

# CARACTERIZACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LAS SEQUÍAS METEOROLÓGICAS EN SANTA CRUZ EN EL CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Leandro Rodrigo Almonacid<sup>1</sup>, Natalia Pessacg<sup>2</sup>, Boris Diaz<sup>3</sup>, Pablo Peri<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Municipalidad de Río Gallegos, Acuerdo con el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Río Gallegos, 9400, Santa Cruz, Argentina.

<sup>2</sup>Instituto Patagónico para el Estudio de los Ecosistemas Continentales (IPEEC-CCT CONICET-CENPAT), Puerto Madryn, 9120, Chubut, Argentina.

<sup>3</sup>Grupo Forestal, Agrícola y Manejo del Agua (FAMA) (EEA Santa Cruz-INTA), Río Gallegos, 9400, Santa Cruz, Argentina.

<sup>4</sup>UNPA-CONICET, Río Gallegos, 9400, Santa Cruz, Argentina

Autor correspondiente: Leandro Rodrigo Almonacid,  
[almonacid.r.leandro@gmail.com.ar](mailto:almonacid.r.leandro@gmail.com.ar)

Manuscrito recibido el 28 de marzo de 2024, en su versión final el 17 de octubre de 2024

## RESUMEN

Las sequías son un fenómeno de escala regional que afecta la seguridad alimentaria, la provisión de agua y energía, cuya severidad, duración y frecuencia se espera aumenten en un contexto de cambio climático. En el presente trabajo se estudió la tendencia en la precipitación anual y estacional en la provincia de Santa Cruz; la ocurrencia de sequías meteorológicas y las proyecciones climáticas hasta el año 2100. Para el cálculo de las sequías se utilizó el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) en una escala de 6 meses



(SPI6) para un periodo pasado reciente (1961-2020) y dos periodos futuros (2041-2060 y 2081-2100). Se pudo observar que más de un 70% de la superficie de la provincia presentó una tendencia negativa en la precipitación anual para el periodo 1961-2020. Este efecto fue más acentuado al estudiarlo de forma estacional, donde se observó que durante el otoño e invierno se presentaron las tendencias más negativas, ubicadas hacia la región noroeste de la provincia. La frecuencia de eventos totales de sequía (ES) para el pasado reciente se presentaron entre 2,6 a 4,5 eventos/década, no coincidiendo las zonas más afectadas por sequías con las regiones de tendencias negativas en la precipitación. Con respecto al cambio climático, al analizar los escenarios de mayor emisión de gases de efecto invernadero (GEI), (SSP2-4.5 y SSP5-8.5) para el periodo 2081-2100, se pudo observar que una mayor superficie del territorio provincial será afectada por una disminución en la precipitación anual de hasta un 30% para SSP5-8.5. Analizando las sequías proyectadas, se determinó que la región oeste de la provincia presentará una menor cantidad de eventos de sequía, pero de mayor duración y severidad que en el periodo de referencia acentuándose en el escenario SSP5-8.5.

**Palabras clave:** Precipitación, sequías, cambio climático, Santa Cruz.

### ABSTRACT

Droughts are a regional-scale phenomenon that affects food security, the provision of water and energy, whose severity, duration and frequency are expected to increase in a context of climate change. In the present work, the trend in annual and seasonal precipitation in the Santa Cruz province was studied; the occurrence of meteorological droughts and climate projections until the year 2100. To characterize droughts, the Standardized Precipitation Index (SPI) was used on a 6-month scale (SPI6) for a recent past period (1961-2020) and two future periods (2041-2060) and (2081-2100). It was observed that more than 70% of the study area presented a negative trend in annual precipitation for the period 1961-2020. This effect was more accentuated when studied seasonally, where it was observed that

during the fall and winter the most negative trends occurred, located towards the northwest region of the province. The frequency of total drought events (DE) for the recent past ranged from 2,6 to 4,5 events/decade, with the areas most affected by drought not coinciding with the regions with negative trends in precipitation. With respect to climate change, when analyzing the scenarios with the highest greenhouse gas (GHG) emissions (SSP2-4.5 and SSP5-8.5) for the period 2081-2100, it was observed that a greater area of the provincial territory will be affected. by a decrease in annual precipitation of up to 30% for SSP5-8.5. Analyzing the projected droughts, it was determined that the western region of the province will present a lower number of drought events but of greater duration and severity than in the reference period, accentuating in the SSP5-8.5 scenario.

