, y que presente además cambios insignificantes en el almacenamiento (es decir, el agua en el suelo y la nieve).

El comienzo del año hidrológico puede variar entre una región y otra, incluso dentro de un mismo país. El análisis temporal de las variables hidrológicas, basado en el año hidrológico, permite preservar la hipótesis estadística de independencia, en particular en el análisis de series de extremos hidrológicos. En ausencia de otras variables es habitual considerar, para la definición del inicio del año hidrológico, el mes de menor precipitación media mensual.

Se desarrollaron, en GEE y para tal fin, algoritmos de procesamiento de información. Los mapas ráster así generados fueron exportados en formato GeoTIFF, con una resolución espacial de 5 km, similar a la de la información de base. Los mapas resultado de los procesos antes descritos fueron localmente procesados mediante el Sistema de Información Geográfica QGIS (QGIS Development Team, 2020). En este ambiente de trabajo se desarrollaron los mapas de visualización de resultados, al igual que la extracción de los valores puntuales de precipitaciones media

mensual, media anual, y mes de inicio del año hidrológico, en correspondencia con las estaciones pluviométricas del Servicio Meteorológico Nacional antes descritas.

Generación de los mapas de pdMa. Para cada uno de los 36 años hidrológicos considerados se generó un mapa ráster conteniendo la precipitación máxima diaria anual (pdMa) en cada píxel, mediante un código desarrollado en GEE, atendiendo la definición del inicio del año hidrológico dado por el mapa antes presentado, y utilizando la información de CHIRPS (pdMa virtual). Estos mapas de pdMa se descargaron localmente (como archivos GeoTIFF) y se posprocesaron utilizando el *software* QGIS.

Preprocesamiento de los datos pluviométricos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Los datos se clasificaron por estación, y se extrajeron las series de pdMa (series reales) y de precipitaciones medias mensuales. Adicionalmente se georreferenciaron de forma adecuada las 64 estaciones consideradas.

Análisis de correlación

En correspondencia con cada una de las 64 estaciones del SMN consideradas se extrajo (mediante el *software* QGIS) la serie de precipitaciones diarias máximas anuales (pdMa) virtual asociada. De este modo se obtuvieron dos series de 36 valores asociados con cada una de

las 64 estaciones consideradas: la procedente de los datos del SMN (serie real) y la procedente de los datos de CHIRPS (serie virtual).

Dado que en el análisis estadístico de las series de valores extremos el primer paso consiste en la asignación de probabilidades empíricas de no excedencia en función de la posición que cada valor de la serie ocupa en una lista ordenada, o posición de ploteo (Castillo, 2012), es posible realizar la comparación de las series reales y virtuales previo ordenamiento: las series ordenadas preservan las propiedades estadísticas de interés de las series originales y por lo tanto tienen la misma utilidad a los fines de la estimación de lluvias diarias de diseño. Bajo esta premisa se planteó un modelo de corrección por sesgo de la forma:

$$pdMa_r = r \cdot pdMa_v \quad (3)$$

donde

$pdMa_r$ es la precipitación diaria máxima anual real (obtenida de los datos del SMN)

$pdMa_v$, la precipitación diaria máxima anual virtual (obtenida de los datos de CHIRPS)

r es la pendiente de la recta de regresión lineal forzada a pasar por el origen (para evitar imágenes negativas para el subdominio positivo), que puede interpretarse como un coeficiente de corrección de errores sistemáticos o de corrección por sesgo que permite estimar valores reales de $pdMa$ a partir de valores virtuales.

Este análisis se hizo para cada una de las 64 estaciones consideradas, y sus resultados agregados como un nuevo atributo a la capa de estaciones del SMN en QGIS.

Corrección de los mapas de pdMa

Con base en los 64 valores georreferenciados del coeficiente de corrección por sesgo r se realizó una interpolación spline bilineal (Brovelli, Cannata, & Longoni, 2004), implementada en el comando `v.surf.bspline` de GRASS GIS (Neteler & Mitasova, 2013), generando un campo de valores de r para el sector del territorio nacional considerado, con la misma resolución espacial que los mapas de pdMa virtual antes descritos. Este factor r representa un factor de corrección por sesgo con el cual corregir las precipitaciones virtuales.

Los 36 mapas de precipitación diaria máxima anual extraídos a partir de la información de CHIRPS fueron corregidos multiplicándolos, píxel a píxel, por el mapa del factor de corrección por sesgo antes descrito, obteniéndose un nuevo conjunto de 36 mapas corregidos de pdMa (pdMa_c).

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de las series de pdMa corregidas se implementó un código en el lenguaje de programación Python, utilizando las librerías SciPy (Virtanen *et al.*, 2020), NumPy (Harris *et al.*, 2020) y GDAL



(GDAL/OGR contributors, 2021), que procesó, para cada uno de los 132 296 píxeles activos considerados las series de pdMa y generó como resultado los siguientes mapas:

- distr.tiff (entero): distribución teórica óptima de probabilidades, como código entero.
- param1.tiff, param2.tiff, param3.tiff (real): parámetros óptimos de la distribución dada en el mapa anterior.
- R2.tiff (real): coeficiente de determinación del ajuste.
- T2.tiff, T5.tiff, T10.tiff, T20.tiff, T25.tiff, T50.tiff, T100.tiff (real): precipitación diaria de diseño, estimada con base en la distribución óptima dada en distr.tiff, para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años, respectivamente.

El análisis estadístico de cada serie de valores extremos se desarrolló en los siguientes pasos:

1. *Extracción y ordenamiento de la serie y asignación de probabilidades empíricas.*

Para cada píxel se extrajo la serie de 36 valores de pdMa_c, se ordenó y se le asignó una probabilidad de no excedencia según su posición de ploteo:

$$F(x_m) = P(X < x_m) = \frac{m-b}{n+1-2b} \quad (4)$$

donde

n es el número de registros (36)

m , la posición que ocupa el valor x_m en la lista ordenada

b es un parámetro que permite seleccionar la fórmula a utilizar.

En este caso, se aplicó la fórmula de Gringorten, con $b = 0.44$ (Castillo, 2012).

2. Ajuste de una distribución teórica de probabilidades.

A partir de los 36 pares ordenados $(x_i, F(x_i))$, y utilizando las funciones estadísticas de SciPy, se ajustaron las funciones de distribución de probabilidades Lognormal, Gumbel, GEV y Gamma, cuyas funciones de densidad de probabilidad vienen dadas, respectivamente, por (Naghetini & Andrade-Pinto, 2007):

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_Y\sqrt{2\pi}} e^{-(1/2)[(\ln x - \mu_Y)/\sigma_Y]^2}, x > 0 \quad (5)$$

$$f(x) = e^{-z-e^{-z}}, z = \frac{x-\mu_0}{\beta} \quad (6)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} t(x)^{\xi+1} e^{-t(x)}, \xi \neq 0 \Rightarrow t(x) = \left[1 + \xi \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{\frac{-1}{\xi}}, \xi = 0 \Rightarrow t(x) = e^{-(x-\mu)/\sigma} \quad (7)$$

$$f(x) = \frac{\lambda}{\Gamma(\alpha)} (\lambda x)^{\alpha-1} e^{-\lambda x}, x > 0 \quad (8)$$

En estas expresiones:

$Y = \ln(x)$ = es el logaritmo natural de la variable aleatoria (pdMa).

$\mu, \mu(Y)$ = son las medias de la variable aleatoria y de los logaritmos de la variable aleatoria, respectivamente.

σ , $\sigma(Y)$ = son las desviaciones típicas de la variable aleatoria y de los logaritmos de la variable aleatoria, respectivamente.

μ_0 = es la moda de la variable aleatoria.

$\beta = \sigma \cdot \sqrt{6}/\pi$ = es el factor de escala en la distribución de Gumbel.

ξ = es el parámetro de forma de la distribución GEV.

α = es el parámetro de forma de la distribución Gamma.

$\lambda = \alpha \cdot \mu$ = es la recíproca del parámetro de escala de la distribución Gamma.

Γ = es la función gamma, extensión del concepto de factorial a los números reales.

Con base en los periodos de retorno (y, por lo tanto, de las probabilidades de no excedencia) empíricos determinados, y de la distribución óptima hallada (y sus parámetros) se determinaron, píxel a píxel, las precipitaciones asociadas; con base en ello se calculó el coeficiente de determinación R^2 de acuerdo con la Ecuación (9) (Canavos, 2003):

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_r^2}{\sigma^2} \quad (9)$$

donde

σ_r^2 es la varianza residual

σ^2 la varianza total de las pdMa consideradas.

Como resultado de este proceso se obtuvo un mapa ráster georreferenciado con la distribución óptima, píxel a píxel; otro mapa con

el coeficiente de determinación R^2 del ajuste; tres mapas con los parámetros de dicha distribución, y siete mapas de las precipitaciones de diseño (uno por cada recurrencia considerada).

Validación de los resultados

Para la validación de los resultados obtenidos en el proceso anterior se utilizaron series de precipitaciones diarias de 30 estaciones seleccionadas (Figura 2), que fueron descargadas del portal del Sistema Nacional de Información Hídrica. A su vez, las estaciones fueron correctamente georreferenciadas. Estas series fueron inspeccionadas para detectar, y eventualmente corregir, errores o inconsistencias. Luego, y en forma similar a lo indicado previamente, se extrajo la serie de precipitaciones diarias máximas anuales, atendiendo a la definición local del año hidrológico.

Tanto para el ajuste de las distribuciones teóricas antes descritas como para la obtención de las precipitaciones diarias de diseño asociadas con los diferentes periodos de retorno considerados (así como de su intervalo de confianza, para un nivel del 90 %), se utilizó el *software* de análisis estadístico CumFreq (Oosterbaan, 2019).

Para cada una de las 30 estaciones de validación consideradas se aplicó el programa CumFreq, obteniéndose la distribución óptima (entre las cuatro consideradas: lognormal, Gumbel, GEV y gamma), y para ella se determinaron las precipitaciones correspondientes a periodos de

retorno de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años; así como los límites inferior y superior del intervalo de confianza del 90 % asociado con la estimación.

Finalmente se compararon las precipitaciones de diseño obtenidas a partir de las series virtuales con las obtenidas a partir de las series reales. Se asumió que existe correspondencia si aquéllas caen dentro del intervalo de confianza de éstas.

Resultados

Mapa del año hidrológico

En la Figura 4 (izquierda) puede observarse un gráfico de dispersión de las precipitaciones medias mensuales para las estaciones consideradas, comparando los valores extraídos de las series reales (estaciones del SMN) con las series virtuales (generadas a partir de los DPDS de CHIRPS). En la misma figura se superpone la recta identidad, y la recta de regresión lineal de los datos mencionados. Como puede observarse, hay una muy buena correspondencia entre las precipitaciones medias mensuales reales y virtuales ($R^2 = 0.97$). Cabe destacar que la figura indicada representa un conjunto de 768 pares ordenados, correspondientes a 12 valores por cada una de las 64 estaciones analizadas.

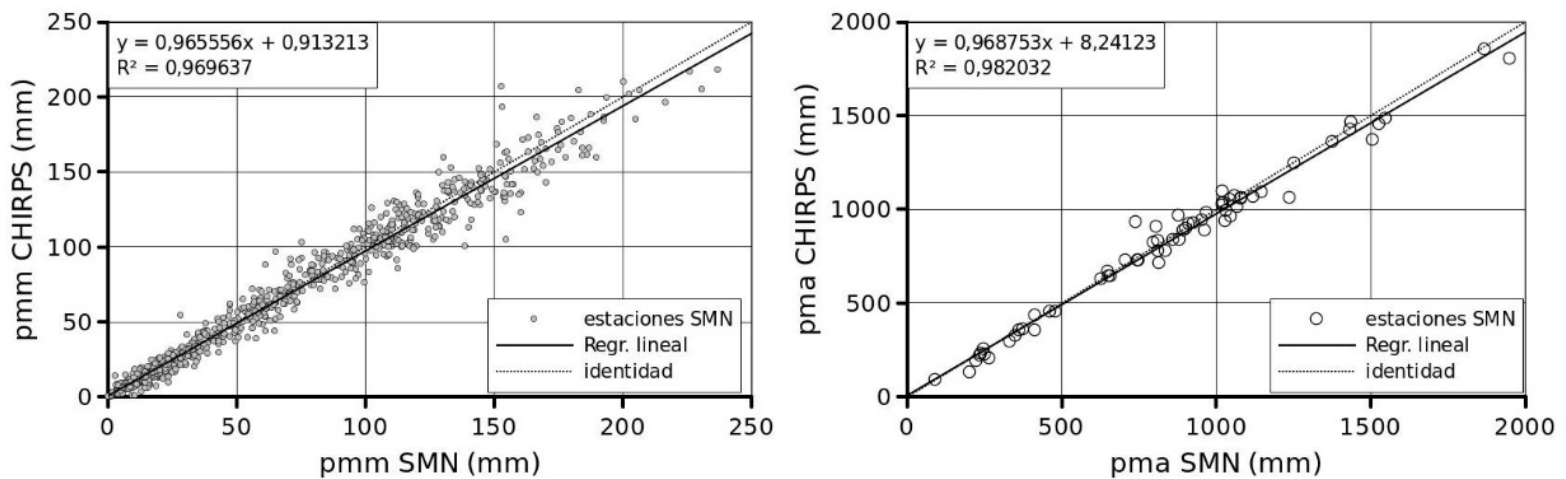


Figura 4. Precipitaciones medias mensuales (izquierda) y anuales (derecha) reales (SMN) y virtuales (CHIRPS). Se superponen la recta identidad (trazos) y la regresión lineal (continua), junto con su ecuación y su coeficiente de determinación R^2 .

