

Tendencia actual y futura de la precipitación en el sur de la Región Pampeana (Argentina)

Current and future trends of precipitation in the south of Pampas (Argentina)

Federico Ferrelli*, Andrea Soledad Brendel**, María Cintia Piccolo*** y Gerardo Miguel Eduardo Perillo****

Recibido: 03/06/2019. Aprobado: 22/04/2020. Publicado (en línea): 20/07/2020.

Resumen: El estudio actual y futuro de la precipitación es fundamental para diseñar políticas orientadas a planificar el espacio y adquiere mayor importancia en las regiones semiáridas. El sur de la Región Pampeana es un área agrícola donde los cultivos de secano ocupan la mayor extensión. Por lo tanto, el conocimiento de sus regímenes pluviométricos anuales y estacionales junto con sus cambios espacio-temporales es de vital importancia para garantizar su sustentabilidad económica y ambiental. En este contexto, el objetivo de este estudio fue analizar la variabilidad pluviométrica en el pasado reciente, el presente, el futuro cercano y el lejano en distintos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero. Para ello, se trabajó con datos *in situ* y el modelo climático CCSM4. Se analizó el período 1960-2010 para evaluar si ambas fuentes de datos son estadísticamente iguales. Se compararon el patrón anual, estacional y espacial de las series de precipitación correspondientes a los períodos 1977-1997, 1998-2018, 2019-2039 y 2079-2099. Los resultados demostraron que en el norte del área de estudio se incrementan los montos anuales de precipitación hasta en 200 mm anuales en el futuro lejano, mientras que en el sur se observó una disminución de ≈ 50 mm, pero con un

aumento de la frecuencia de los años lluviosos. El análisis de las isohietas evidenció la misma tendencia, destacándose el otoño como la única estación del año en la que se observó un incremento de las precipitaciones en el sur de la zona estudiada. Los resultados servirán de base para que los actores sociales con poder de decisión tanto públicos como privados dispongan de una herramienta útil para generar un ordenamiento sustentable del territorio.

Palabras clave: regímenes pluviométricos, datos *in situ* vs datos modelados; modelo CCSM4; región semiárida.

Abstract: Current and future studies on precipitation are essential for designing space-planning policies, being particularly relevant in semi-arid regions. The south of the Pampas region is an agricultural area where rainfed crops occupy the largest area. This area, located in a transition zone between temperate and semi-arid climates, is characterized by the occurrence of the most severe and lasting extreme events of the whole region. Therefore, knowledge of their current and future seasonal and annual rainfall regimes,

* Instituto Argentino de Oceanografía (IADO), Universidad Nacional del Sur (UNS)-CONICET, Bahía Blanca-Argentina. B8000BFW, Bahía Blanca, Argentina. Florida 8000 (Camino La Carrindanga km 7,5), Complejo CCT CONICET Bahía Blanca, Edificio E1, República Argentina. <https://orcid.org/0000-0002-5623-8929>. Email: fferrelli@criba.edu.ar. Autor de correspondencia.

** Instituto Argentino de Oceanografía (IADO), Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, República Argentina. <https://orcid.org/0000-0002-5184-9149>

*** Instituto Argentino de Oceanografía (IADO), Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, República Argentina. <https://orcid.org/0000-0002-0909-4694>

**** Instituto Argentino de Oceanografía (IADO), Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, República Argentina. <https://orcid.org/0000-0002-1200-5138>

along with their spatial-temporal changes, is essential to ensure the economic and environmental sustainability of this area. In this context, this study analyzed rainfall variability in six periods defined as recent past (1977-1997), present (1998-2018), near future (2019-2039), and distant future (2079-2099). The latter two were identified considering two greenhouse gas (GHG) concentration scenarios. We worked with on-site data from six weather stations and those from the Community Climate System Model version 4 (CCSM4) climate model.

In a first instance, the period 1960-2010 was analyzed to evaluate whether both data sources were statistically equivalent. To this end, mean values and standard deviations were calculated, followed by Fisher and Kolmogorov-Smirnov tests. After demonstrating that the datasets were statistically homogeneous, the annual, seasonal, and spatial patterns of each weather station were compared for the periods previously defined. We analyzed the mean values, homogeneity, trends, and spatial behavior. The trend was evaluated using the Mann-Kendall test, and the time series were analyzed with an empirical probability study. In addition, the spatial-temporal variation was explored applying the Kriging interpolation method.

The study area showed significant changes between the periods considered. These included changes in mean values. For example, the north showed four periods with different precipitation levels, while only three were observed in the south. In all cases, we found a highly significant statistical significance (Fisher's statistic < 0.001), considering an α of 5 %.

For its part, the analysis of trends showed an increase of annual precipitation in the distant future in the north. At

Coronel Suárez (north), for example, annual precipitation figures were 864 and 1093 mm for the present and the distant future, respectively. However, the south of the study area showed a ≈ 50 mm decrease, but with an increase in the frequency of rainy years. This was evident, for example, in the Hilario Ascasobi station, showing a decreasing trend with annual precipitation figures ranging from 520 mm in the past to 442 mm in the distant future (GHG concentration of 4.5).

The region showed a marked seasonality in future precipitation estimates. The highest amounts occur during summer and spring, being intermediate in autumn and lowest in winter. This same pattern was observed across most of the study area, except for Hilario Ascasobi (located to the south), where summer was the season with the lowest precipitation levels in the past and present. However, the seasonal pattern in the near and distant future was similar to the pattern in the rest of the study area. Autumn was the only season when precipitation increased in the south of the study area (≈ 30 mm).

The importance of assessing past, present, and future changes in precipitation lies in their direct relationship with productive activities in the study area. The inter-annual and seasonal variability of precipitation given the different growth stages of rainfed crops, while exposing the population to flood and drought risks, thus affecting their access to the resource. Therefore, these results will set the grounds for public and private decision-making social stakeholders to have a useful tool for sustainable land-use management.

Key words: Rainfall regimes, *in-situ* versus modeled data; CCSM4 model; semi-arid region; rainfed crops.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la precipitación constituye uno de los elementos esenciales del clima dado que regula y determina el normal desarrollo las actividades agropecuarias y su posterior rendimiento (Mesike y Agbonaye, 2016). Su análisis espacio-temporal es fundamental para orientar políticas de ordenamiento del territorio referidas principalmente al diseño de obras de infraestructura y a la protección del medio ambiente (Aliaga *et al.*, 2016). Las variaciones de los regímenes pluviométricos afectan directamente a la capacidad de infiltración, la disponibilidad de nutrientes y carbono, al suministro de servicios ecosistémicos, entre otros (Yan *et al.*, 2014). Las investigaciones que se han desarrollado a escala global indican que la magnitud y la frecuencia de las precipitaciones extremas se incrementarán en el futuro, aún en aquellas regiones en donde la precipitación no ha presentado cambios signifi-

cativos (IPCC, 2013). Además, es un parámetro altamente variable tanto en los montos anuales, como estacionales y se prevé que en el futuro sean aún más extremas (Bekele *et al.*, 2017).

En las regiones semiáridas, el estudio de la variabilidad pluviométrica es esencial para asegurar el emplazamiento de actividades agropecuarias sustentables (Brendel *et al.*, 2017). En la literatura, se encuentran numerosos estudios que demuestran que, en estas áreas, bajo condiciones futuras de aumento de gases de efecto invernadero, las precipitaciones se incrementarán debido a la mayor disponibilidad de vapor de agua en la atmósfera, resultante del aumento de la temperatura (Muller y Gorman, 2011). Sin embargo, existen escasos estudios realizados en regiones semiáridas que analicen las tendencias de las precipitaciones anuales y estacionales bajo distintos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero. En la actualidad, estos espacios se encuentran bajo

estrés hídrico y son altamente vulnerables debido a los cambios ambientales a los que están expuestos (Salman *et al.*, 2017).

En Argentina, las regiones semiáridas ocupan el 75 % de su superficie continental. Las variaciones de la precipitación, tanto anual, como estacional condiciona el desarrollo de los cultivos, debido a que los mismos se realizan principalmente bajo condiciones de secano (Ferrelli *et al.*, 2019). Particularmente, el sur de la Región Pampeana es un área semiárida que se caracteriza por la ocurrencia de los eventos extremos más severos de toda la región (Figura 1). Se localiza en un área de transición entre los climas templados y los áridos (Aliaga *et al.*, 2017), exponiéndola a una gran variabilidad estacional e inter-anual de las precipitaciones. Por lo expuesto anteriormente, el objetivo de este estudio fue analizar la variabilidad pluviométrica anual y estacional en distintos períodos y escenarios. Se definieron cuatro períodos de estudio: i) pasado reciente, ii) presente, iii) futuro cercano y iv) futuro lejano y en cada uno de ellos se realizó un análisis de tendencia de las precipitaciones anuales y estacionales. Teniendo en cuenta que el crecimiento poblacional ejerce presión sobre los recursos naturales, se genera la necesidad de

adquirir conocimiento detallado de la variabilidad pluviométrica actual y futura y sus cambios espacio-temporales. La finalidad es la de generar políticas destinadas al ordenamiento del territorio orientadas a mejorar la calidad de vida de la población y el ambiente.