**Key Words:** Precipitation, droughts, climate change, Santa Cruz.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las sequías son un fenómeno de escala regional que afecta la seguridad alimentaria, la provisión de agua y energía más que cualquier otra amenaza natural (Rossato *et al.*, 2017). El entendimiento de la dinámica de las sequías y su modelado ha suscitado la atención de la comunidad científica de diferentes disciplinas como la ecología, la meteorología o la agronomía, para las cuales resulta de gran relevancia el uso, la planificación y el manejo integrado de los recursos hídricos (Mishra y Singh, 2011).

El término “sequía” se refiere a un lapso prolongado de déficit hídrico en el suelo limitando la disponibilidad de agua de un territorio dado, y generando un estrés en las personas, los animales y las plantas (Rossato *et al.*, 2017). Generalmente se identifican tres tipos físicos principales de sequía: meteorológica, agrícola e hidrológica. En un sentido amplio, éstas siguen una secuencia temporal en la cual la profundización de las deficiencias en la precipitación que determinan la sequía meteorológica luego impactan en el contenido de humedad del suelo, ocasionando una sequía agrícola y, finalmente, la disminución del escurrimiento desde el suelo hacia cuerpos de agua como ríos y lagos puede causar luego

una sequía hidrológica retardada (Zargar *et al.*, 2011). El conjunto ocasiona impactos sociales, económicos y ambientales, conocidos en conjunto como “sequía socioeconómica”.

Las sequías pueden caracterizarse a partir de diversos atributos entre los cuales severidad, duración y distribución espacial son las más habitualmente estudiadas (Zargar *et al.*, 2011). Estos atributos resultan de transformaciones diversas de las láminas de lluvia acumuladas en índices de sequía, cuyo fin es la cuantificación de las condiciones hidrológicas medias en un único valor.

El monitoreo de los distintos tipos de sequía se basa en diferentes índices estandarizados sobre una escala regional y temporal, los cuales permiten la comparación de la condición del agua en diferentes ecosistemas. Algunos de los más utilizados para determinar la severidad de una sequía son el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI, Palmer 1965), el índice estandarizado de precipitación (SPI), y el índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración, (SPEI) (Szép *et al.*, 2005, Zargar *et al.*, 2011; WMO, 2016). Actualmente, existen más de 150 índices mencionados en la literatura (Zargar *et al.*, 2011). La Organización Meteorológica Mundial (OMM) recomienda la aplicación del SPI como el principal índice de sequía meteorológica que los países deberían utilizar para monitorear el fenómeno (Hayes, 2011). El SPI tan solo utiliza a la precipitación como variable predictiva, siendo de gran utilidad para el monitoreo tanto de los eventos de sequía como de periodos más húmedos en regiones con escasez de registros hidrometeorológicos (Yuan y Zhou, 2004; Quiring, 2009). Otros autores han utilizado en forma conjunta el SPI y el SPEI (Vicente-Serrano *et al.*, 2010) para la evaluación del fenómeno a distintas escalas y en diferentes regiones geográficas (Li *et al.*, 2019, Fung *et al.*, 2020, Liu *et al.*, 2021) obteniendo también, buenos resultados. Por su lado, el Sistema de Información sobre Sequías para el sur de Sudamérica (<https://sissa.crc-sas.org/>) utiliza, entre las herramientas disponibles para monitorear y predecir la ocurrencia de sequías, anticipar los impactos esperables en sectores económicos y comunidades fomentar la planificación para mitigar sus daños, aumentar la resiliencia y reducir la vulnerabilidad, el SPI, el SPEI, los Deciles de Precipitación y el Porcentaje de Precipitación Normal (Vera *et al.*, 2023).