Un análisis similar se presenta a la derecha de la misma figura, en este caso para las precipitaciones medias anuales. El gráfico de dispersión presenta ahora 64 pares ordenados (uno por estación considerada). La recta de regresión obtenida (cercana a la identidad), junto con el coeficiente de determinación, muestran la buena correspondencia entre las series.

Puede observarse, en general, una buena correspondencia entre el mes de inicio del año hidrológico obtenido para las estaciones consideradas, para las series de precipitaciones reales (SMN) y virtuales (CHIRPS), ya que con la excepción de cuatro estaciones (Malargüe, Neuquén, Viedma y Puerto San Julián), el mes de inicio del año hidrológico entre ambas series difieren en no más de dos meses. Específicamente, de las 64 estaciones, 36 (56 %) coinciden en el mes inicio del año

hidrológico, 17 (27 %) difieren en un mes, 7 (11 %) difieren en dos meses, y cuatro (6 %) en más de dos meses.

En la Figura 5 (izquierda) puede observarse la distribución espacial del año hidrológico, categorizado a través del mes inicial del mismo, producido a partir de la información de CHIRPS. Puede observarse una gran variabilidad espacial de los resultados obtenidos, sin embargo también pueden apreciarse amplias regiones con resultados espacialmente homogéneos, lo que evidencia cierta consistencia en el producto obtenido. La amplia variabilidad en los resultados en la estepa patagónica responde, nuevamente, al bajo grado de estacionalidad en las series virtuales de precipitaciones.

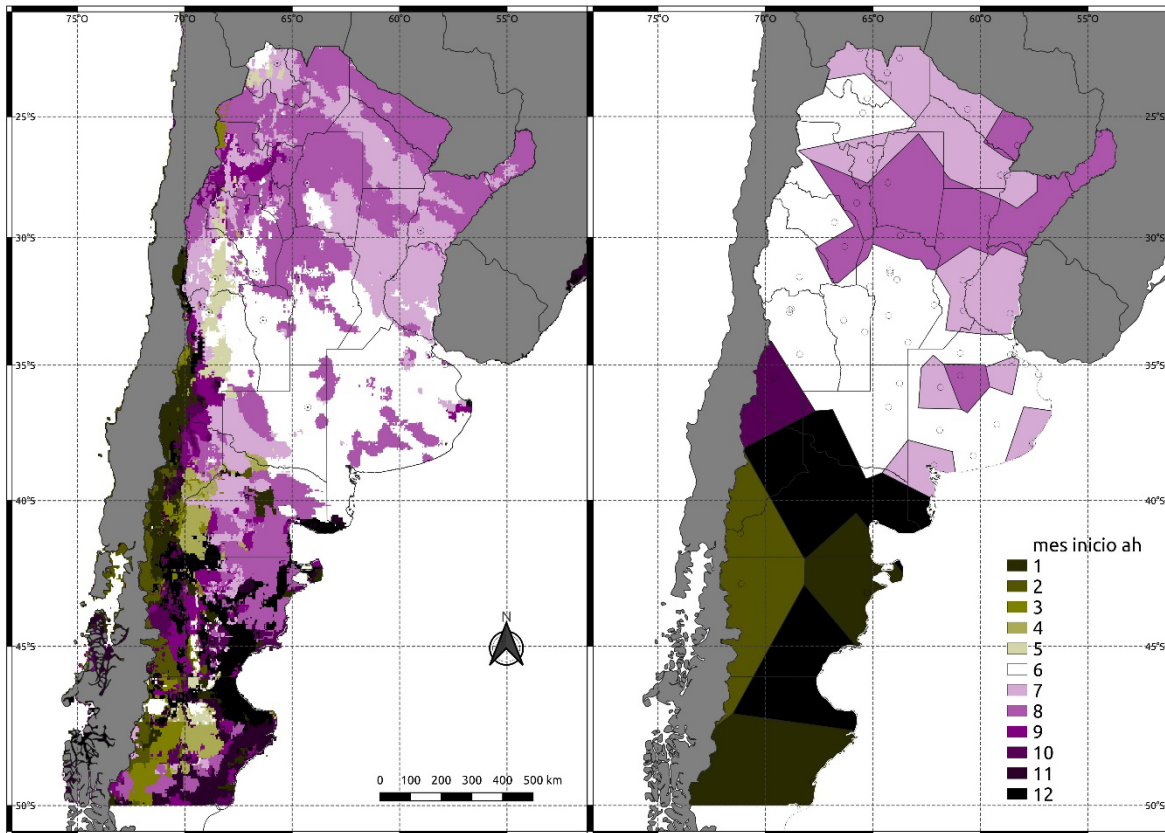


Figura 5. Mapa del año hidrológico de Argentina (expresado a través de su mes de inicio) obtenido a partir de los Datos de CHIRPS (izquierda) y de la información pluviométrica del SMN, mediante teselación de Voronoi y posterior fusionado de entidades según los resultados (derecha). Los puntos representan las estaciones del SMN consideradas.

Con fines comparativos, en la Figura 5 (derecha) se presenta el mismo mapa, pero obtenido a partir del análisis de las series puntuales de precipitaciones medias mensuales del SMN en las 64 estaciones consideradas, distribuidas espacialmente a partir de una Teselación de Voronoi (polígonos de Thiessen), y fusionados desde los resultados obtenidos. Este proceso se llevó a cabo mediante el sistema de

información geográfica QGIS. Según se aprecia, hay una tendencia general compartida entre lo presentado en la Figura 9: la diagonal árida marca un límite entre dos regiones, la ubicada al noreste, con un año hidrológico iniciado en los meses de junio, julio o agosto (invierno), y la ubicada al sudoeste, coincidente con la Patagonia, incluida la región sur de la provincia de Mendoza, con un año hidrológico iniciado en los meses de verano; sin embargo, el mapa obtenido de los DPDS presenta una riqueza espacial no detectable en su homólogo obtenido a partir de las estaciones del SMN. En particular, puede observarse cierto efecto atribuible a la orografía en la cordillera y el pedemonte de la región de Cuyo y en zonas de la Puna catamarqueña y jujeña que no es posible reproducir a partir de los datos puntuales del SMN.

Mapas de precipitación diaria máxima anual (pdMa)

A partir del procesamiento descrito previamente, se obtuvieron 36 mapas de pdMa en correspondencia con cada año hidrológico considerado. En la Figura 6 se presenta, a título de ejemplo, la distribución geográfica de la pdMa virtual para dos años hidrológicos en particular.

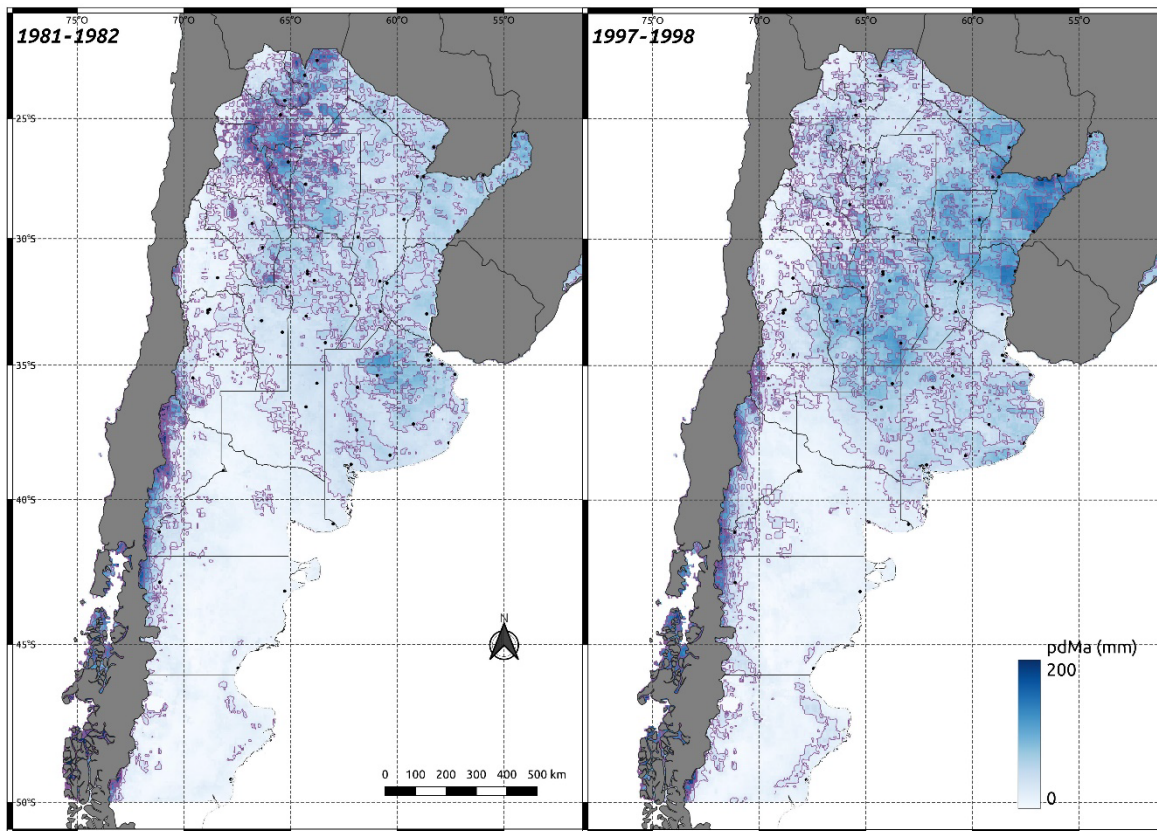


Figura 6. Mapas de precipitación diaria máxima anual (pdMa) virtual para dos años hidrológicos (1981-1982 a la izquierda; 1997-1998 a la derecha) generados a partir de la información de CHIRPS. Equidistancia de isohietas: 25 mm.

Análisis de correlación

Una comparación año con año (hidrológico) de las pdMa reales y virtuales arroja para el conjunto de las 64 estaciones (2 304 pares ordenados) el gráfico de dispersión de la Figura 7 (izquierda). Puede observarse una

ligera tendencia en la correlación, sin embargo también se observa una variabilidad aleatoria significativa; esto es, CHIRPS no reproduce con suficiente exactitud la pdMa de un año determinado, sino con errores aleatorios significativos. Esto puede observarse en forma más acentuada cuando se analiza cada serie (estación) de forma individual. A título de ejemplo se presenta en la Figura 8 (izquierda) el análisis realizado para la estación Córdoba Observatorio.