METODOLOGÍA

La metodología se dividió en cuatro pasos interrelacionados entre sí. Inicialmente, se recolectaron datos de seis estaciones meteorológicas distribuidas en el área de estudio (Figura 1). Las mismas pertenecen al Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (SMN, 2019) y al Instituto Argentino de Tecnología Agropecuaria de Argentina (INTA, 2019). Posteriormente, se realizó un análisis exhaustivo de la calidad y homogeneidad de la información meteorológica. La tercera etapa consistió en la descarga de datos de distintos modelos climáticos y se establecieron los períodos de estudio. Finalmente, se realizaron distintos test estadísticos que permitieron comparar las series de tiempo y evidenciar los cambios significativos entre ellas.

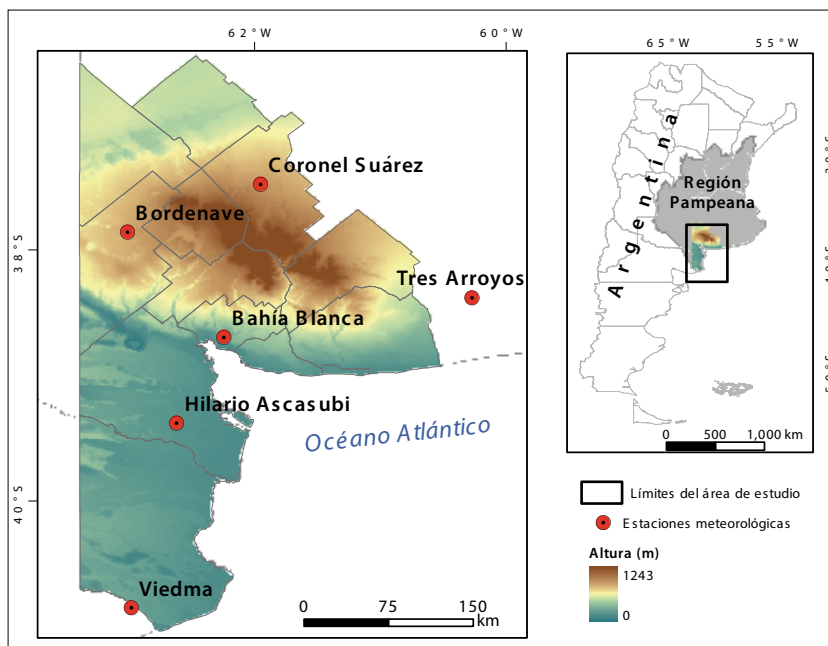


Figura 1. Localización y topografía del área de estudio.

1. Datos *in situ*, análisis de calidad y homogeneidad de la información

Se utilizó información meteorológica de precipitación de seis estaciones localizadas en el área de estudio durante el período 1960-2018 (Figura 1). La frecuencia de la información fue diaria, mensual y anual. En una primera instancia, los datos fueron ordenados en tablas con la finalidad de identificar los datos faltantes, las inconsistencias y los datos erróneos (Zhou *et al.*, 2018). Estos últimos, se eliminaron de las series completas. Posteriormente, los datos fueron sometidos a técnicas de rellenado, utilizando un Análisis de Componentes Principales dado que el mismo permite generar un nuevo set de datos derivado de la combinación de variables, capturando la mayor varianza observada en la serie original (Taylor *et al.*, 2013; Kondrasov *et al.*, 2014; Zhou *et al.*, 2018, entre otros).

Una vez analizadas y completadas las series de tiempo, estas fueron sometidas a test de calidad y homogeneidad de la información. La prueba de control de calidad de los datos se realizó utilizando el Software RclimDex (Zhang y Yang, 2013), mientras que la homogeneidad se probó con el paquete RHTest4, utilizando el Software R (Wang *et al.*, 2010). Con ellos, se calculó además el porcentaje de información perdida y el número de valores atípicos. En las estaciones utilizadas estos fueron inferiores al 5 y al 0,5 %, respectivamente. Finalmente, la información obtenida fue comprobada con pruebas de homogeneización climática. La misma permitió ajustar las observaciones considerando todos los efectos de los factores no-climáticos que podrían haber afectado la calidad de la información (Rumml *et al.*, 2017).

2. Datos modelados

Se utilizaron las series de precipitación diarias del modelo global CCSM4 (Community Climate System Model 4) perteneciente a Centro Nacional de Estudios de la Atmósfera (NCAR, Estados Unidos). La base de datos de este modelo climático se obtuvo de la página del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera de Argentina (CIMA - <http://3cn.cima.fcen.uba.ar>). De un total de 24 modelos validados por el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA) en el marco de los estudios

de base para la tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, este modelo fue seleccionado debido a que los datos son más representativos para la región.

La calidad estadística de los modelos fue testada por esta institución, utilizando un índice de validación. El mismo oscila entre 0 y 1, donde los valores cercanos a cero corresponden a un ajuste bajo y los próximos a 1 indican buen ajuste. En el caso del CCSM4 para el área de estudio, este valor es de 0,91 lo que indica que el modelo representa de manera adecuada la serie observada. La información fue adquirida considerando dos modelos de concentración de gases de efecto invernadero (RCP, por las siglas en inglés de *Representative Concentration Pathways*). Por un lado, el RCP4.5 corresponde a un escenario de mitigación que estabiliza el forzamiento radiativo en 4.5 W/m². Por el otro, el RCP8.5 indica un escenario con emisiones de efecto invernadero muy elevadas con un forzamiento radiativo de 8.5 W/m².

La información fue analizada para dos períodos de tiempo. Uno denominado futuro cercano (2019-2039) y otro considerado como futuro lejano (2079-2099). Ambas series se obtuvieron para los dos escenarios RCP (4.5 y 8.5) y fueron corregidas considerando la corrección Bias. Para ello, se utilizó el período de referencia (1960-2010) proporcionada por el modelo CCSM4 e *in situ*. El propósito de su aplicación fue la de analizar las diferencias entre las series modeladas con las observadas (Baimoung *et al.*, 2014).

3. Definición de períodos de estudio y análisis estadísticos

Luego de calcular la corrección Bias, se subdividieron los períodos de estudios y fueron integrados por la misma cantidad de años. Esto se realizó para aplicar los diversos análisis estadísticos (Test de Fisher, Distribución Empírica de la Probabilidad, Test de Kolmogorov-Smirnov, Análisis de las tendencias, Test de Mann-Kendall). Se consideraron cuatro períodos: i) pasado reciente (1977-1997), ii) presente (1998-2018), iii) futuro cercano (2019-2039) y iv) futuro lejano (2079-2099). Los dos últimos se estudiaron bajo dos escenarios de RCP

(4.5 y 8.5, respectivamente), contabilizando un total de seis series de tiempo diferentes.

Se calculó el coeficiente de determinación y los de correlación y se aplicó el test de Fisher a las seis series temporales. El objetivo fue demostrar el momento en el que el valor medio de la precipitación anual deja de ser el mismo. Por otra parte, se aplicó el test de Kolmogorov-Smirnov para comparar las series de tiempo y comprobar si existen diferencias estadísticas entre ellas. Se consideró una significancia del 5 %. Luego, los períodos que fueron estadísticamente distintos fueron analizados con el estudio de la distribución empírica de la probabilidad (*Empirical probability distribution functions* - PDF), considerando una distribución de Chi-Cuadrado.

Finalmente, se realizó un análisis de la tendencia, aplicando el Test no paramétrico de Mann-Kendall (Mann, 1975; Kendall, 1975). Este test utiliza el estadístico Tau-b de Kendall. Si el mismo es positivo, entonces la serie de datos tiene una tendencia positiva y viceversa. Se consideró que la tendencia fue estadísticamente significativa con un $\alpha < 0.05$. Para cuantificar el aumento o disminución de la precipitación se utilizó el método de Sen (1968). Por último, los datos fueron analizados espacialmente a partir de su representación en un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS 10.1), utilizando el método de interpolación Kriging ordinario con un tamaño de celda de 0.01. El mismo asume que la distancia o la dirección entre los

puntos tiene una correlación espacial que permite explicar la variación dentro de un área (Menafoglio *et al.*, 2013).

RESULTADOS

1. Evaluación de la información meteorológica

La comparación de la información meteorológica obtenida *in situ* con la adquirida del modelo CCSM4 para el período 1960-2010, presentó valores medios de precipitación similares, encontrando diferencias inferiores a 30 mm/año. El coeficiente de determinación R^2 , junto con los de correlación permiten establecer que existe relación entre los datos obtenidos de ambas fuentes (Tabla 1). Por otro lado, el test de Fisher estableció que las series son estadísticamente iguales con una significancia del 5 % y el test de Kolmogorov-Smirnov presentó valores de $p > 0.05$, lo que indica que las series son homogéneas (Tabla 1).