Para caracterizar la variabilidad en la precipitación, principal forzante de las sequías meteorológicas, y el propio fenómeno de sequías en un determinado territorio, es necesario contar con registros meteorológicos extensos en el tiempo y con una buena densidad espacial de estaciones meteorológicas apropiadamente ubicadas, situación que en la mayor parte de la Patagonia no se cumple (Bianchi *et al.*, 2016, Almonacid *et al.*, 2021; 2022). La escasez de registros continuos en el tiempo y confiables son algunas de las limitantes para el estudio de los fenómenos climáticos en la región. En este contexto, es común la utilización de Bases Reticuladas de Datos Climáticos Globales (BRDCG), las que facilitan el estudio de las principales variables climáticas, como la precipitación y la temperatura, en ausencia o limitación de datos terrenos (Bianchi *et al.*, 2016, Almonacid *et al.*, 2021; 2022). Almonacid *et al.* (2021; 2022) encontraron que la BRDCG CRU (Climatic Research Unit) presentó un buen ajuste en la dinámica espacial y temporal de la precipitación y temperatura en el territorio de Santa Cruz al ser comparada con otras BRDCG disponibles para la región, en especial con datos terrenos.

Las sequías son eventos extremos que impactan fuertemente en la región patagónica y que han aumentado su frecuencia y severidad en las últimas décadas (Spinoni *et al.*, 2019). Algunas consecuencias de los eventos de sequía se relacionan con la disminución de la productividad de las tierras (Daramola y Xu, 2021). Rivera *et al.* (2018), encontró que los eventos de sequía se vienen manifestando también en el caudal de algunos de los ríos más importantes de Patagonia. En el sur de Argentina (provincia de Chubut), se reportó un periodo de sequía durante los años 2021-2022 que afectó a las principales cuencas hídricas con registros de caudales menores a los valores medios históricos (Pessacg *et al.*, 2021).

Por otro lado, es relevante el análisis de las sequías en el futuro considerando el contexto de cambio climático global. Sus impactos sobre la humedad del suelo y la evapotranspiración tendrán importantes implicancias sobre la irrigación, la producción agropecuaria y la biomasa de los pastizales (Chiev, 1995); así como también sobre la producción de caudales y, en consecuencia, en la capacidad de producción de energía hidroeléctrica, entre otros problemas (Rivera y Penalba, 2014). Según el IPCC (2023), diversas regiones del mundo exhibirán un incremento en el déficit anual de agua y un descenso en la humedad estival del

**Artículo en edición**

<https://doi.org/10.24215/1850468Xe035>

suelo debido a un aumento en los eventos de sequía. Diferentes escenarios de cambio climático en Patagonia predicen una disminución de la precipitación anual y un incremento en la temperatura media para toda la región (Nuñez *et al.*, 2009; Garreaud y Falvey, 2009; Camilloni *et al.*, 2023). Giorgi *et al.* (2019) encontraron que a nivel global se prevé un aumento en la precipitación total acumulada para el año 2100 basado en estimaciones de la mayoría de los modelos analizados. Sin embargo, al realizar un análisis a escala regional, encontraron grandes diferencias en la precipitación para Patagonia, donde se espera para el año 2100, en el escenario RCP8.5, una disminución de hasta un 30% de la precipitación estival en la provincia de Santa Cruz y oeste de Chubut.

Para el estudio de los cambios proyectados en el sistema climático existe un esfuerzo colaborativo de investigación internacional que reúne modelaciones con el objetivo de comprender el funcionamiento del sistema climático y proporcionar proyecciones climáticas futuras. Por ejemplo, el Programa de Investigación Climática Mundial (WCRP) auspicia, desde hace más de 20 años, el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP) (Eyring *et al.*, 2016), el cual actualmente está en su sexta versión (CMIP6), formando parte en el asesoramiento nacional e internacional del cambio climático (IPCC, 2023).