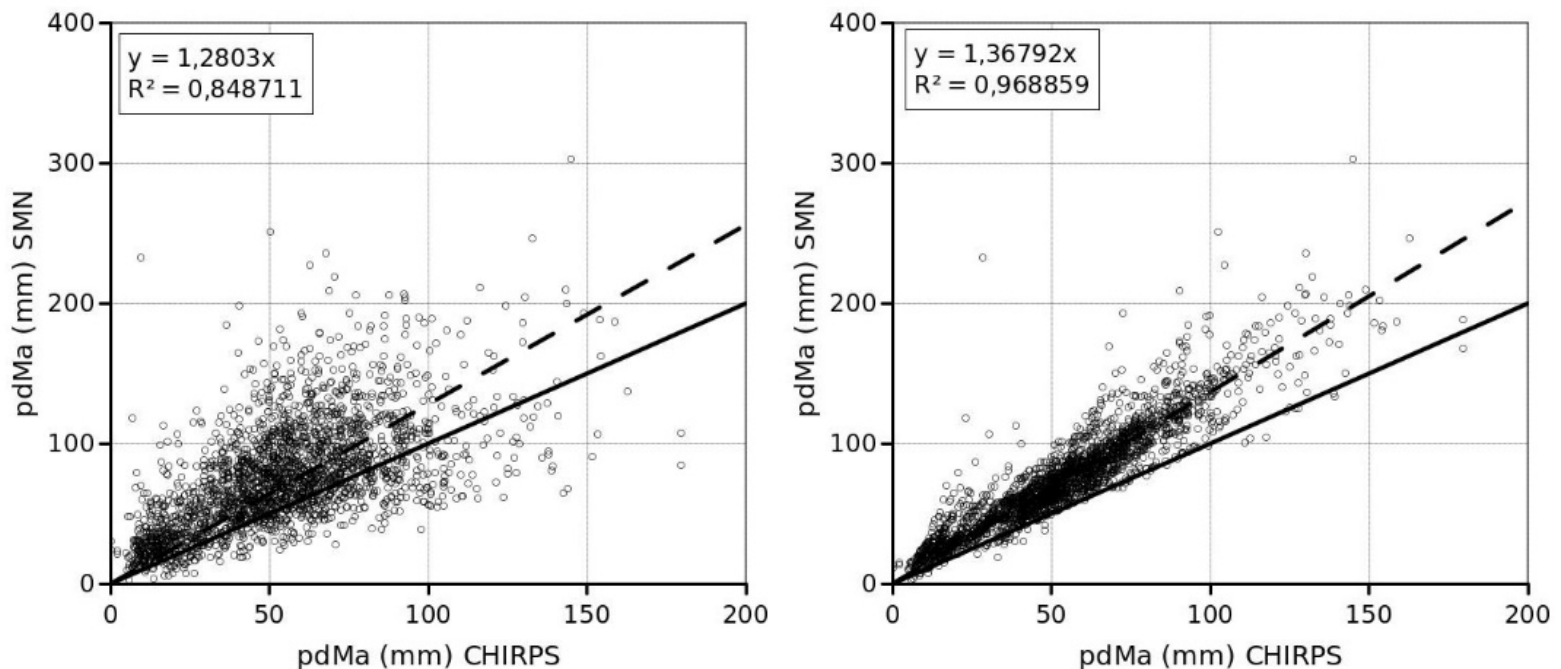


Figura 7. Precipitaciones diarias máximas anuales (pdMa) reales (SMN) *versus* virtuales (CHIRPS). A la izquierda, la correspondencia directa (año con año). A la derecha, la de las series ordenadas. La línea continua es la identidad; la de trazos, la recta de regresión que pasa por el origen.

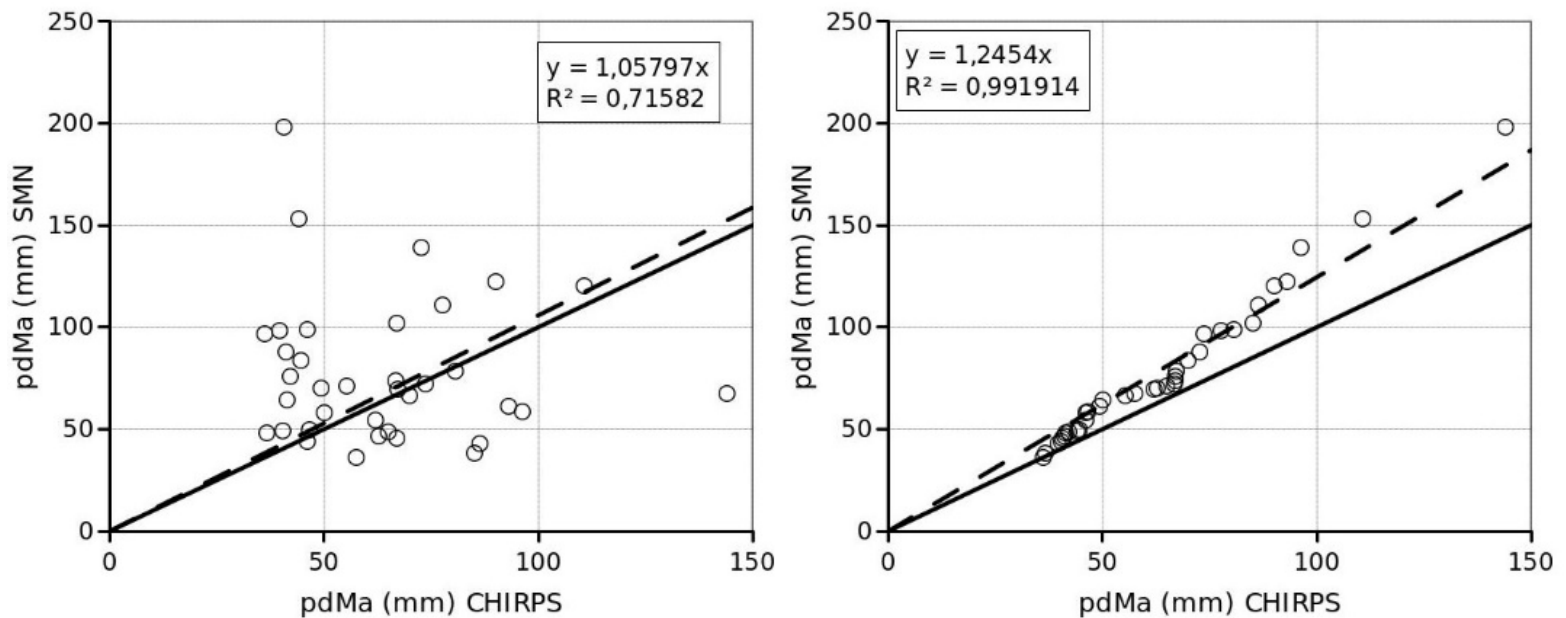


Figura 8. Precipitaciones diarias máximas anuales (pdMa) reales (SMN) *versus* virtuales (CHIRPS) para la estación Córdoba Observatorio. A la izquierda, la correspondencia directa (año con año). A la derecha, la de la serie ordenada. La línea continua es la identidad; la de trazos, la recta de regresión que pasa por el origen.

Se realizaron las comparaciones que se presentan a la derecha de la Figura 7 (para la totalidad de las estaciones) y la Figura 8 (en una estación de ejemplo), considerando las series ordenadas. Se puede observar el significativo aumento de la correlación lineal y, por lo tanto, la notable reducción de los residuos en el modelo de corrección por sesgo dado por la Ecuación (3).

Mapa de corrección por sesgo

De acuerdo con la Figura 7 (derecha) se puede concluir que, en términos generales, las pdMa son subestimadas por CHIRPS; sin embargo, la observación de los valores individuales del coeficiente de corrección por sesgo r muestran tanto subestimaciones como sobreestimaciones de acuerdo con la localización geográfica. Con base en esto se consideró el factor de corrección por sesgo como una variable espacial continua. Para obtener el campo asociado se realizó la interpolación spline bilineal antes descrita, obteniéndose el mapa de la Figura 9.

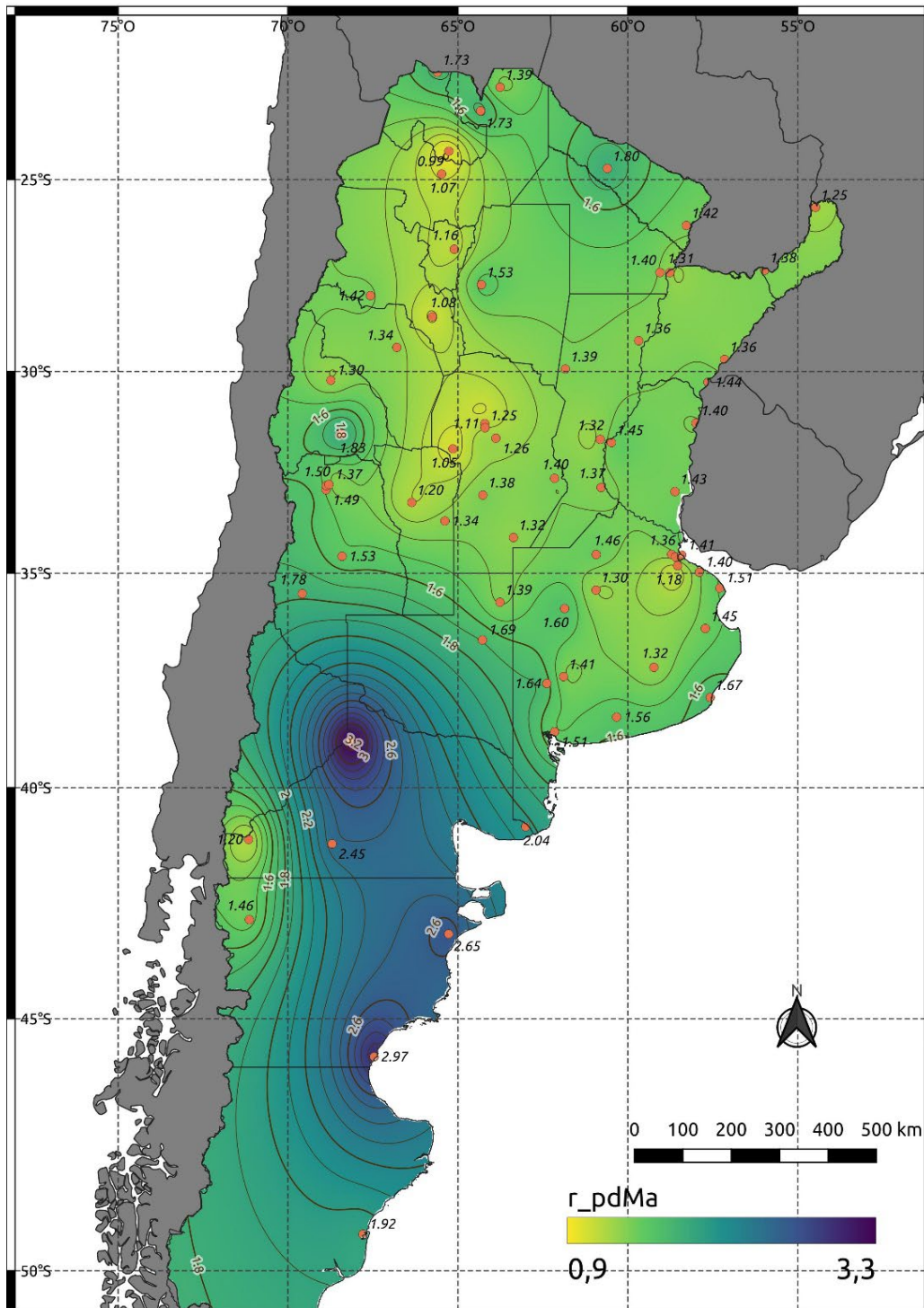


Figura 9. Distribución espacial del parámetro r de la regresión lineal $pdMa_r = r \cdot pdMa_v$. Series ordenadas.

Mapas de precipitaciones de diseño

Con base en las distribuciones óptimas halladas (y sus parámetros), se estimaron las precipitaciones correspondientes a periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años, en correspondencia con cada uno de los pixeles. Con ello, se construyeron los mapas de precipitaciones de diseño correspondientes, que fueron visualizados y posprocesados en el sistema de información geográfica QGIS. En la Figura 10, Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15 y Figura 16 se presentan los mapas obtenidos.