2. Análisis de las series de tiempo

Una vez estudiadas las series de ambas fuentes de información (modelo vs *in situ*) y obtener resultados con buen ajuste, se procedió a analizar si la precipitación media en cada una de las estaciones presentó cambios entre las seis series de tiempo: pasado reciente (1977-1997), presente (1998-2018), futuro cercano (2019-2039) y futuro lejano (2079-2099) bajo los dos escenarios de concentra-

Tabla 1. Precipitación media anual y desvío estándar (*In situ* - CCSM4), coeficiente de determinación (R^2), correlación (P (Pearson), S (Spearman)), resultados del test de Kolmogorov-Smirnov (KS) y del test de Fisher (F) para las estaciones meteorológicas analizadas durante el período 1960-2010.

Estaciones Meteorológicas	Datos In situ	Datos CCSM4	R^2	P	S	K-S	F
Coronel Suarez	790.9 $\pm$ 177	804 $\pm$ 165	0.76	0.87	0.88	p=0.83	p<0.001
Bordenave	717 $\pm$ 186	685 $\pm$ 152	0.73	0.84	0.85	p=0.34	p<0.001
Tres Arroyos	781.9 $\pm$ 144	796.4 $\pm$ 147	0.84	0.91	0.91	p=0.96	p<0.001
Bahía Blanca	648.3 $\pm$ 152	670.1 $\pm$ 132	0.71	0.85	0.77	p=0.28	p<0.001
Hilario Ascasubi	485 $\pm$ 105	491 $\pm$ 105	0.75	0.82	0.79	p=0.89	p<0.001
Viedma	364.8 $\pm$ 108	387 $\pm$ 109	0.64	0.79	0.73	p=0.56	p<0.001

Fuente: elaboración propia.

ción de emisiones de gases de efecto invernadero consideradas (RCP 4.5 y 8.5).

Mediante este análisis, se observaron cambios estadísticamente significativos entre los períodos considerados. En sentido norte-sur, la estación de Coronel Suárez presentó cuatro períodos en los que la precipitación manifestó cambios significativos en su valor medio (Tabla 2). En Bordenave, se evidenciaron tres períodos, el primero compuesto por las series pasado reciente y presente, el segundo por el futuro cercano (bajo ambos RCP) y el último por el futuro lejano. Hacia el centro del área de estudio, Tres Arroyos mostró tres períodos distintos. El primero de ellos integrado por pasado reciente y presente, el segundo futuro cercano 4.5, 8.5 y futuro lejano 4.5 y el tercero por el futuro lejano 8.5 (Tabla 2).

En el caso de Bahía Blanca, se distinguieron cuatro períodos, siendo iguales los dos períodos de futuro cercano (bajo ambos escenarios RCP) y

los dos de futuro lejano. Hacia el sur del área de estudio (Hilario Ascasubi) también presentó cuatro períodos distintos. A diferencia de lo descrito anteriormente, se observó que el pasado reciente y el presente mostraron valores medios estadísticamente distintos. El segundo grupo lo componen las dos series de futuro cercano junto con la de futuro lejano RCP 4.5 y el tercero, futuro lejano RCP 8.5. Finalmente, en Viedma, se distinguieron sólo tres períodos: pasado reciente, presente, futuro cercano RCP 4.5 y 8.5 y futuro lejano RCP 4.5 y futuro lejano RCP 8.5 (Tabla 2).

Al analizar las series de tiempo completas mediante la aplicación del test de Kolmogorov-Smirnov, se observaron algunas singularidades. Hacia el norte, la estación de Coronel Suárez presentó diferencias estadísticas entre las series de tiempo correspondientes al pasado reciente y al presente ($p = 0.05$). El futuro cercano 4.5 correspondió a una serie estadísticamente distinta en relación con

Tabla 2. Resultados del análisis de Fisher ($\alpha < 0.05$) para cada una de las estaciones meteorológicas analizadas. Pa: Pasado reciente, Pre: Presente, FC: Futuro Cercano, FL: Futuro Lejano. 4.5 y 8.5 indican los distintos escenarios RCP.

Coronel Suárez					
<i>Pa</i>	<i>Pre</i>	<i>FC - 4.5</i>	<i>FC - 8.5</i>	<i>FL - 4.5</i>	<i>FL - 8.5</i>
A	b	c	c	C	d
Bordenave					
<i>Pa</i>	<i>Pre</i>	<i>FC - 4.5</i>	<i>FC - 8.5</i>	<i>FL - 4.5</i>	<i>FL - 8.5</i>
A	a	b	b	C	c
Tres Arroyos					
<i>Pa</i>	<i>Pre</i>	<i>FC - 4.5</i>	<i>FC - 8.5</i>	<i>FL - 4.5</i>	<i>FL - 8.5</i>
A	a	b	b	B	c
Bahía Blanca					
<i>Pa</i>	<i>Pre</i>	<i>FC - 4.5</i>	<i>FC - 8.5</i>	<i>FL - 4.5</i>	<i>FL - 8.5</i>
A	b	c	c	D	d
Hilario Ascasubi					
<i>Pa</i>	<i>Pre</i>	<i>FC - 4.5</i>	<i>FC - 8.5</i>	<i>FL - 4.5</i>	<i>FL - 8.5</i>
a	b	c	c	C	d
Viedma					
<i>Pa</i>	<i>Pre</i>	<i>FC - 4.5</i>	<i>FC - 8.5</i>	<i>FL - 4.5</i>	<i>FL - 8.5</i>
A	b	b	b	B	c

Fuente: elaboración propia.

estos períodos ($p = 0.043$). Lo mismo ocurrió al estudiar la serie futuro cercano 8.5 ($p = 0.012$). En Bordenave, no se observó una diferencia estadísticamente significativa entre las series pasado reciente y presente ($p = 0.6028$), el resto de los períodos presentaron evidencia de ser distintos.

Hacia el centro del área de estudio, la estación de Tres Arroyos tuvo un comportamiento similar al observado en Bordenave, no hubo evidencia estadística de que las series de pasado reciente y presente fuesen distintas ($p = 0.302$), pero sí entre estas y las correspondientes al futuro cercano y lejano. Bahía Blanca e Hilario Ascasubi manifestaron diferencias entre el pasado reciente y el presente ($p = 0.065$, $p = 0.034$, respectivamente). Finalmente, Viedma tuvo diferencias estadísticas

entre el presente y el futuro cercano ($p = 0.045$) y lejano ($p = 0.05$).

Posteriormente, se analizaron estos períodos con un estudio de la distribución empírica de la probabilidad con el objetivo de analizar las variaciones de las series de tiempo en función de una distribución de Chi Cuadrado. Se graficaron los períodos que presentaron diferencias estadísticas entre sí, con el objetivo de analizar las series temporales de precipitación (Figura 2).

Hacia el norte de la región, los regímenes pluviométricos se incrementaron hacia el futuro. En el caso de Coronel Suárez, se muestra en forma paulatina, pasando de un valor medio de 864 mm anuales en el pasado reciente a 1093 mm en el futuro lejano RCP 8.5. En el caso de Bordenave, se