Como parte de los más recientes avances en la temática, diversos grupos de investigación han trabajado en proyecciones climáticas futuras utilizando modelos climáticos del CMIP6. Éstos permiten analizar los cambios futuros en las sequías a nivel global (Cook *et al.*, 2020; Zhao y Dai, 2022; Xu *et al.*, 2023) y regional (Zhao *et al.*, 2021; Dong *et al.*, 2022) para diferentes trayectorias socioeconómicas compartidas (SSPs). Cook *et al.* (2020) encontraron diferentes señales en la precipitación estacional, donde, para tres escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (SSP1, SSP2, SSP3), la mayor parte del hemisferio norte recibirá mayor precipitación invernal que en el periodo pre-industrial (1851-1880). Al contrario, se esperan grandes disminuciones en la precipitación en regiones como el sudeste de Australia, Sudáfrica, Amazonas y sur de América (incluyendo la región patagónica), sobre todo en la precipitación de verano y otoño. En forma similar, Zhao *et al.*, (2021) encontraron, para un escenario de mayor emisión de gases (SSP5), zonas con mayor

disminución en la precipitación anual esperada para un futuro lejano (2070-2099) comparada con un periodo reciente (1970-1999) en las regiones de Amazonas, Europa central, Sudáfrica, Norteamérica y la región patagónica en América del sur.

En este marco, los objetivos del presente artículo son (i) estudiar la tendencia en la precipitación anual y estacional en la provincia de Santa Cruz; (ii) evaluar las características de las sequías pasadas; y (iii) analizar las proyecciones climáticas futuras de sequía en la región.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Área de estudio**

El área de estudio cubre la totalidad de la provincia de Santa Cruz (Argentina), ubicada al sur de la Patagonia continental (Figura 1), entre los paralelos 45° y 53° de latitud sur y 65° y 72° de longitud oeste. Se caracteriza por presentar gran variabilidad topográfica, desde una zona costera con elevaciones hasta 200 msnm, una zona central con alturas mayores a los 500 msnm y una franja occidental, asociada a la cordillera de Los Andes, con altitudes entre los 1200 y 3900 msnm. Estas características, sumadas a la influencia del mar, la posición de los Centros Anticiclónicos del Pacífico Sur y del Atlántico Sur, la influencia de los vientos Westerlies y la latitud, determinan los principales patrones en la variabilidad espacio temporal de la precipitación y la temperatura (Paruelo *et al.*, 1998; Bianchi *et al.*, 2016, Almonacid *et al.*, 2021; 2022).

La provincia se encuentra dividida en 11 regiones climáticas (Figura 1), diferenciadas según sus características térmicas y pluviométricas, entre las cuales las más cálidas y secas se encuentran al noreste y las más frías y húmedas al sur y oeste de su distribución (Almonacid *et al.*, 2023).

### **2.2 Datos de precipitación**

Para la caracterización de eventos pasados de sequía, se utilizó la base de datos de precipitación mensual CRU TS (Climatic Research Unit gridded Time Series) v.4.07, para

el periodo 1961-2020. Ésta cuenta con datos globales con una resolución espacial de 0,5° x 0.5°, equivalente a aproximadamente 50 km de lado en la latitud de interés (Harris *et al.*, 2020).

Para el análisis de eventos futuros posibles, se utilizó información procedente de simulaciones del producto CMIP6. El mismo cuenta con 27 modelos de intercomparación creados por distintas instituciones y grupos de investigación alrededor del mundo. A través del CMIP6 se definen un conjunto de simulaciones estandarizadas que cubren una amplia gama de escenarios, incluidas simulaciones históricas, proyecciones futuras y experimentos de sensibilidad (Eyring *et al.*, 2016). Los escenarios que describen los posibles desarrollos futuros de los impulsores antropogénicos del cambio climático (por ejemplo, gases de efecto invernadero, aerosoles, uso de la tierra) son consistentes con los desarrollos socioeconómicos que juegan un papel muy importante en la investigación climática (O'Neill *et al.*, 2016). En este trabajo se consideraron los datos de precipitación mensual de todas las simulaciones históricas desde 1850 a 2014 y las proyecciones para el siglo XXI desde 2015 a 2100 para los 27 modelos disponibles de CMIP6. Las características principales de cada modelo se resumen en la Tabla I.