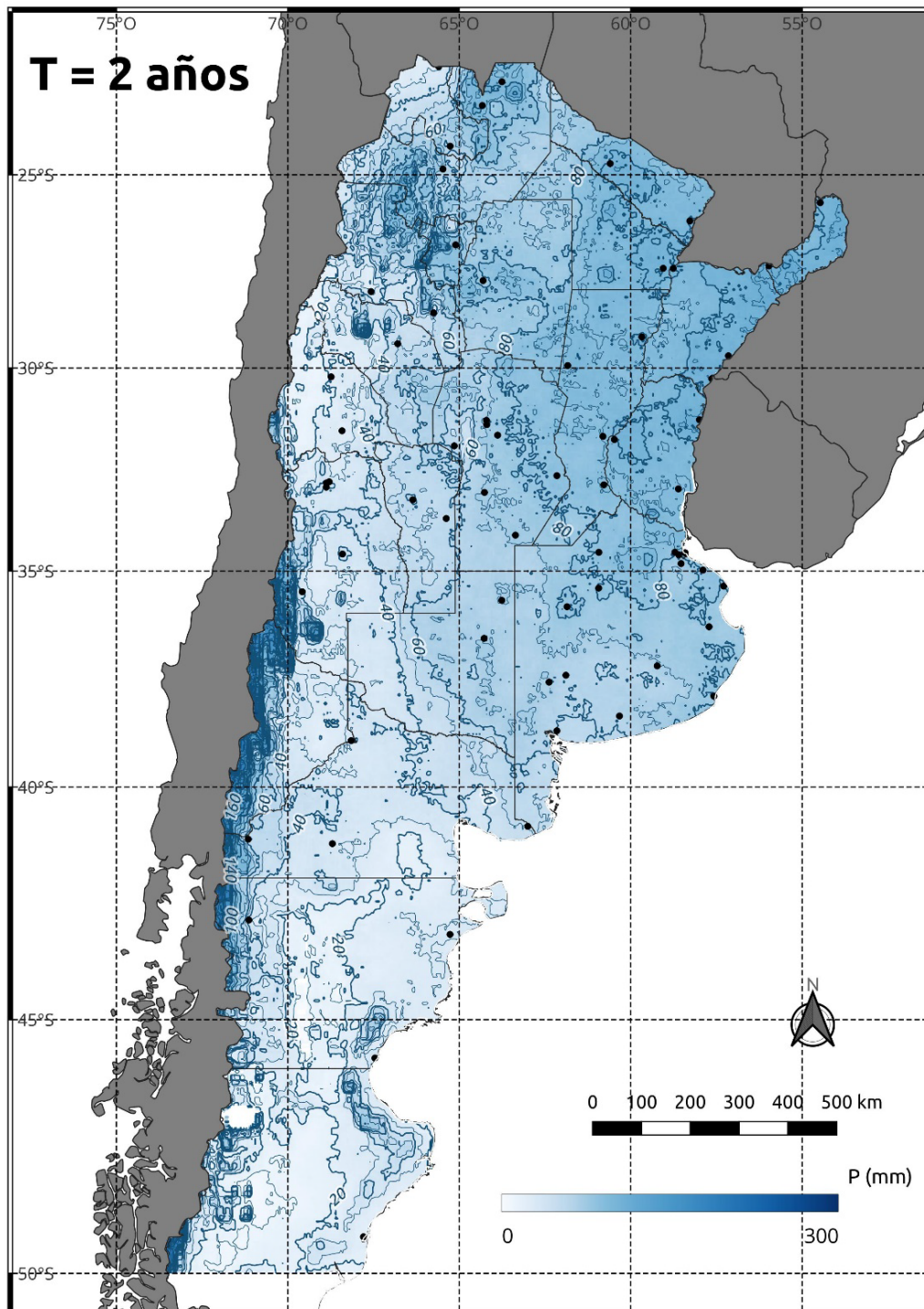


Figura 10. Precipitaciones de diseño estimadas para un periodo de retorno de dos años. Equidistancia: 10 mm.

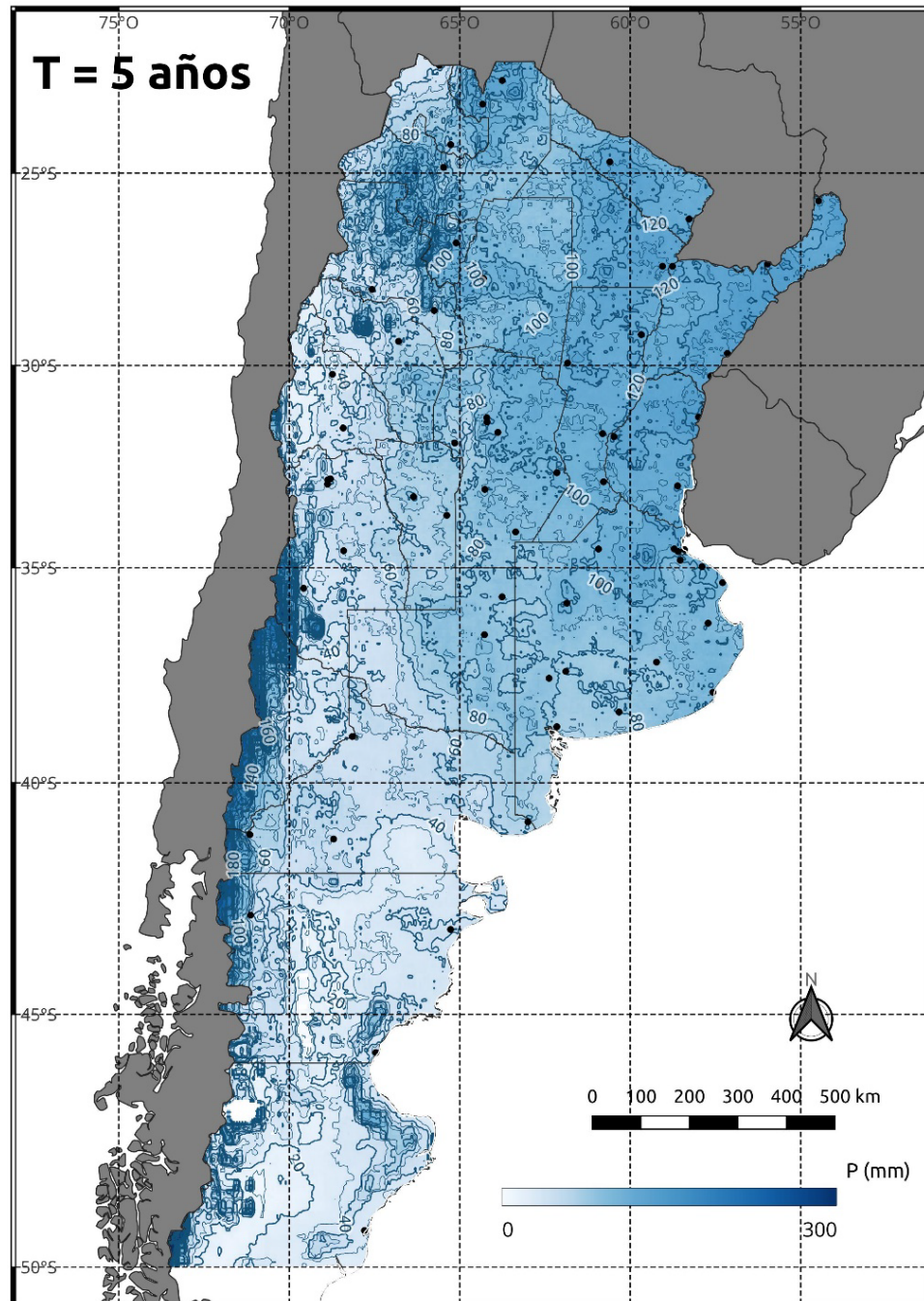


Figura 11. Precipitaciones de diseño estimadas para un periodo de retorno de cinco años. Equidistancia: 10 mm.

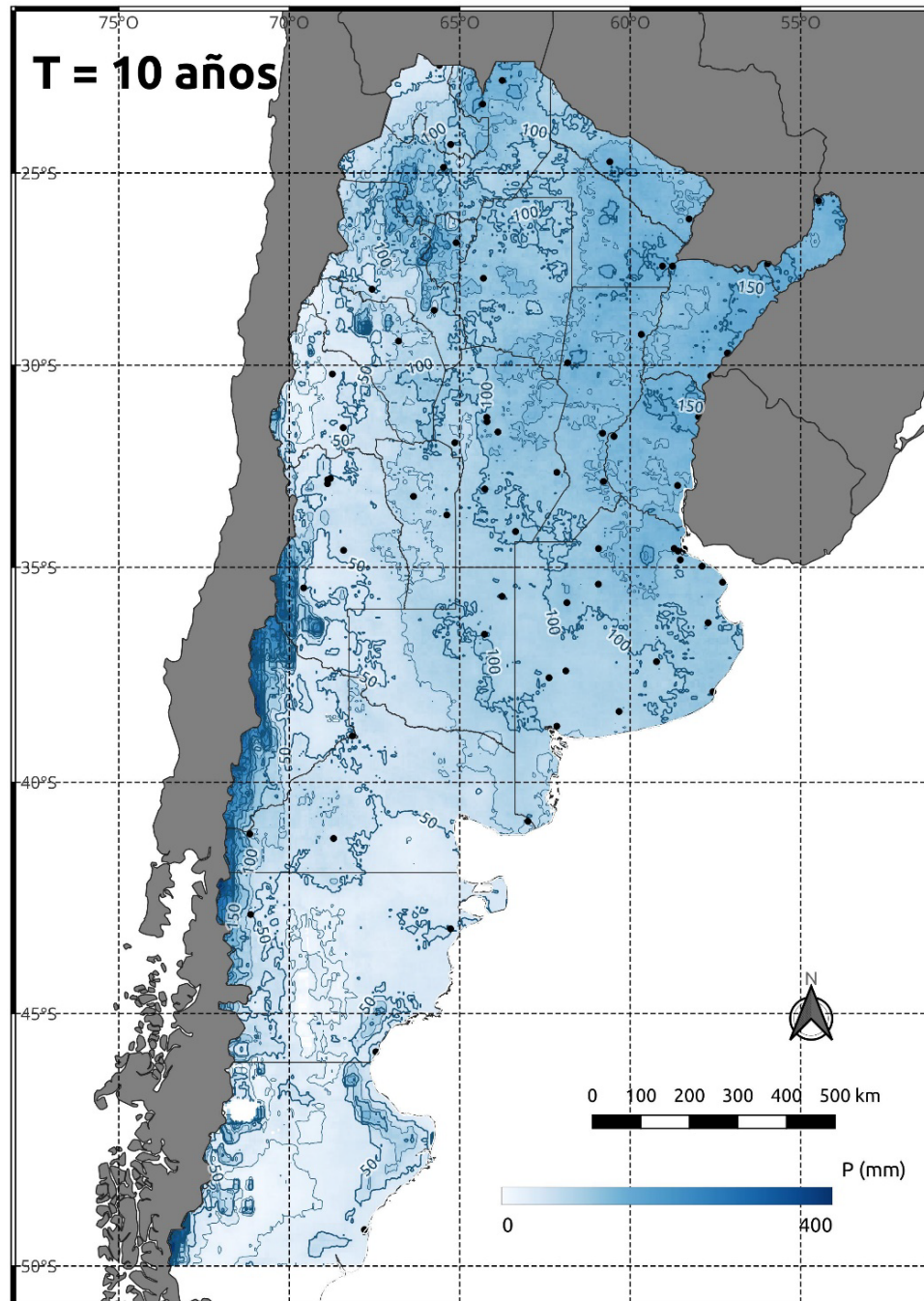


Figura 12. Precipitaciones de diseño estimadas para un periodo de retorno de 10 años. Equidistancia: 25 mm.

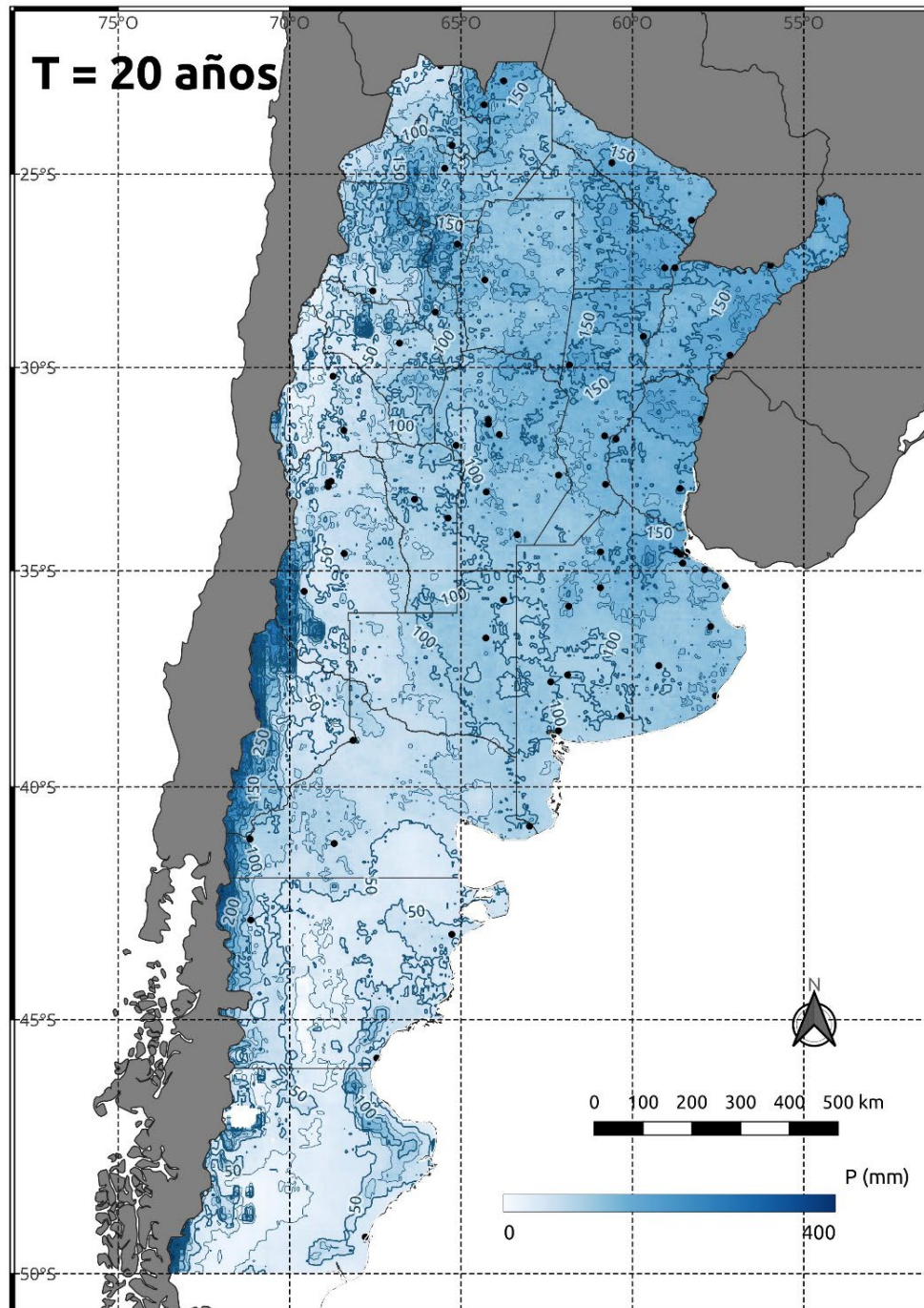


Figura 13. Precipitaciones de diseño estimadas para un periodo de retorno de 20 años. Equidistancia: 25 mm.