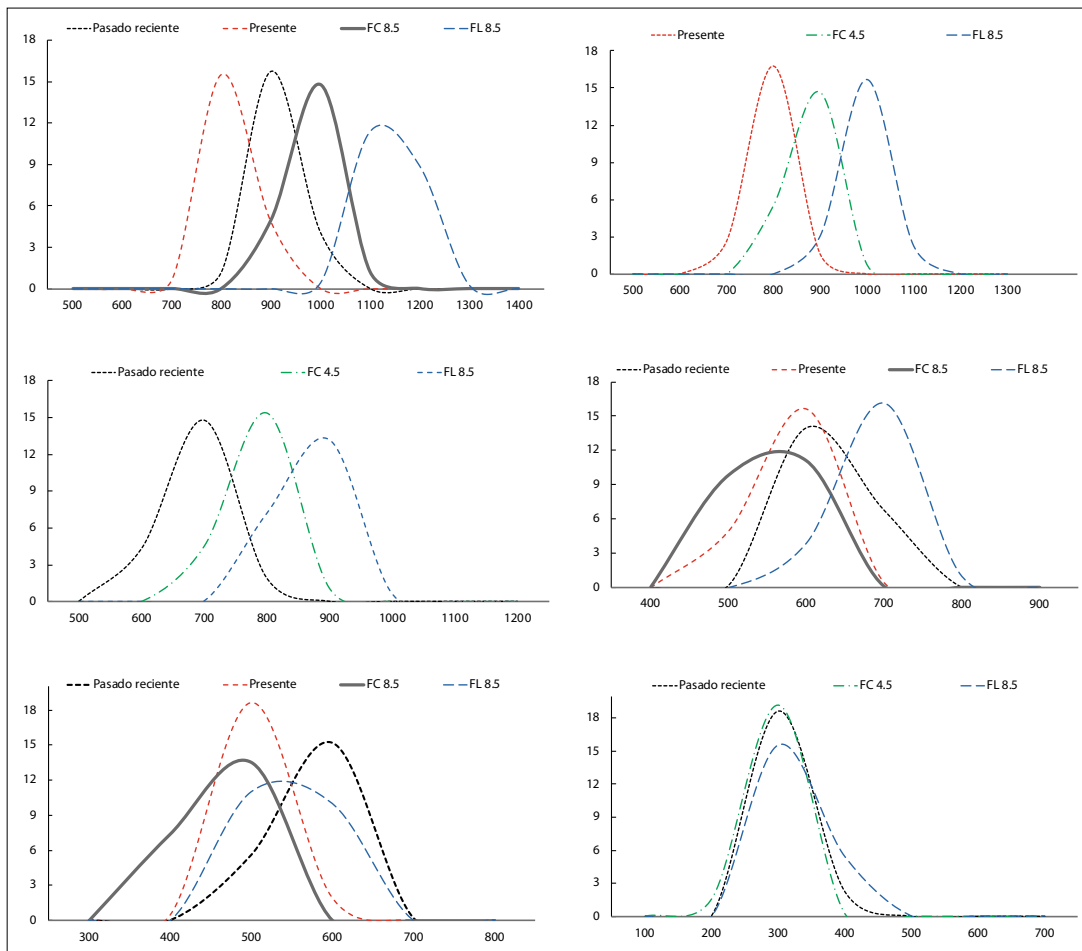


Figura 2. Distribución empírica de la probabilidad en los períodos estadísticamente diferentes. FC. Futuro cercano, FL. Futuro lejano.

observó que la mayor probabilidad de ocurrencia de la precipitación anual en la serie presente fue 744 mm y la misma se incrementó a 976 mm en el futuro lejano RCP 8.5 (Figura 2). Este mismo patrón se presentó en el resto del área de estudio, en donde se evidenció un incremento de los montos anuales de precipitación, exceptuando la zona el sur. En Hilario Ascasubi, si bien la precipitación anual fue estadísticamente distinta en los cuatro períodos, la tendencia mostró disminución. Es decir que, mientras que el pasado y el presente presentaron valores de 520 y 469 mm, respectivamente, los mismos se redujeron hasta 442 mm (Figura 2). Finalmente, Viedma presentó una situación particular dado que no se observaron diferencias en los valores medios, sino que se registró una mayor probabilidad de ocurrencia de los eventos lluviosos (Figura 2).

3. Tendencia de la precipitación durante 1970-2099

El sur de la Región Pampeana presentó variación en los montos anuales e interanuales de precipitación. En este sentido, bajo el escenario RCP 4.5, la precipitación anual manifestó un incremento de 80 y 100 mm/período en el norte de la región (Coronel Suárez y Bordenave, respectivamente). Sin embargo, al considerar el escenario RCP 8.5, el incremento fue más intenso, superando los 1000 mm anuales en el período 2079-2099 (Figura 3).

En Tres Arroyos, localizado en el centro de la región, no se encontró evidencia estadística de que las precipitaciones presenten modificaciones anuales al analizar el período RCP 4.5. Sin embargo, bajo el

escenario RCP 8.5 se observaron aumentos de 100 mm/período ($p < 0.05$). Esta situación se replicó en Bahía Blanca, en donde en condiciones de RCP 4.5 las precipitaciones tuvieron una tendencia decreciente, mientras que en el RCP 8.5, las mismas se incrementaron 80 mm/período (Figura 3).

Finalmente, hacia el sur del área de estudio (Hilario Ascasubi y Viedma) los montos anuales de precipitación no manifestaron cambios significativos bajo ninguno de los escenarios RCP considerados. (Figura 3).

La precipitación a escala estacional muestra que la región está caracterizada por una marcada estacionalidad. Los mayores montos ocurren durante el verano y la primavera, mientras que los intermedios en el otoño y los menores en el invierno. Este patrón se repitió en la mayor parte del área de estudio, exceptuando Hilario Ascasubi, en donde el verano fue la estación menos lluviosa. Sin embargo, en los períodos futuro cercano y futuro lejano, el patrón estacional de ésta se hace similar al del resto del área de estudio (Figura 4).

Estacionalmente, se observaron diferencias significativas entre los distintos períodos. La primavera y el verano son las estaciones con mayor cantidad de precipitación. En Coronel Suárez y Bordenave, se encontró evidencia estadística de que las primaveras tendieron a ser más lluviosas ($p < 0.05$), pasando de valores de 201.2 y 220.6 mm a 357.6 y 370 mm, respectivamente. Esta situación no se presentó en la zona centro (Tres Arroyos y Bahía Blanca), ni en la estación de Viedma. En Hilario Ascasubi, las precipitaciones de la primavera disminuyeron 57 mm aproximadamente

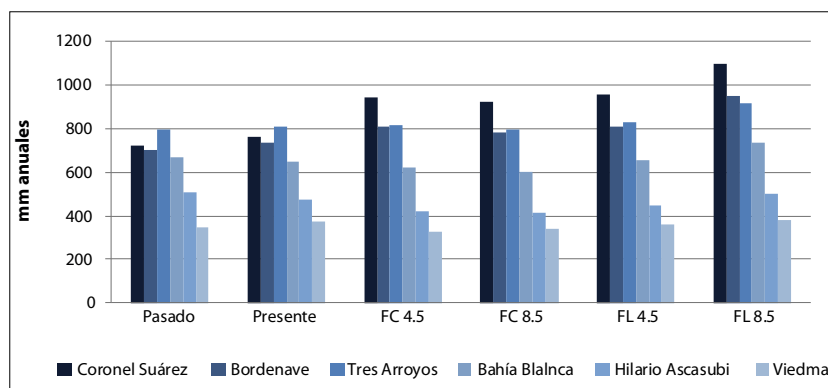


Figura 3. Precipitación media anual en los distintos períodos FC: Futuro cercano, FL: Futuro lejano.

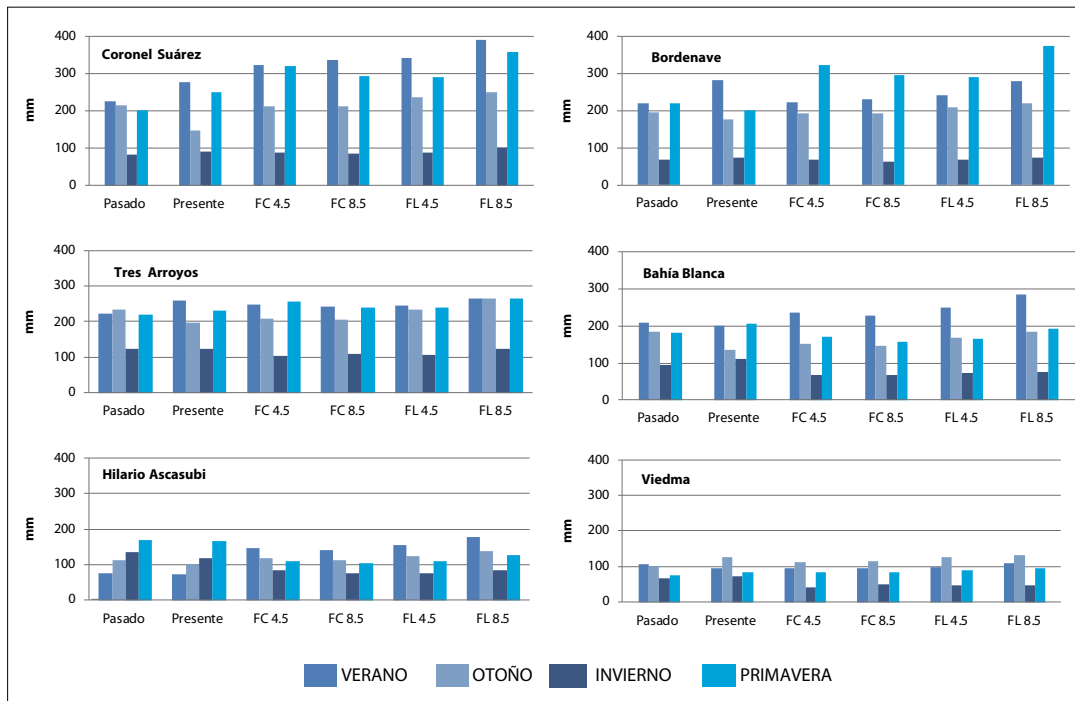


Figura 4. Precipitación media en las diferentes estaciones del año. FC. Futuro cercano, FL. Futuro lejano.

en el futuro cercano y lejano (RCP 8.5) (Figura 4). Por otro lado, el invierno no presentó cambios significativos, sin embargo, manifestó incrementos inferiores a 10 mm en la zona norte, no tuvo cambios en las estaciones del centro y fue menor en el sur (40 mm) (Figura 4). Las precipitaciones estivales se incrementaron 100 mm, siendo estadísticamente significativas en el norte y centro de la región, pero no así en la estación de Viedma, en donde si bien se observó un incremento de 19.5 mm, este no fue estadísticamente significativo (Figura 4).