### 2.3 Tendencia en la precipitación

Para analizar las tendencias en la precipitación mensual se utilizó el test no paramétrico de Mann-Kendall (MK, Ecuación 1), recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para este tipo de análisis (Liu *et al.*, 2016). Este test estadístico (S) de MK es dado como:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

**Artículo en edición**

<https://doi.org/10.24215/1850468Xe035>

Donde  $n$  es la longitud de las series de tiempo  $x_1, \dots, x_n$ , y  $\text{sgn}(\cdot)$  es una función de signo,  $x_j$  y  $x_k$  son valores en los años  $j$  y  $k$ , respectivamente. El valor esperado de  $S$  es cero ( $E[S]=0$ ) para series sin tendencia y la varianza (Ecuación 2) es computada como:

$$\sigma^2(S) = \frac{1}{18} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (2)$$

Donde  $q$  es la cantidad de pares agrupados y  $t_p$  es el número de datos en el  $p$ -ésimo grupo. El test estadístico  $Z$  (Ecuación 3) luego es dado como:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\sigma^2(S)}}, & \text{si } S > 0 \\ 0, & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\sigma^2(S)}}, & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\sigma^2(S)}}, & \text{si } S > 0 \\ 0, & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\sigma^2(S)}}, & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Al ser un test no paramétrico, no es necesaria la asunción de una distribución determinada y no resulta influenciado por la presencia de valores outliers (Yadav *et al.*, 2014). El estadístico  $Z$  es utilizado luego para contrastar la hipótesis nula ( $H_0$ ) que postula la existencia de un ordenamiento temporal aleatorio de los datos; mientras que la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) postula la existencia de una tendencia monótona creciente o decreciente. La tendencia fue evaluada con un nivel de significancia de  $\alpha < 0,1$  y  $\alpha < 0,05$ .

El test MK fue calculado sobre el periodo 1961-2020, para el acumulado anual de precipitación y los acumulados estacionales. Se aplicó un agrupamiento a partir del concepto astronómico de las estaciones, resultando para el verano las lluvias acumuladas de

enero, febrero y marzo; otoño de abril, mayo y junio; invierno, julio, agosto y setiembre; y finalmente, primavera, octubre, noviembre y diciembre (Trenberth, 1983).

#### **2.4 Características de las sequías**

Para analizar las características de las sequías en los diferentes periodos de estudio y con las diferentes fuentes de información se utilizó el método no paramétrico propuesto por Farahmand y AghaKouchak (2015) para evaluar la distribución de los datos de precipitación sin asumir la normalidad, el cual propone la ordenación de los datos de precipitación, asignación de rangos, cálculo de probabilidades y posterior transformación de estas probabilidades a valores de la distribución normal estándar. Esto determina un método más robusto al no depender de una distribución paramétrica frente a diferentes patrones de precipitación (Farahmand y AghaKouchak, 2015).

Como principal índice para evaluar las condiciones de sequía dicho método utiliza el SPI (McKee *et al.*, 1993). Los valores de SPI ayudan a identificar y clasificar la severidad de la sequía en función de la precipitación acumulada en diferentes periodos (Farahmand y AghaKouchak, 2015).

El SPI puede tomar tanto valores positivos como negativos; donde los primeros indican condiciones más húmedas (excedente de precipitación), mientras que valores negativos indican condiciones más secas (déficit de precipitación), (McKee *et al.*, 1993). Este índice puede ser calculado en diferentes escalas temporales (*i*), siendo algunas de las más utilizadas las de 3, 6, 12, 48 meses.

Un evento de sequía, para una escala de tiempo seleccionada *i*, se define como el periodo en el cual el SPI asume valores continuos negativos. El evento comienza cuando el SPI presenta un valor  $<0$  y culmina con un valor positivo. Esto permite calcular su duración (*D*) en término de meses. La intensidad de un evento puede clasificarse en categorías (Tabla II);

cuanto más negativo el SPI más severo. Finalmente, la suma de los valores mensuales de SPI permite cuantificar la severidad (S) de un evento.

El SPI fue calculado en una escala de tiempo de 6 meses (SPI6), siendo una de las más utilizadas para reconocer los eventos de sequías a nivel estacional (Zhang *et al.*, 2023). La frecuencia de eventos totales (FS) de sequía (SPI<-1) y extremos (FEext; SPI≤-2.0) fue calculada en término de eventos/década. También se calculó la duración (D) y severidad media de los eventos (S). La metodología propuesta se basa en lo planteado por Spinoni *et al.*, (2018).