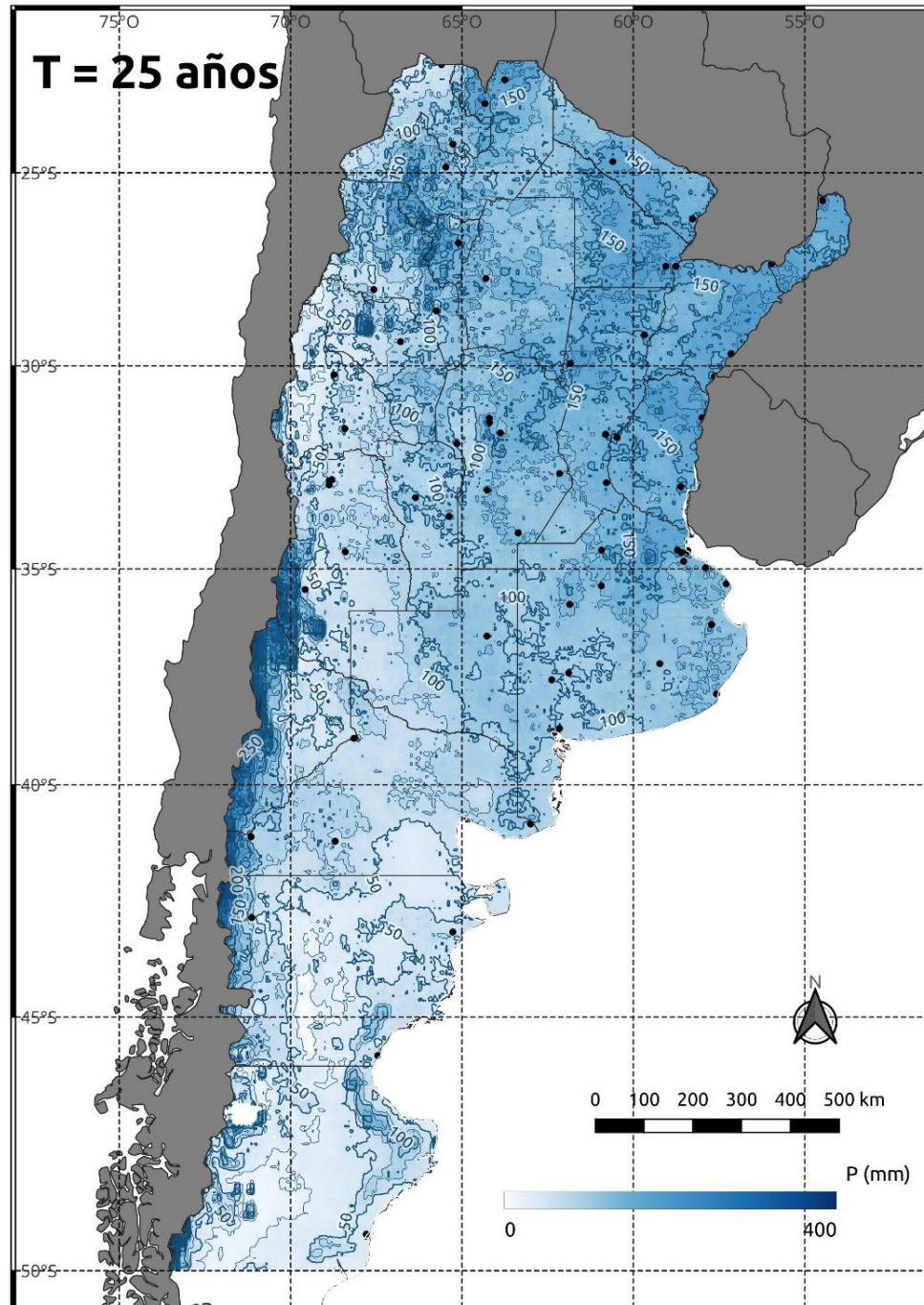


Figura 14. Precipitaciones de diseño estimadas para un periodo de retorno de 25 años. Equidistancia: 25 mm.

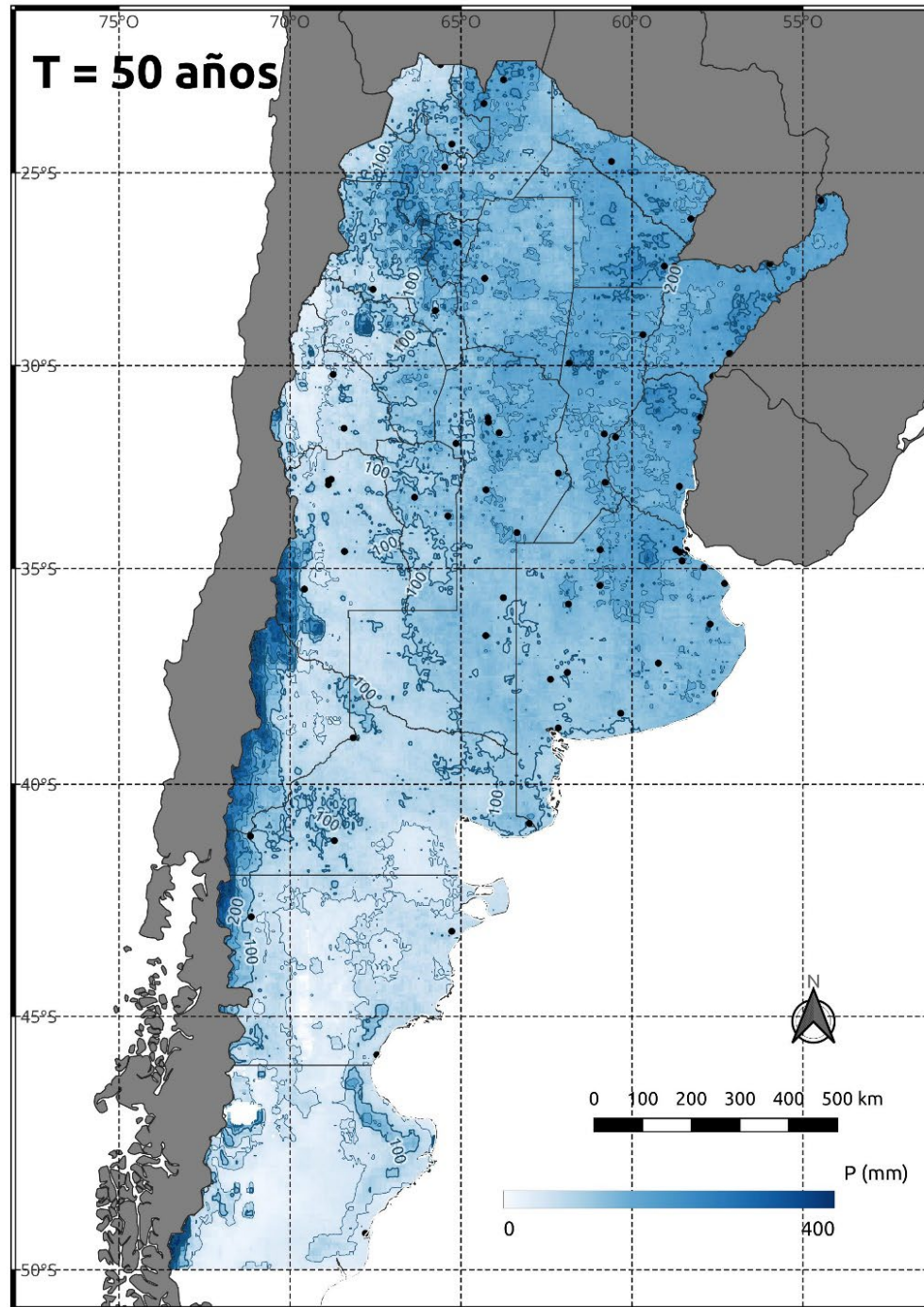


Figura 15. Precipitaciones de diseño estimadas para un periodo de retorno de 50 años. Equidistancia: 50 mm.

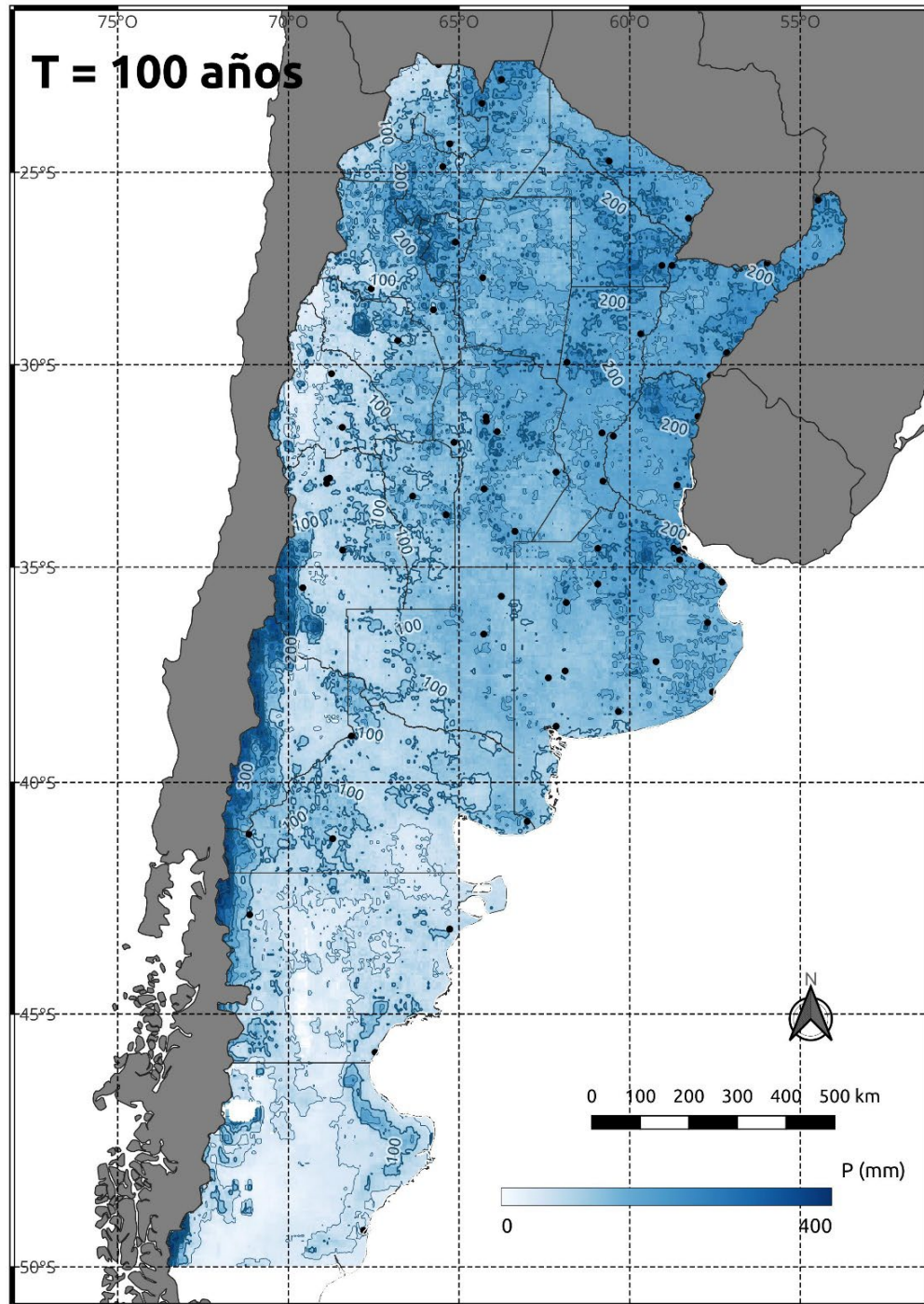


Figura 16. Precipitaciones de diseño estimadas para un periodo de retorno de 100 años. Equidistancia: 50 mm.