4. Variación espacial de la precipitación durante 1970-2099

Se observó un desplazamiento hacia el sudoeste de las isohietas de mayor precipitación, registrando un aumento significativo en el norte del área de estudio, en donde en el futuro lejano bajo RCP 8.5, se presentaron isohietas mayores a 1000 mm anuales. Una situación similar se observó en el centro, pasando de 600 a 800 mm en el mismo período. El sur, no evidenció cambios en sus regímenes anuales de precipitación dado que sus

montos anuales estuvieron dentro de los 400 y 500 mm anuales (Figura 5).

El verano mostró cambios espaciales similares a lo reflejado en el monto anual. Sin embargo, se observaron modificaciones en el norte entre el pasado reciente y el presente. Este último período presentó mayor cantidad de precipitación. A partir de entonces, la precipitación continuó aumentando, pero sin manifestar cambios significativos en el centro. Finalmente, el sur mantuvo el mismo régimen pluviométrico durante todos los períodos estudiados (Figura 6).

En el otoño se observó una disminución de la precipitación entre el pasado reciente y el presente. Luego de este período, los valores comenzaron nuevamente a incrementarse, marcando un gradiente que disminuyó de noreste a sudoeste. La particularidad que presentó esta estación fue que en el futuro lejano bajo condiciones RCP 8.5 el sur del área de estudio incrementó su monto estacional de precipitación (Figura 7).

El invierno presentó diferencias espaciales marcadas entre los períodos. En el pasado reciente toda

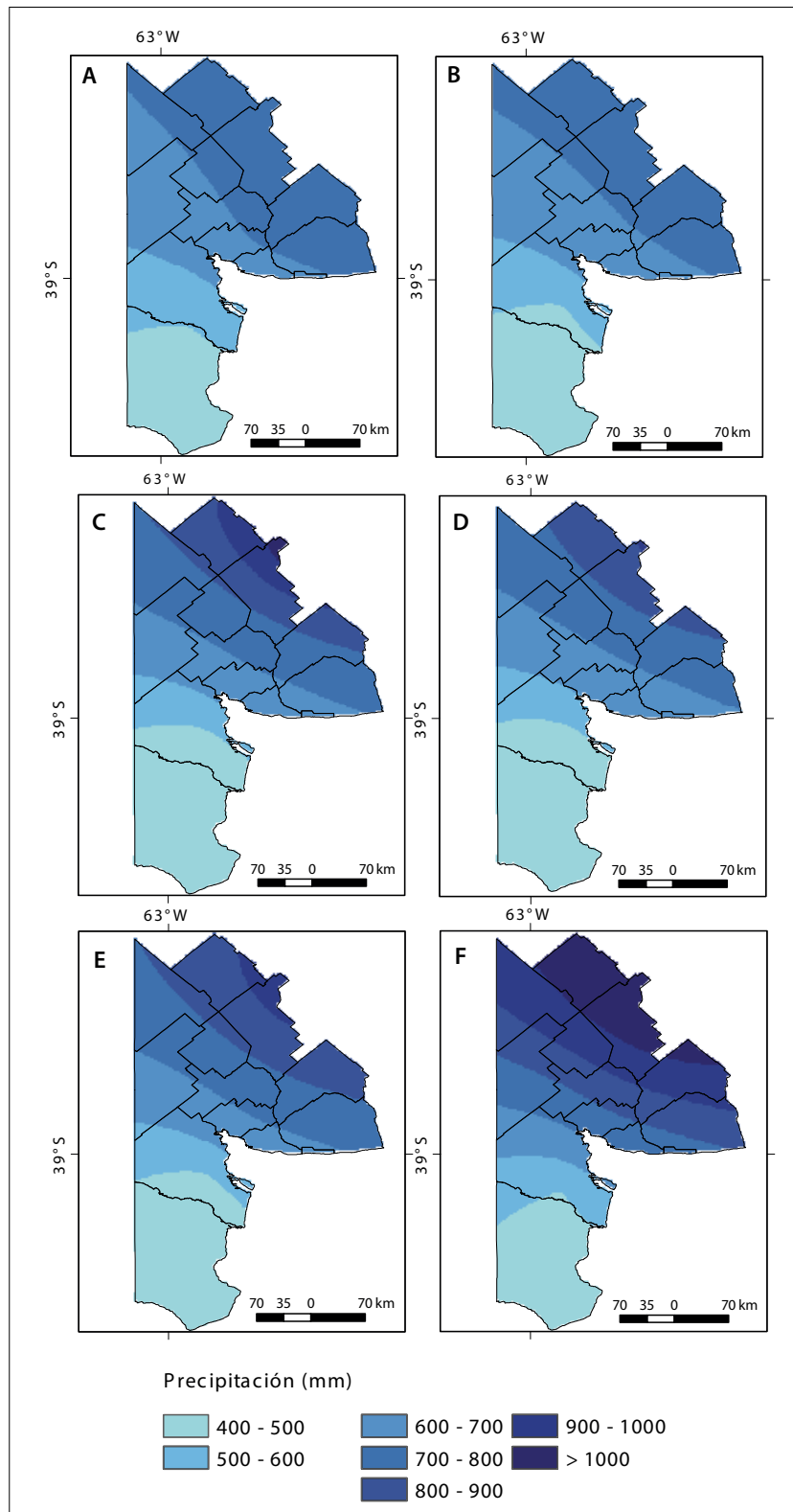


Figura 5. Distribución espacial de la precipitación media anual en el pasado reciente (A), presente (B), futuro cercano (RCP 4.5) (C), futuro cercano (RCP8.5) (D), futuro lejano (RCP 4.5) (E) y futuro lejano (RCP 8.5) (F).

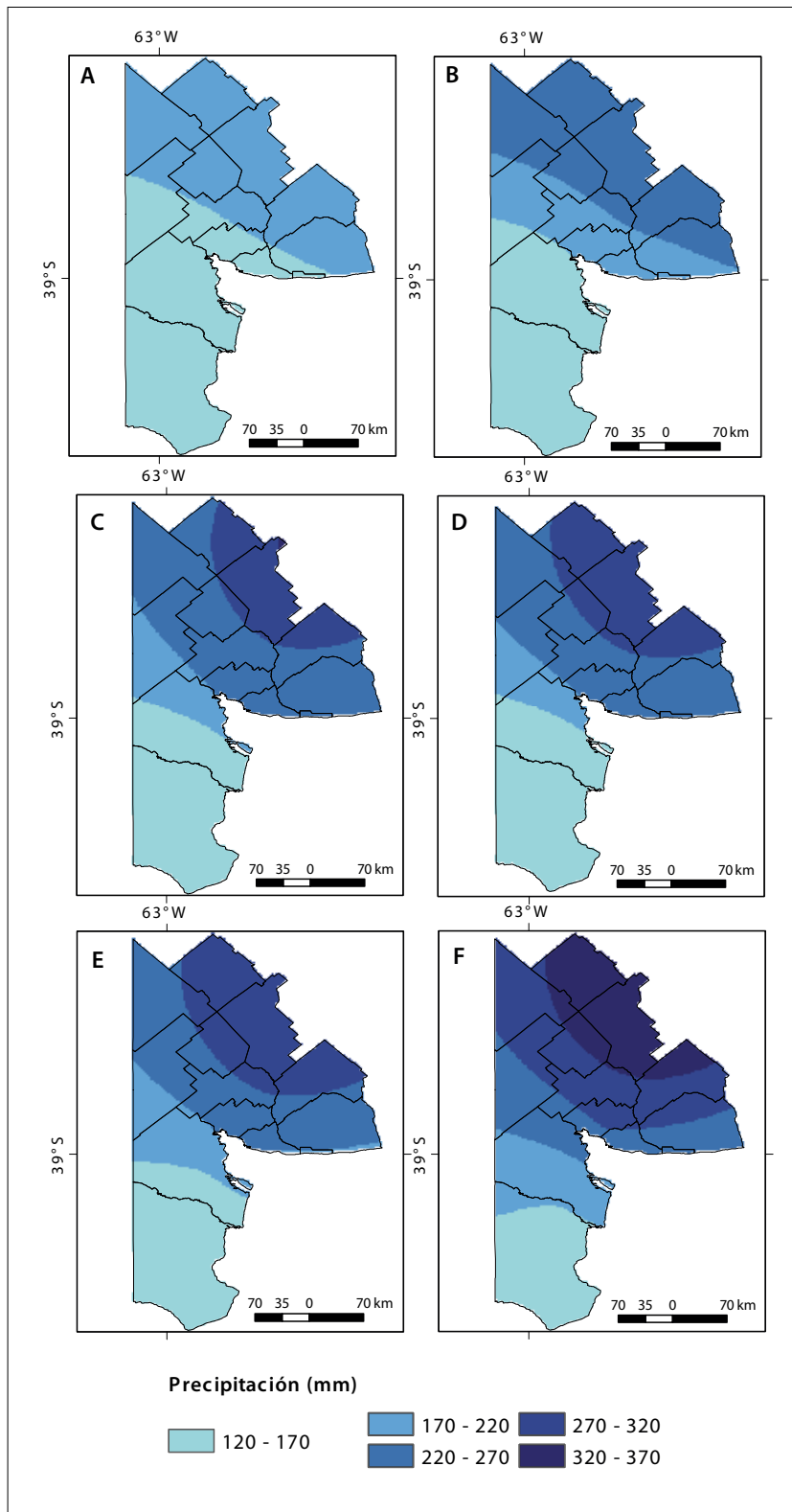


Figura 6. Distribución espacial de la precipitación media estival en el pasado reciente (A), presente (B), futuro cercano (RCP 4.5) (C), futuro cercano (RCP8.5) (D), futuro lejano (RCP 4.5) (E) y futuro lejano (RCP 8.5) (F).