## 2.5 Proyecciones climáticas futuras

Las proyecciones climáticas futuras, en términos de precipitación y sequías, fueron calculadas a partir del ensamble de los 5 modelos climáticos globales integrantes del proyecto CMIP6 que mejor representaron la variabilidad de la precipitación en la provincia de Santa Cruz para un periodo histórico de referencia de 20 años (1995-2014), establecido por Almonacid *et al.* (2021), (sección 2.6).

Su aplicación se basó en la propuesta por Camilloni *et al.* (2024) en el marco de la Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. En ésta, se utiliza, como indicador para seleccionar los modelos más representativos del clima observado, el Índice Único de Validación de Modelos Climáticos (IUVM). El IUVM considera el error en la temperatura y precipitación media y estacional, la correlación del ciclo medio anual de ambas variables y el coeficiente de variación. Sin embargo, el cálculo de IUVM para Patagonia resulta en valores muy similares para la mayor parte de los modelos, por este motivo para los modelos con mayor IUVM encontrados en dicho trabajo se realizó una nueva categorización, seleccionando los 5 modelos con mayor IUVM y mejor desempeño en términos de BIAS % (desvío medio porcentual) para la provincia de Santa Cruz.

Con el ensamble de los modelos se analizó el cambio en la precipitación anual y estacional,

**Artículo en edición**

<https://doi.org/10.24215/1850468Xe035>

como así también los cambios en las características de las sequías para dos periodos futuros, uno cercano (2041-2060) y uno lejano (2081-2100) comparado con el periodo de referencia, y bajo tres escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (SSP1-RCP2.6; SSP2-RCP4.5 y SSP5-RCP8.5). El periodo de referencia considerado, así como los periodos futuros fueron los mismos que los utilizados en Camilloni et al. (2024) para que los resultados sean comparables.

Se evaluó la robustez de estos cambios según la coincidencia o no de la señal de cambio para los modelos seleccionados. Se consideró una señal robusta cuando 4 o 5 modelos coincidieron en la señal de cambio, ya sea negativa o positiva.

El escenario SSP1-2.6 representa el escenario con el valor más bajo de forzamiento radiativo (2,6 W/m<sup>2</sup> para 2100), en el cual se espera un aumento menor a los 2°C de temperatura media atmosférica global para el año 2100. Este escenario combina una baja vulnerabilidad con altos desafíos para la mitigación, además de una señal de bajo forzamiento radiativo (O'Neill *et al.*, 2016). El escenario SSP5-8.5 representa el modelo “Business-as-usual”, el cual implica que las emisiones de GEI continuarán bajo las mismas tasas actuales de incremento, llegando a un forzamiento radiativo de 8,5 W/m<sup>2</sup> para 2100. Finalmente, el escenario SSP2-4.5 representa el centro de las trayectorias, donde las emisiones se estabilizan a la mitad de las generadas en la actualidad para el año 2080, con un forzamiento radiativo para el año 2100 de 4,5 W/m<sup>2</sup> (O'Neill *et al.*, 2016).

## **2.6 Selección de modelos de proyección climática**

Para seleccionar los cinco modelos que mejor representan la precipitación en la provincia de Santa Cruz, se calculó el desvío medio porcentual (BIAS%) para la precipitación media anual de cada modelo climático respecto a la base de datos CRU. Luego, estos valores fueron promediados obteniendo un desvío medio por cada uno de los 27 modelos.

Los desvíos oscilaron entre 243,2 a 813,8 %, siendo el modelo HadGEM3-GC31-LL-f3 el

de mejor desempeño medio (243,2%), (Tabla III). Los tres mejores modelos resultaron ser aquellos de menor resolución espacial (250 km, Tabla I). Las mayores diferencias entre lo simulado por los distintos modelos y lo observado por CRU se dieron en las zonas más secas de la región, hacia el centro-norte del área de estudio, donde los valores llegaron a ser sobrestimados hasta un poco más de 1000%, resultados similares fueron presentados por Almazroui *et al.* (2021), quien encontró que las mayores diferencias entre las simulaciones de CMIP6 y distintas bases de datos observacionales se presentaron en la zona centro de la provincia y hacia el oeste de la misma, cercana a la cordillera de Los Andes.