Resultados de la validación

Las precipitaciones de diseño obtenidas en las 30 estaciones pluviométricas reservadas para la validación se compararon con las extraídas de los mapas sintéticos generados a partir de las precipitaciones virtuales. En la Figura 17 se presentan, a título de ejemplo, las precipitaciones reales (series pluviométricas) y virtuales (CHIRPS) de diseño, en función del periodo de retorno; agregando a las precipitaciones de diseño reales el intervalo de confianza obtenido para un nivel del 90 % de confianza para 4 de las 30 estaciones. Se agregan también las estimaciones de estas lluvias de diseño obtenidas a partir del método de Devoto.

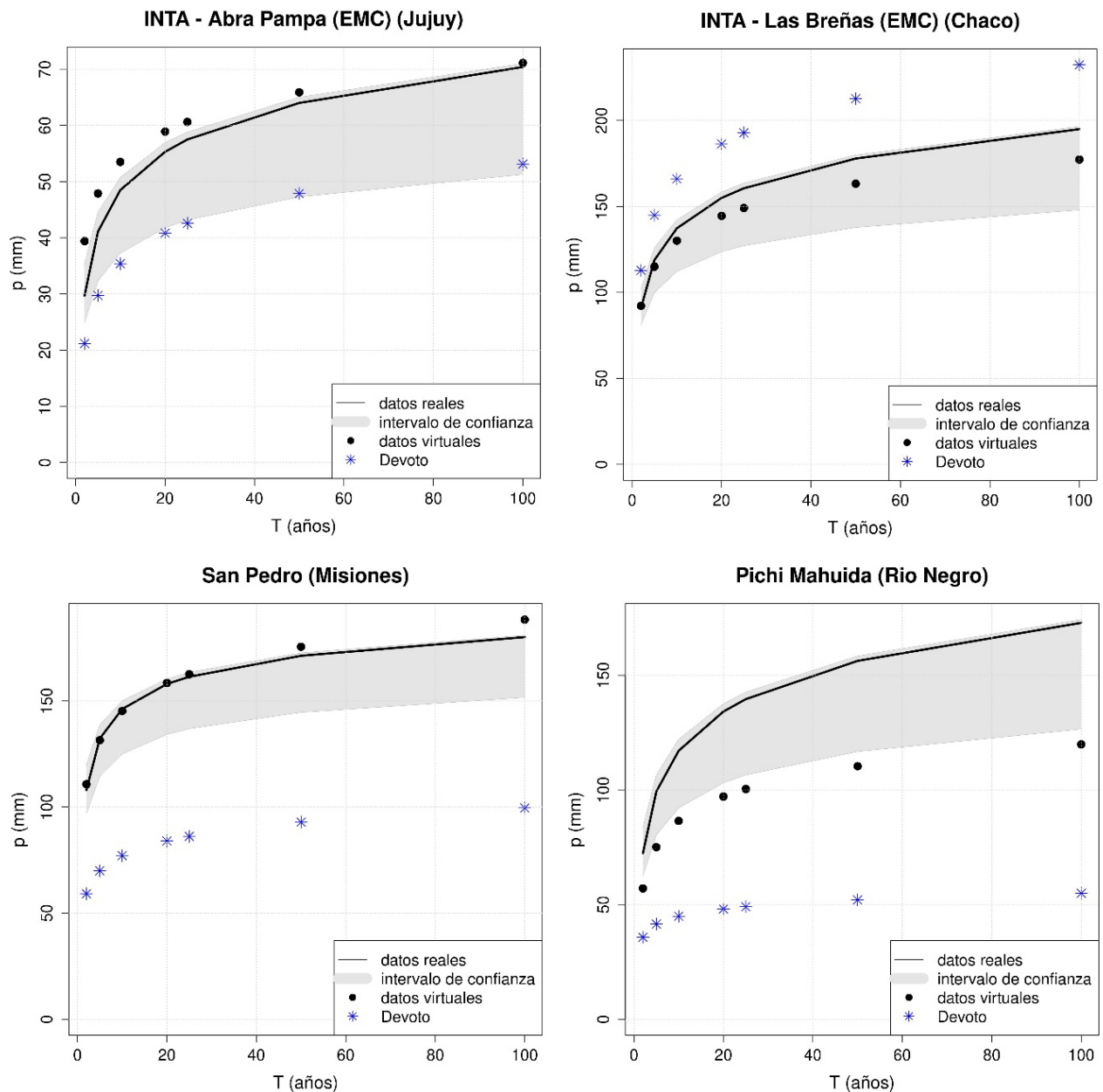


Figura 17. Precipitaciones de diseño de validación estimadas a partir de los datos pluviométricos (datos reales), junto a su intervalo de confianza del 90 %, y de los datos de precipitaciones derivados de satélites (datos virtuales). Estaciones Abra Pampa (Jujuy), Las Breñas (Chaco), San Pedro (Misiones) y Pichi Mahuida (Río Negro).

En la Figura 18 se presentan, como ejemplo, unos gráficos de correlación entre las precipitaciones de diseño obtenidas a partir de los datos reales y los virtuales en las 30 estaciones de validación, para los periodos de retorno de 10 y 25 años, junto con las barras de error asociadas con el intervalo de confianza del 90 %; también se superponen los valores estimados por el método de Devoto (también representados sobre el eje horizontal) en relación con los valores reales.

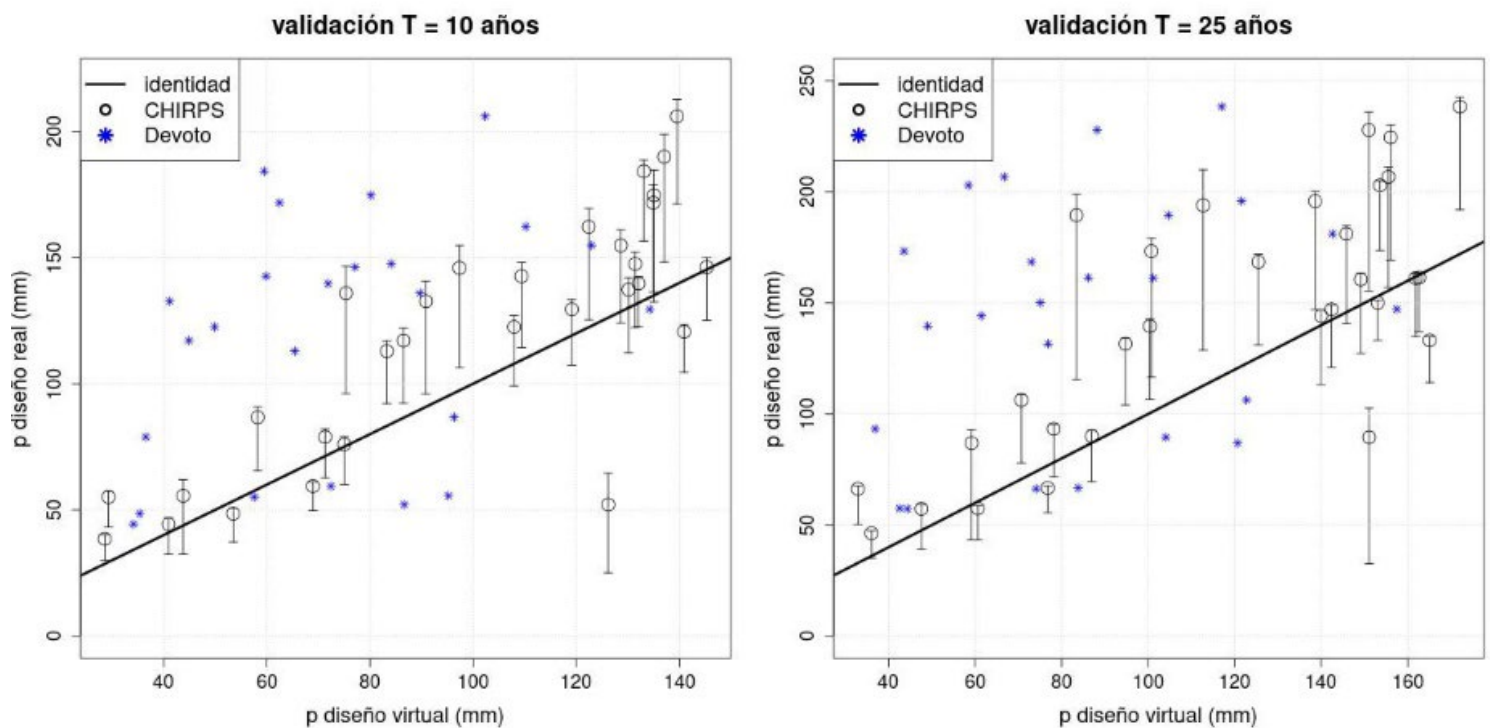


Figura 18. Precipitaciones de diseño virtuales *versus* reales (con su intervalo de confianza) en las 30 estaciones de validación para los periodos de retorno de 10 años (izquierda) y 25 años (derecha). Se incluyen las estimaciones por el método de Devoto.

En la Figura 19 (izquierda) se presenta un gráfico de correlación entre las precipitaciones de diseño obtenidas a partir de los datos reales y los virtuales en las 30 estaciones de validación para todos los periodos de retorno considerados, junto con las barras de error asociadas con el intervalo de confianza del 90 %; mientras que a la derecha se observa el error relativo porcentual entre ambas estimaciones, tanto las obtenidas a partir del producto CHIRPS como las obtenidas a partir del método de Devoto.

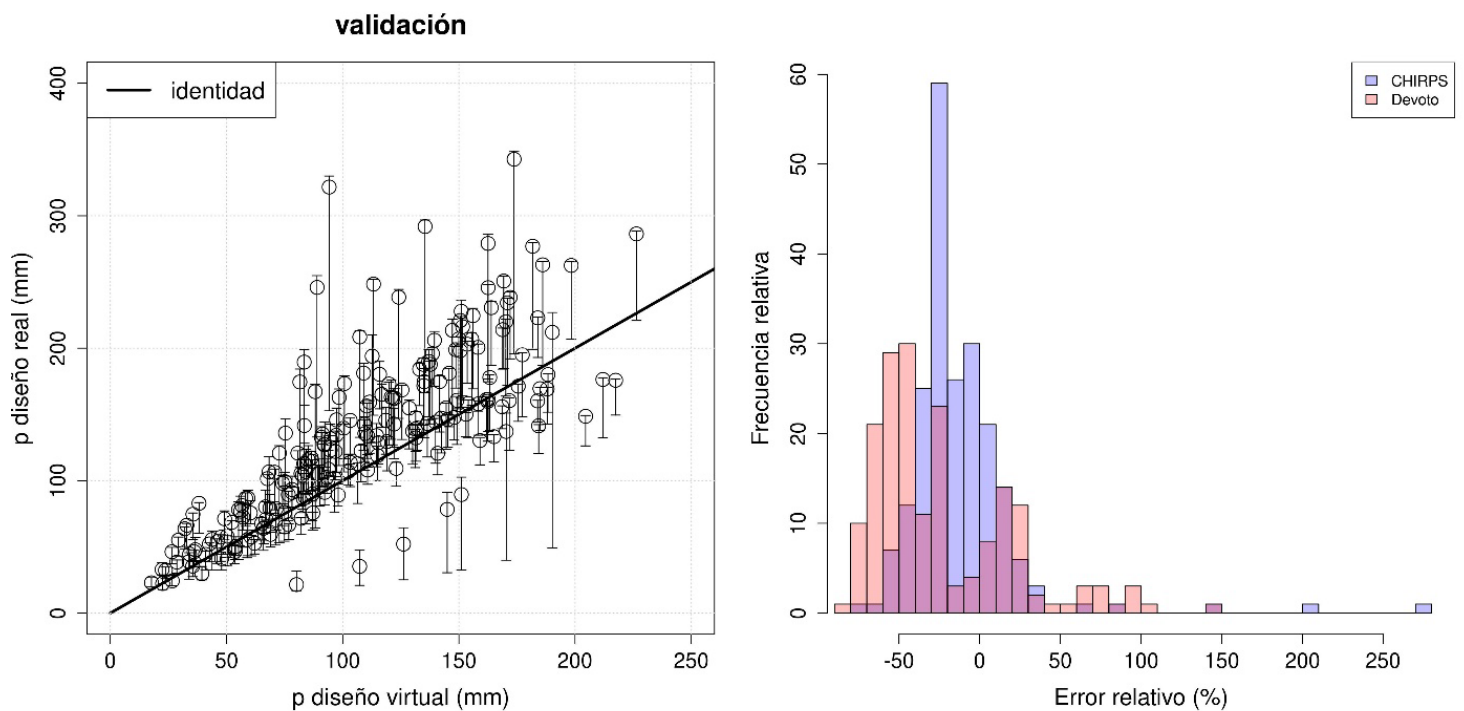


Figura 19. A la izquierda: precipitaciones de diseño virtuales *versus* reales (con su intervalo de confianza) en las 30 estaciones de validación. A la derecha: histograma de frecuencias relativas de los errores relativos porcentuales entre las precipitaciones de diseño virtuales y reales.