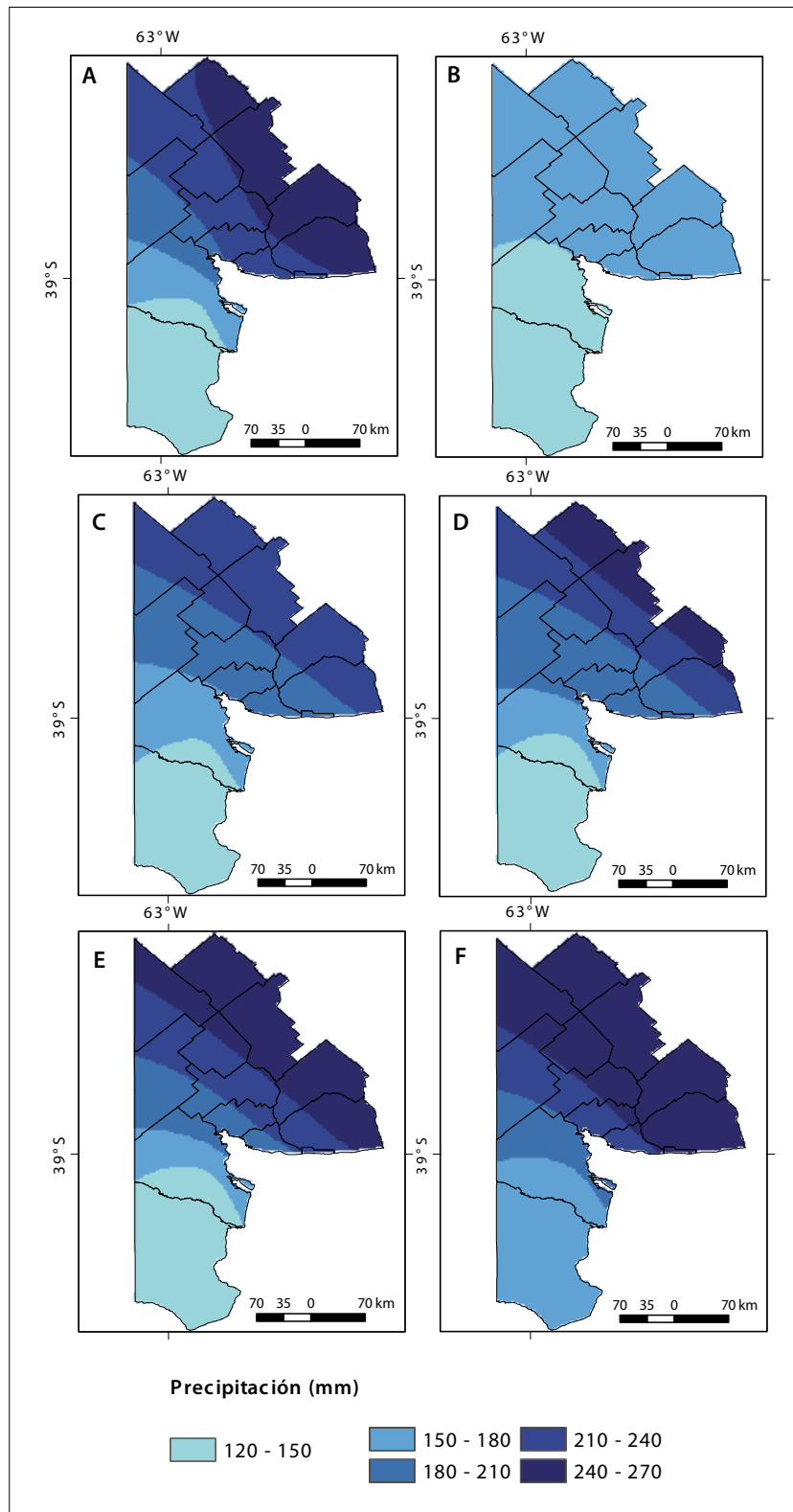


Figura 7. Distribución espacial de la precipitación media del otoño en el pasado reciente (A), presente (B), futuro cercano (RCP 4.5) (C), futuro cercano (RCP8.5) (D), futuro lejano (RCP 4.5) (E) y futuro lejano (RCP 8.5) (F).

el área se localizó entre las isohietas de 50 y 70 mm. El presente fue el período con mayor cantidad de precipitación, distinguiendo una distribución espacial que no coincide con el resto de las estaciones del año analizadas. Los mayores registros se presentaron en el centro del área y disminuyeron hacia el norte y el sur. Posteriormente, el futuro marcó un área lluviosa en el oeste con una disminución hacia el este y sur. Esta situación fue similar en el resto de los períodos analizados (Figura 8).

Finalmente, la precipitación de la primavera presentó un patrón similar a lo observado en el verano. El norte del área de estudio fue siempre la más lluviosa y aumentó su valor estacional hacia el futuro cercano y lejano. En el sur del área de estudio, no se evidenciaron cambios espaciales de la precipitación, permaneciendo dentro de las isohietas de 80 y 140 mm (Figura 9).

DISCUSIÓN

El conocimiento de la variabilidad pluviométrica en las regiones semiáridas es indispensable para garantizar su sustentabilidad económica y alimenticia (Ferrelli *et al.*, 2019). La importancia de estudiar los cambios pasados, actuales y futuros en estas regiones recae en que se vinculan directamente con las actividades productivas que se emplazan en estas áreas (Ayalew *et al.*, 2012). Además, son espacios que presentan un alto estrés hídrico derivado de los cambios ambientales a los que están expuestos (Salman *et al.*, 2017). La variabilidad pluviométrica propia del sur de la Región Pampeana puede influir en las actividades agropecuarias, debido a una mayor exposición a riesgos de inundación o sequía (Alemayehu y Bewket, 2016). Su conocimiento es fundamental dado que podría afectar la producción de forraje y pasturas y perjudicar la actividad ganadera, como así también a la disponibilidad de agua necesaria para la producción agrícola y el consumo humano (Worku *et al.*, 2018), sobre todo en aquellas regiones en donde se realizan cultivos de secano como la estudiada (Brendel *et al.*, 2017).

Los distintos modelos de predicción climáticos son una herramienta esencial para realizar proyecciones y predecir con exactitud las variaciones

futuras (Peacock, 2012). Estos han sido utilizados para predecir y proyectar cambios pluviométricos, térmicos, de coberturas de nieve, entre otros en distintas partes del mundo (Peacock 2012; DeFlorio *et al.*, 2013; Bekele *et al.*, 2017; Ozturk *et al.*, 2017; Ying *et al.*, 2018). El modelo CCSM4 resultó ser una fuente de información precisa dado que reflejó con gran exactitud los resultados medidos *in situ*. Cabe destacar que el mismo presentó valores de R^2 superiores a 0.7, con índices de correlación mayores a 0.8. Además, la aplicación de los test de Fisher y Kolmogorov-Smirnov no presentaron evidencia estadística de que ambas fuentes de información sean distintas. Esto evidencia la exactitud de la información brindada por este modelo para el estudio de la variabilidad pluviométrica de la región.