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1 Precipitación**

##### 3.1.1 Tendencias en la precipitación anual y estacional

Más de un 70% de la superficie de Santa Cruz, desde el centro hacia el norte presentó una tendencia negativa significativa en la precipitación anual para el periodo 1961-2020, con valores medios próximos a -1% por década (Figura 2). La región climática *semiárida moderadamente fría* ubicada en el noroeste presentó, en el conjunto, la tendencia más negativa en la precipitación anual, con -0,31%/década (Tabla IV), representando una disminución promedio decadal de 29 mm.

En términos estacionales, otoño e invierno presentaron las tendencias más negativas, especialmente concentradas en el noroeste influenciando, fuertemente al comportamiento anual en esa región. Entre ambas estaciones, las tendencias del invierno resultaron estadísticamente significativas. Hacia el suroeste las tendencias fueron opuestas (positivas) si bien sin significación estadística, durante invierno y verano, con valores hasta +0,3%/década, representando poco menos de 3 mm decádicos de incremento de las láminas medias anuales acumuladas (Figura 2).

La región climática *semiárida muy fría* registró los mayores valores de tendencia positiva, tanto en verano como en invierno (Figura 2, Tabla IV), sin embargo, representan poco menos de 2 mm de incremento medio decádico en las láminas anuales acumuladas. La primavera, por su parte, fue la única estación en la cual todo el territorio provincial evidenció tendencias negativas, entre -0,1 a -1,0 %/década. Las regiones climáticas del centro y noroeste particularmente, con las tendencias promedio más negativas (Tabla IV). Estos diferentes valores representaron una disminución para la primavera no mayor a los 2 mm/década en las regiones más secas (1-2-3-4), mientras que para las regiones más húmedas (5-6-7) la disminución representó entre 4-6 mm/década.

### 3.1.2 Precipitación anual y estacional para el futuro cercano y lejano

La Figura 3 muestra el cambio porcentual en la precipitación anual proyectado para el futuro cercano (2041-2060) y el futuro lejano (2081-2100) en base al periodo de referencia (1995-2014), bajo los tres escenarios de emisión de GEI (SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5). Fue posible observar que para los tres escenarios de emisión de gases, la región norte-noroeste de la provincia de Santa Cruz presentará una disminución en la precipitación media anual. La disminución será entre 1 y 10% para el escenario SSP1-2.6, entre 1 y 15% para el escenario SSP2-4.5, y hasta un 30% para el escenario SSP5-8.5 hacia el futuro lejano (Figura 3). Esto se manifestó como una señal robusta en todos los escenarios de emisión de GEI.

En el escenario SSP5-8.5, hacia el futuro lejano, es donde se observó que la mayor parte de la provincia presentará una disminución en la precipitación media anual, con la mayor disminución localizada hacia el noroeste y la menor disminución (1-5%) hacia el sur. Al analizarlo por región climática podemos ver que la región “*árido moderadamente frío*” es en donde se localizó la mayor disminución de precipitación (Tabla V, Figura 3). En contraposición, la región climática “*semiárido muy frío*” ubicada al sur de la provincia, es la que presentó el menor valor proyectado de disminución en la precipitación media anual (Tabla V).

La Figura 4 representa el cambio proyectado para la precipitación estacional, considerando el escenario SSP5-8.5 para el futuro cercano y lejano. Tanto para el futuro cercano como para el futuro lejano se espera que en la estación estival ocurra la mayor disminución relativa en la precipitación, con valores entre 5 y 25% menos para el futuro cercano, y hasta un 45% menos para el futuro lejano, con un gradiente de mayor disminución hacia el noroeste de la provincia (Figura 4). El otoño por otro lado, que representa la estación con mayor precipitación en la región, presentó una disminución entre el 1 al 10% en gran parte de la provincia de Santa Cruz para el futuro lejano, siendo dicho cambio robusto en la zona centro-noroeste. En la estación invernal se presentaron dos señales robustas de cambio: (i) una disminución marcada de la precipitación hacia el centro-noreste de la provincia, con reducciones del orden del 25%; y (ii) una zona ubicada hacia el sureste, donde los modelos proyectaron un aumento en la precipitación invernal con valores de hasta +25% para el futuro lejano (Figura 4). Por último, la estación primaveral presentó un cambio positivo y robusto en la precipitación para el futuro cercano, con un aumento en la precipitación de hasta un 15% en la región noreste; mientras que para el futuro lejano se observó una señal de cambio negativo hacia el noroeste de la provincia, con una disminución robusta cercana al 25% de la precipitación estacional comparada al periodo de referencia (Figura 4).