Discusión

Las estimaciones de las precipitaciones diarias de diseño, basadas en el producto CHIRPS, presentan errores relativos menores a los dados por el método de Devoto, en correspondencia con las 30 estaciones de validación consideradas. Esto puede observarse globalmente en los histogramas de errores de la Figura 19 (derecha), y en particular y a modo de ejemplo para dos periodos de retorno en la Figura 18. Más específicamente, de las 30 estaciones de validación consideradas, el método de Devoto presenta un menor error en la descripción de las precipitaciones de diseño en función del periodo de retorno en cuatro estaciones; en dos de ellas presenta resultados similares a los obtenidos con CHIRPS; mientras que en las 24 estaciones restantes, la función $p(T)$ es mejor aproximada a partir de los datos satelitales (Figura 17).

Los mapas de precipitaciones de diseño, función del periodo de retorno considerado (Figura 10, Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15 y Figura 16), muestran una gran variabilidad espacial, mayor a la obtenible mediante la aplicación del método de Devoto. En la Figura 20 se presenta la distribución espacial de la relación R para el periodo de retorno de 25 años: definiendo R como la relación entre las precipitaciones de diseño obtenidas a partir de CHIRPS y las correspondientes dadas por el método de Devoto. Cabe destacar que solo se presenta el sector norte del país debido a que el método de Devoto arroja valores inconsistentes de las precipitaciones de diseño para el sector central y occidental de la Patagonia: es probable que esto radique

en que para la confección de los mapas del método, este autor no contó con estaciones en esa región, por lo que se asume que las isolíneas publicadas surgen por extrapolación (Figura 1). Cabe destacar que la distribución espacial reportada en la Figura 20 es similar para otras recurrencias. En esta Figura, valores de R menores a 1 (tonos fríos) representan zonas donde el método de Devoto sobreestima las estimaciones satelitales, mientras que valores de R mayores a 1 (tonos cálidos) corresponden a zonas donde las estimaciones satelitales superan a los valores dados por el método de Devoto y, por tanto, las lluvias (y otros resultados derivados del modelado hidrológico, como por ejemplo los caudales) dadas por este método podrían estar subdimensionadas.

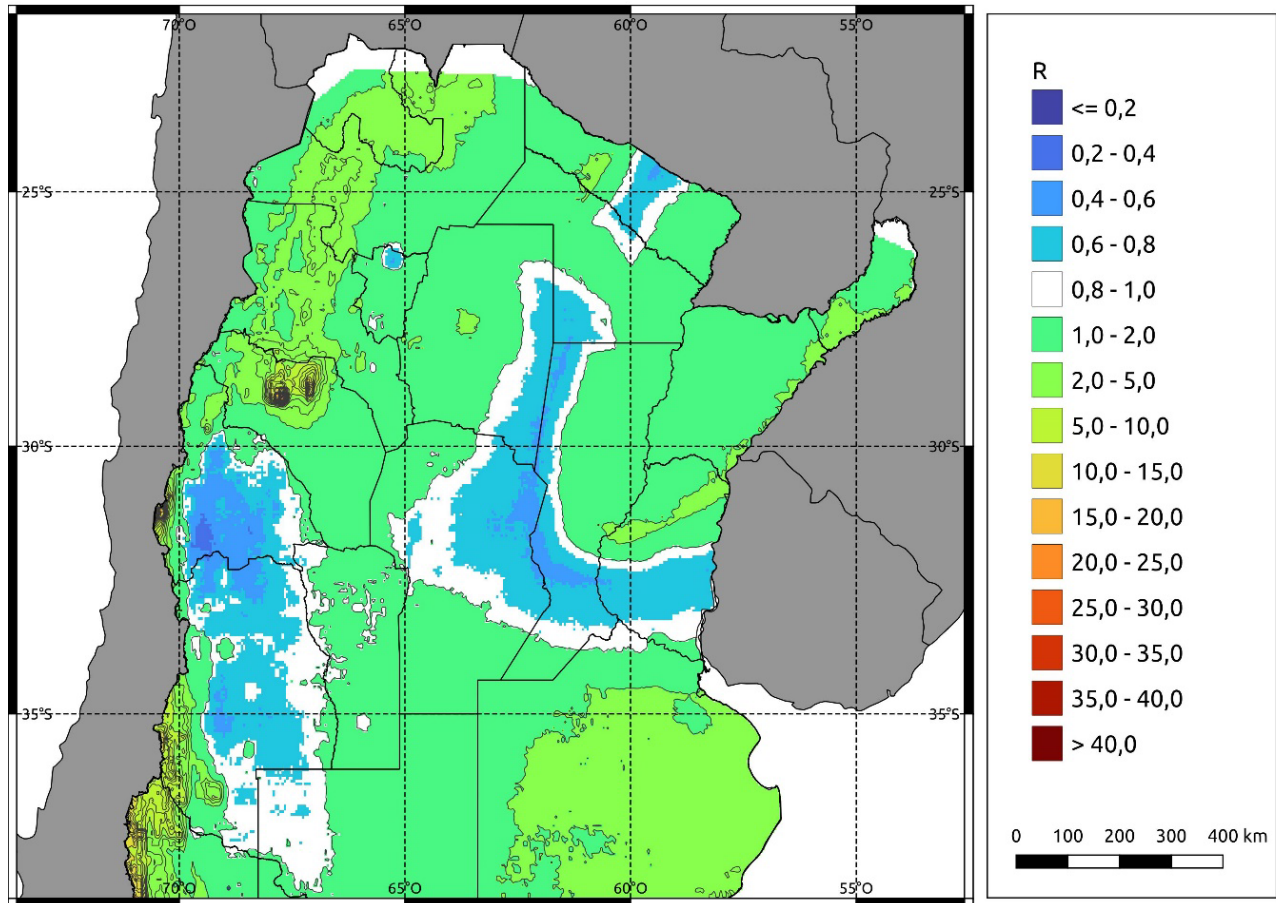


Figura 20. Distribución espacial de la relación R entre las precipitaciones diarias de diseño ($T = 25$ años) estimadas con base en los datos de precipitación derivados de satélite y de acuerdo con el método de Devoto.

La distribución espacial de las precipitaciones diarias de diseño reportadas en la Figura 10, Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15 y Figura 16 presenta un patrón que acompaña la variabilidad climática del país. En efecto, se observan sistemáticamente para todos los periodos de retorno considerados núcleos de altos valores sobre la región cordillerana de la Patagonia, las que, dado el régimen pluviométrico

indicado en la Figura 5 (temporada húmeda invernal) son principalmente de carácter nívico. Asimismo, se presentan en la región norte, central y litoral del país valores relativamente altos, si bien de menor magnitud que los patagónico-cordilleranos antes mencionados. Ambos sectores están separados por una amplia región con bajos valores de las precipitaciones de diseño, en correspondencia con la diagonal semiárida que divide climáticamente al territorio. Si bien el método de Devoto acompaña en términos generales esta variabilidad espacial inducida por la orografía y el clima, no logra captar las condiciones locales con el detalle que lo hacen las estimaciones dadas por CHIRPS. En la Figura 21 (izquierda) se presentan, a título de ejemplo, cuatro transectas que atraviesan regiones con amplia variabilidad climática y orográfica del país. Para cada una de estas transectas se muestra la distribución altimétrica (perfil topográfico) junto con la distribución, a título de ejemplo, de las precipitaciones diarias de diseño estimadas con CHIRPS y por el método de Devoto para 25 años de recurrencia. Puede observarse que las estimaciones satelitales presentan una correspondencia con la topografía (en fase o en contrafase, de acuerdo con las condiciones climáticas locales) que el método de Devoto no logra identificar en detalle. Estos patrones se replican para otras transectas y otras recurrencias.

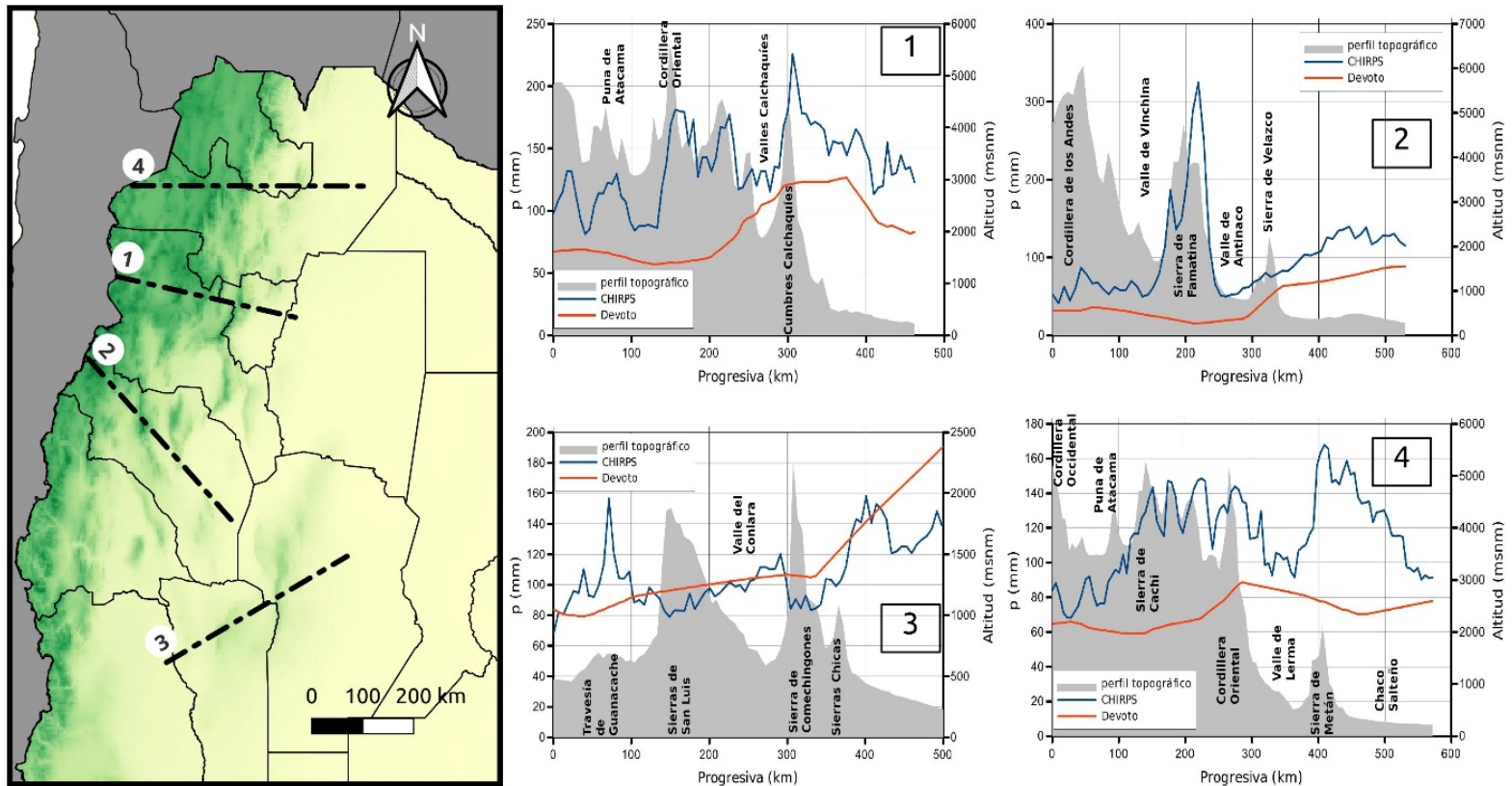


Figura 21. Distribución espacial de las precipitaciones diarias de diseño ($T = 25$ años) estimadas con base en los datos de precipitación derivados de satélite y de acuerdo con el método de Devoto, junto con el perfil topográfico para cuatro transectas. En las figuras de la derecha se incluyen los topónimos para su identificación geográfica.