En el área estudiada se observó que la precipitación tuvo una tendencia positiva en el centro y norte, registrando incrementos de hasta 120 y 200 mm/período, respectivamente. Esto coincide con estudios que demuestran que ante un aumento de los gases de efecto invernadero, las precipitaciones aumentarán (Muller y Gorman, 2011), como así también la frecuencia y magnitud de sus extremos (IPCC, 2013). A pesar de ello, el sur del área de estudio no presentó variaciones significativas en sus montos anuales de precipitación. El mismo, en ciertos períodos disminuyó (hasta 50 mm/período), exponiendo a la región a mayores condiciones de aridez. Actualmente, esta área se caracteriza por presentar una tendencia a la disminución de las precipitaciones y al aumento de la temperatura. Esta situación se hará más intensa en el futuro cercano y lejano, generando condiciones críticas para el desarrollo de la agricultura y la ganadería que podrían perjudicar la calidad de vida de la población y el ambiente (Ferrelli *et al.*, 2019). En este sentido, es importante destacar que las variaciones pluviométricas afectan no sólo a las actividades productivas, sino que además intervienen en las capacidades de infiltración, la disponibilidad de nutrientes y al suministro de los servicios ecosistémicos (Yan *et al.*, 2014). Las precipitaciones tienen una gran variabilidad espacio-temporal que las caracteriza (Bekele *et al.*, 2017). Este aspecto fue evidente en el sur de la Región Pampeana, dado que se observó una gran variabilidad espacio temporal

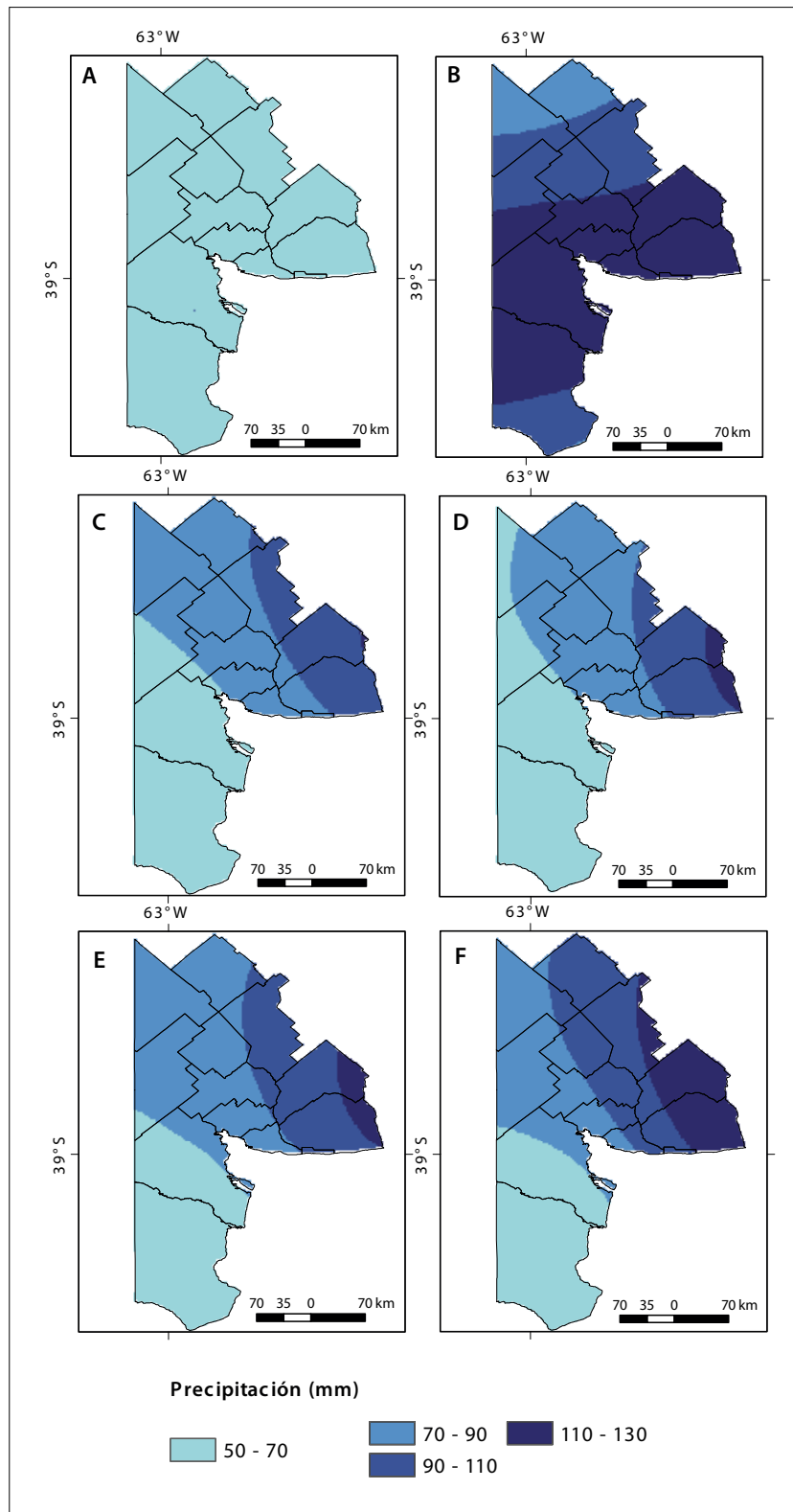


Figura 8. Distribución espacial de la precipitación media del invierno en el pasado reciente (A), presente (B), futuro cercano (RCP 4.5) (C), futuro cercano (RCP8.5) (D), futuro lejano (RCP 4.5) (E) y futuro lejano (RCP 8.5) (F).

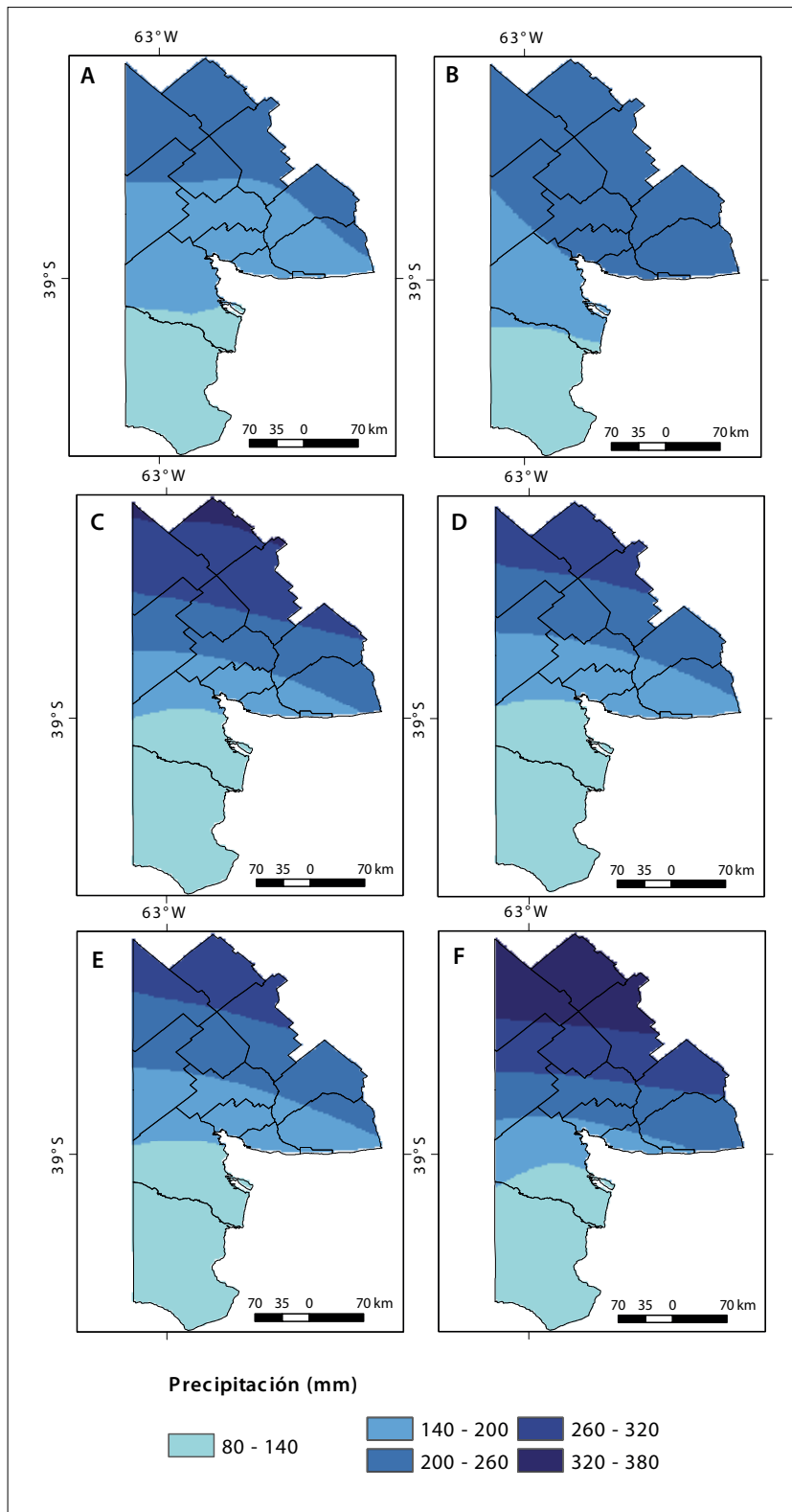


Figura 9. Distribución espacial de la precipitación media de la primavera en el pasado reciente (A), presente (B), futuro cercano (RCP 4.5) (C), futuro cercano (RCP8.5) (D), futuro lejano (RCP 4.5) (E) y futuro lejano (RCP 8.5) (F).

de las mismas, marcando regímenes pluviométricos que tendieron a incrementarse, otros que no presentaron modificaciones significativas y otros que disminuyeron.

Se observaron diferencias significativas principalmente en el Futuro Lejano bajo el escenario de concentración de gases de efecto invernadero 8.5. En general, en la mayor parte del área de estudio, este escenario ocasionó un aumento significativo de las precipitaciones anuales y/o estacionales. Esto se debe a que el aumento de las temperaturas propias de un escenario con un forzamiento radiativo de 8.5 W/m^2 generará una mayor disponibilidad de vapor de agua en la atmósfera (Muller y Gorman, 2011). Además, está demostrado que este incremento de gases ocasionará el aumento de las precipitaciones mundiales (Bekele *et al.*, 2017). Por ello, el conocimiento de la variabilidad pluviométrica presente y futura del sur de la Región Pampeana debe ser tenido en cuenta para lograr un eficaz manejo de los recursos naturales y de las actividades económicas con el objetivo de beneficiar la calidad de vida de la población y preservar el ambiente. La utilización de modelos para proyectar situaciones futuras adquiere valor cuando le permite a los diferentes actores sociales prepararse para afrontar los riesgos que las variaciones propias del clima les plantean (Liu *et al.*, 2019).

CONCLUSIONES

La utilización del modelo CCSM4 resultó ser una herramienta fundamental para el análisis de la variabilidad pluviométrica pasada y futura del sur de la Región Pampeana dado que presentó buenos ajustes con respecto a las mediciones *in situ*. Tras su análisis, se determinó que el sur de la Región Pampeana es un área con gran heterogeneidad espacio-temporal de las precipitaciones y esto se profundizará en el futuro, originando extremos pluviométricos más frecuentes. Teniendo en cuenta las proyecciones del modelo climático utilizado, el norte de la región tenderá a aumentar sus montos anuales de precipitación, mientras que lo contrario ocurrirá en el sur. El centro del área de estudio, se comportará como un área de transición entre estos

regímenes. Además, el análisis de la precipitación, considerando escenarios futuros bajo distintos forzamientos radiativos de concentración de gases de efecto invernadero, es de vital importancia para generar planes de manejo del espacio en aquellas regiones en donde el cultivo de secano es la principal actividad económica.

La variabilidad inter-anual y estacional de las precipitaciones condiciona las distintas etapas de crecimiento de los cultivos, como así también expone a la población a riesgos de inundaciones y sequías, afectando su acceso al recurso. El aumento de la precipitación en el norte, junto con el incremento de las precipitaciones estivales en el centro del área de estudio podría favorecer el rendimiento de los cultivos de verano. Mientras que el sur del área de estudio seguirá siendo el área más árida de toda la Región Pampeana. Por lo tanto, el conocimiento de la variabilidad pluviométrica espacio-temporal es una fuente de información esencial y relevante para los tomadores de decisión con el objetivo de planificar y orientar las actividades económicas con vistas a una sustentabilidad ambiental.

REFERENCIAS

- Alemayehu, A. y Bewket, W. (2016). Local climate variability and crop production in the central highlands of Ethiopia. *Environmental Development*, 19, 36-48.
- Aliaga, V. S., Ferrelli, F., Alberdi-Algaraz, E. D., Bohn, V. Y. y Piccolo, M. C. (2016). Distribution and variability of precipitation in the Pampas, Argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(1), 261-280. DOI: 10.18172/cig.2867.
- Aliaga, V. S., Ferrelli, F. y Piccolo, M. C. (2017). Regionalization of climate over the Argentine Pampas. *International Journal of Climatology*, 37, 1237-1247. DOI: 10.1002/joc.5079.
- Baimoung, S., Oki, T., Archevarahuprok, B., Yuttaphan, A. y Pangpom, M. (2014). Bias correction techniques for meteorological data of A2 scenario climate model output in Chao Phraya River Basin of Thailand. *Hydrological Research Letters*, 8(1), 71-76.
- Bekele, F., Mosisa, N. y Terefe, D. (2017). Analysis of current rainfall variability and trends over Bale-Zone, South Eastern highland of Ethiopia. *Climate Change*, 3(12), 889-902.
- Brendel, A. S., Bohn, V. Y. y Piccolo, M. C. (2017). Variabilidad de la precipitación y su relación con los

- rendimientos agrícolas en una región semiárida de la llanura pampeana (Argentina). *Estudios Geográficos*, LXXVIII, 7-29.
- DeFlorio, M. J., Pierce, D. W., Cayan, D. R. y Miller, A. J. (2013). Western US extreme precipitation events and their relation to ENSO and PDO in CCSM4. *Journal of Climate*, 26 (12), 4231-4243.
- Ferrelli, F., Brendel, A. S., Aliaga, V. S., Piccolo, M. C. y Perillo, G. M. E. (2019). Climate regionalization and trends based on daily temperature and precipitation extremes in the south of the Pampas (Argentina). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 45, DOI: 10.18172/cig.3707
- IPCC. (2013). *Climate change 2013: the physical science basis. In Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge y Nueva York.
- Kendall, M.G. (1975). *Rank correlation methods*. Londres: Griffin.
- Kondrashov, D., Denton, R., Shpirts Y, Y. y Singer, H. J. (2014). Reconstruction of gaps in the past history of solar wind parameters. *Geophysics Research Letters*, 41(8), 2702-2707. DOI: 10.1002/2014GL059741.
- Liu, Y., Donat, M. G., Rust, H. W., Alexander, L. V. y England, M. H. (2019). Decadal predictability of temperature and precipitation means and extremes in a perfect-model experiment. *Climate Dynamics*, 53, 3711-3729. DOI: 10.1007/s00382-019-04734-z
- Mann, H. B. (1945). Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245-259, DOI: 10.2307/1907187.
- Menafoglio, A., Secchi, P. y Dalla, R. M. (2013). A Universal Kriging predictor for spatially dependent functional data of a Hilbert Space. *Electronic Journal of Statistics*, 7, 2209-2240.
- Mesike, C. S., Agbonaye, O. E. (2016). Effects of rainfall on rubber yield in Nigeri. *Climate Change*, 2(7), 141-145.
- Muller, C. J. y O'Gorman, P. A. (2011). An energetic perspective on the regional response of precipitation to climate change. *Nature Climate Change*, 1(5), 266.
- Ozturk, T., Turp, M. T., Türkeş, M. y Kurnaz, M. L. (2017). Projected changes in temperature and precipitation climatology of Central Asia CORDEX Region 8 by using RegCM4. 3.5. *Atmospheric Research*, 183, 296-307.
- Peacock, S. (2012). Projected twenty-first-century changes in temperature, precipitation, and snow cover over North America in CCSM4. *Journal of Climate*, 25(13), 4405-4429.
- Ruml, M., Gregorić, E., Vujadinović, M., Radovanović, S., Matović, G., Vuković, A., Pocuca, V. y Stojičić, D. (2017). Observed changes of temperature extremes in Serbia over the period 1961– 2010. *Atmospheric Research*, 183, 26-41. DOI: 10.1016/j.atmosres.2016.08.01.
- Salman, S. A., Shahid, S., Ismail, T., Chung, E. S. y Al-Abadi, A. M. (2017). Long-term trends in daily temperature extremes in Iraq. *Atmospheric Research*, 198, 97-107.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389. DOI: 10.2307/2285891.
- Taylor, M. H., Losch, M., Wenzel, M. y Schröter, J. (2013). On the sensitivity of eld reconstruction and prediction using empirical orthogonal functions derived from Gappy data. *Journal of Climate*, 26(22), 9194-9205. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00089.1.
- Yan, L., Chen, S., Xia, J., y Luo, Y. (2014). Precipitation regime shift enhanced the rain pulse effect on soil respiration in a semi-arid steppe. *PloS One*, 9(8), e104217.
- Ying, K., Frederiksen, C. S., Zheng, X., Lou, J. y Zhao, T. (2018). Variability and predictability of decadal mean temperature and precipitation over China in the CCSM4 last millennium simulation. *Climate Dynamics*, 51(7-8), 2989-3008.
- Wang, X. L., Chen, H., Wu, Y., Feng, Y. y Pu, Q. (2010). New techniques for the detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(12), 2416-2436. DOI: 10.1175/2010JAMC2376.1.
- Zhang, X. y Yang, F. (2013). RCLimDex (1.1) user manual.
- Zhou, H., Aizen, E. y Aizen, V. (2018). Constructing a long-term monthly climate data set in central Asia. *International Journal of Climatology*, 38, 1463-1475. DOI: 10.1002/joc.5259.