Conclusiones

Fue posible desarrollar una metodología de estimación de precipitaciones diarias de diseño para la República Argentina con base en el uso del conjunto de datos de precipitación derivados de satélites CHIRPS. Para

ello, se desarrollaron herramientas computacionales que permitieron la adquisición y el análisis automático de datos de precipitación derivados de satélites en general y del producto CHIRPS en particular.

Fue posible caracterizar estadísticamente las series de precipitaciones diarias máximas anuales (pdMa) obtenidas a partir de los datos de precipitación derivados de satélites mediante el procesamiento (a través de códigos especialmente desarrollados) de la información ráster adquirida.

La comparación directa entre los datos de precipitación derivados de satélite (DPDS) y las precipitaciones registradas en un conjunto de 64 estaciones pluviométricas del Servicio Meteorológico Nacional, día con día, muestran una muy baja o nula correlación. Esto desalienta su uso para el modelado hidrológico de eventos históricos, en particular para cuencas de pequeñas y mediana superficie. Incluso la comparación de las precipitaciones diarias máximas anuales virtuales (DPDS) y reales (pluviométricas) tampoco evidencia una buena correlación (Figura 7 y Figura 8, izquierda); por lo tanto, estas series virtuales de pdMa tampoco serían de utilidad para el análisis de series de tiempo (autocorrelación temporal, por ejemplo). Sin embargo, el necesario ordenamiento de estas series (requisito para la asignación de probabilidades empíricas de no excedencia, según su posición de ploteo) mejora significativamente esta correlación (Figura 7 y Figura 8, derecha) y, en consecuencia, habilita su uso para la estimación de precipitaciones de diseño.

Ha sido posible generar, a partir de los datos de precipitación derivados de satélite del producto CHIRPS, mapas de precipitaciones diarias de diseño para periodos de retorno comprendidos entre 2 y 100 años para la mayor parte del territorio continental argentino. Los mapas

generados, con una resolución espacial de 5 km, permiten describir la distribución espacial de esta variable en amplias regiones del país donde no se dispone de series pluviométricas de extensión y calidad suficientes para implementar un análisis de hidrología estadística clásico. Se considera que los resultados obtenidos superan en calidad a los reportados por el método propuesto por Devoto (2002), también de alcance nacional. Asimismo, se considera que estos mapas describen de forma más adecuada la variabilidad espacial de las precipitaciones de diseño considerando los efectos orográficos y climáticos en la amplia extensión territorial de Argentina, en relación con el método de Devoto precedente (Figura 21).

Estos resultados podrán ser de utilidad para diversas aplicaciones de diseño hidrológico, en particular en las regiones donde exista la escasez de información antes mencionada.

El procedimiento descrito podrá ser actualizado en el futuro, con cierta frecuencia, en la medida que los DPDS amplíen su cobertura temporal; ello permitirá reducir los intervalos de confianza asociados y aumentar las recurrencias de las precipitaciones de diseño a obtener.

Se considera que los datos de precipitación derivados de satélites, mediante una corrección de los errores sistemáticos basados en datos de estaciones de campo, resultan útiles para la generación de campos de lluvias diarias de diseño en Argentina. Se considera que, además, el procedimiento descrito puede ser de utilidad para otras regiones en las que exista escasez de información pluviométrica.

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional por el financiamiento recibido a través del proyecto UTN 4779, y al Servicio Meteorológico Nacional por los datos pluviométricos utilizados.

Referencias

- AghaKouchak, A., Behrangi, A., Sorooshian, S., Hsu, K., & Amitai, E. (2011). Evaluation of satellite-retrieved extreme precipitation rates across the central United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116 (D2). DOI: 10.1029/2010JD014741
- Ashouri, H., Hsu, K.-L., Sorooshian, S., Braithwaite, D. K., Knapp, K. R., Cecil, L. D., & Prat, O. P. (2015). PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multi-satellite observations for hydrological and climate studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(1), 69-83. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00068.1>
- Bortagaray, N. (2018). *Desarrollo e implementación de algoritmos para QGIS en análisis de series de tiempo* (tesis de licenciatura). Facultad de Matemática, Astronomía y Física, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina. Recuperado de <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/6546>
- Brito-Hoyos, D. M. (2015). *Precipitación histórica mediante serie temporal de datos TRMM*. Programa de Bienes Públicos Regionales, Programa Regional de Empleo de Información Satelital para la Producción Agrícola BPR-CONAE. Recuperado de http://200.16.81.92/data/pdf/Precipitacion_Historica.pdf

- Brizuela, A. B., Nosetto, M. D., Aguirre, C. A., & Bressán, M. P. (2015). Comparación de datos de precipitación estimada por TRMM con mediciones en estaciones meteorológicas de Entre Ríos, Argentina. *UD y la Geomática*, 10, 18-26. Recuperado de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/UDGeo/article/view/7919>
- Brovelli, M. A., Cannata, M., & Longoni, U. M. (2004). LIDAR data filtering and DTM interpolation within GRASS. *Transactions in GIS*, 8(2), 155-174. DOI: 10.1111/j.1467-9671.2004.00173.x
- Caamaño-Nelli, G., & Dasso, C. M. (2003). *Lluvias de diseño*. Córdoba, Argentina: Universitas.
- Canavos, G. C. (2003). *Probabilidad y estadística. Teoría y aplicaciones*. México, DF, México: McGraw-Hill Interamericana.
- Castillo, E. (2012). *Extreme value theory in engineering*. San Diego, USA: Elsevier Science Publishing.
- Catalini, C. G., García-Rodríguez, C. M., Caamaño-Nelli, G. E., & Ordoñez, S. (mayo, 2014). *Regionalización paramétrica y valores límites estimados en la región central argentina*. IV Taller de Regionalización de Precipitaciones Máximas, Tucumán.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw Hill.
- Devoto, G. (2002). *Regionalización de lluvias intensas en Argentina*. XIX Congreso Nacional del Agua, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.

- Fernández, P. C., Fornero, L. A., & Rodríguez, S. (1999). *Sistemas hidrometeorológicos en tiempo real – lluvias, tormentas y alerta hidrológica de Mendoza*. Mendoza, Argentina: Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 150066. DOI: <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gavilán, S., Pastore, J. I., Uranga, J., Ferral, A., Lighezzolo, A., & Aceñolaza, P. (2019). Metodología operativa para la obtención de datos históricos de precipitación a partir de la misión satelital Tropical Rainfall Measuring Mission. *Revista De La Facultad De Agronomía*, 118(1), 111-121. <https://doi.org/10.24215/16699513e011>
- GDAL/OGR contributors. (2021). GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library. Open Source Geospatial Foundation [Software]. Recuperado de <https://gdal.org>
- Gebremichael, M., & Hossain, F. (2010). *Satellite rainfall applications for surface hydrology*. New York, USA: Springer.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

- Guillén, N. F., Botelli, M. C., García, C. M., & Catalini, C. G. (abril, 2015). *Estimación de láminas de lluvias máximas diarias y parámetros estadísticos en el centro y norte de Argentina*. Segundo Taller sobre Estudios Hidrológicos en Regiones Áridas y Semiáridas de la República Argentina – EHRAS 2015, Córdoba.
- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M., Brett, M., Haldane, A., Fernández-del-Río, J., Wiebe, M., Peterson, P., Gérard-Marchant, P., Sheppard, P., Reddy, T., Weckesser, W., Abbasi, H., Gohlke, C., & Oliphant, T. (2020) Array programming with NumPy. *Nature* 585, 357-362. Recuperado de <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., & Stocker, E. F. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), 38-55. DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM560.1>
- Hurtado-Montoya, A. F., & Mesa-Sánchez, Ó. J. (2014). Reanalysis of monthly precipitation fields in Colombian territory. *Dyna*, 81(186), 251-258. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n186.40419>
- Joyce, R. J., Janowiak, J. E., Arkin, P. A., & Xie, P. (2004). CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 5, 487-503. DOI: [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2)

- Linsley, R. E., & Franzini, J. B. (1972). *Ingeniería de los recursos hidráulicos* (4a imp. en español; en inglés: 1964). México, DF, México: Editorial Continental.
- Miao, C., Ashouri, H., Hsu, K. L., Sorooshian, S., & Duan, Q. (2015). Evaluation of the PERSIANN-CDR daily rainfall estimates in capturing the behavior of extreme precipitation events over China. *Journal of Hydrometeorology*, 16(3), 1387-1396. DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0174.1>
- Naghattini, M., & Andrade-Pinto, É. J. (2007). *Hidrologia estatística. Belo Horizonte: CPRM.* Recuperado de <http://dspace.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/454>
- Neteler, M., & Mitasova, H. (2013). *Open source GIS: A GRASS GIS approach* (vol. 689). New York, USA: Springer Science & Business Media.
- Oosterbaan, R. J. (2019). Software for generalized and composite probability distributions. *International Journal of Mathematical and Computational Methods*, 4, 1-9. Recuperado de [https://www.iaras.org/iaras/filedownloads/ijmcm/2019/001-0001\(2019\).pdf](https://www.iaras.org/iaras/filedownloads/ijmcm/2019/001-0001(2019).pdf)
- QGIS Development Team. (2020). *QGIS geographic information system. Open source geospatial foundation project* (software). Recuperado de <https://www.qgis.org/>

- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y., Chuang, H., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M. P., van den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., & Becker, E. (2014). The NCEP Climate Forecast System. Version 2. *Journal of Climate*, 27(6), 2185-2208. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>
- Sepulcri, M. G., Di-Bella, C. M., & Moschini, R. C. (2009). Validación de la ocurrencia de lluvia estimada a partir del algoritmo 3B42 de TRMM con datos pluviométricos en la región pampeana. En: *X Congreso Argentino de Meteorología-CONGREMET X*. Buenos Aires, Argentina. Recuperado de <https://inta.gob.ar/documentos/validacion-de-la-ocurrencia-de-lluvia-estimada-a-partir-del-algoritmo-3b42-detrmm-con-datos-pluviometricos>
- Su, F., Hong, Y., & Lettenmaier, D. P. (2008). Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin. *Journal of Hydrometeorology*, 9(4), 622-640. DOI: <https://doi.org/10.1175/2007JHM944.1>
- Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., & Hsu, K.-L. (2018). A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons. *Reviews of Geophysics*, 56, 79-107. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/2017RG000574>

- Vidal, L., Salio, P., & Pappalardo, L. (2011). *Uso combinado de datos TRMM/PR y disdrómetro para corrección de reflectividad de radares meteorológicos en Argentina*. Primer Encuentro de Jóvenes Investigadores en Recursos Hídricos - IFRH 2012. Ezeiza, Buenos Aires, Argentina, Instituto Nacional del Agua. Recuperado de https://www.ina.gob.ar/pdf/ifrrhh/03_036_Vidal.pdf
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., Carey, C. J., Polat, I., Feng, Y., Moore, E. W., VanderPlas, J., Laxalde, D., Perktold, J., Cimrman, R., Henriksen, I., Quintero, E. A., Harris, C. R., Archibald, A. M., Ribeiro, A. H., Pedregosa, F., van Mulbregt, P., & SciPy 1.0 Contributors (2020). SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261-272. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Weber, J. F., González-Castillo, R., & Peña-Pollastri, H. (2017). *Información pluviométrica y pluviográfica en la provincia de La Rioja*. XXVI Congreso Nacional del Agua, Conagua 2017, del 20 al 23 de septiembre de 2017, Córdoba, Argentina.
- Weber, J. F., & Guillén, N. (2018). *Láminas diarias de diseño en la provincia de La Rioja*. VI Taller sobre Eventos Hidrometeorológicos Extremos. Mendoza, Argentina.
- Zamanillo, E., Larenze, G., Tito, M. J., Pérez, M. & Garat, M. E. (2008). *Tormentas de diseño para la provincia de Entre Ríos*. Buenos Aires, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.