## **3.2 Sequias**

### 3.2.1 Caracterización de las sequías

Para el periodo de tiempo 1961-2020 la frecuencia de eventos totales de sequía (FS) resultaron entre 2,6 a 4,5 ev/década, identificándose tres subregiones con más de 3,5 ev/década, relativamente dispersas, una ubicada al oeste (región 7), otra al este (región 10) y otra al noreste (región 2), (Figura 5). Las frecuencias más bajas se observaron en el centro norte con 2,5 ev/década. Al analizar la FS por regiones climáticas fue posible observar que todas las regiones presentaron entre 3,2 a 3,5 ev/década (Tabla VI).

La frecuencia de eventos extremos de sequía (FSext) para la mayor parte del territorio se presentó entre 1 a 2 ev/década (Figura 5), salvo algunas pequeñas regiones aisladas donde

## Artículo en edición

<https://doi.org/10.24215/1850468Xe035>

este atributo superó los 2 ev/década. La región climática *subhúmeda muy fría* en particular presentó en promedio una mayor cantidad de eventos extremos con 2 ev/década, mientras que la región *árida templado fría*, ubicada al noreste, presentó el menor valor, con 1,4 ev/década (Tabla VI).

La duración media de los eventos de sequía (D) se presentó en un gradiente norte-sur, obteniéndose los mayores registros en el sur, con duraciones medias hasta 3 meses (Figura 5), mientras que al norte, estas duraciones fueron menores.

Finalmente, la severidad media de los eventos de sequía (S), osciló entre -6 a -10 SPI promedio por evento, encontrándose los más severos en las zonas con menor cantidad de eventos por década, correspondiente a la región norte de la provincia (Figura 5). En contraposición, la región noreste, con mayor FS presentó los eventos menos severos.

### 3.2.2 Proyección de las sequías en el futuro cercano y lejano

La Figura 6 muestra la diferencia en la frecuencia de eventos de sequías totales (FS) por década, proyectada para el futuro cercano y lejano con relación al periodo de referencia (1995-2014), bajo tres escenarios de emisión de gases de efecto invernadero. Para el escenario SSP1-2.6 se proyectan cambios menores en la FS, con zonas que no superan los 0,5 ev/década en comparación al periodo de referencia y otras, como la región centro, donde se esperan menos eventos por década ( $<0,5$  ev/década) para ambos periodos futuros analizados.

En el escenario SSP2-4.5 se intensifica una señal de cambio negativo en la FS para el futuro cercano en el oeste y sureste, donde se esperan menor FS en comparación al periodo de referencia, variando esta señal para el norte en el futuro lejano. Si bien se identificó una señal de aumento en la FS en el sur para este mismo escenario en el futuro lejano, esta señal no resultó robusta.

El oeste de Santa Cruz presentará una menor FS en ambos futuros analizados bajo el escenario SSP5-8.5, con una disminución de hasta 1,25 eventos menos por década respecto

al periodo de referencia. En el centro-este, una señal poco robusta marca un aumento en la FS, con valores hasta 1,25 eventos por década más que en el periodo de referencia. Para este último escenario, la mayor parte de las regiones climáticas presentan en promedio una menor FS, salvo en las regiones del centro-noreste, con una señal positiva pero poco robusta (Tabla VII, Figura 6).

Con respecto a los eventos extremos de sequías (FSext), la mayor superficie de la provincia presentara cambios menores en esta variable; esperando en algunos casos más de un evento por década o bien hasta menos de un evento por década en comparación al periodo de referencia (Figura 7) al analizar los dos horizontes temporales futuros y los tres escenarios de GEI. Situación que se confirma durante el análisis de las diferentes regiones climáticas (Tabla VIII).

Con respecto a la duración media de los eventos de sequía (D), se esperan eventos de menor duración en la región noreste de la provincia para todos los escenarios de emisión de GEI, con una señal robusta de cambio. Los valores de D proyectados indican sequías en el futuro de hasta 1,25 meses menos de duración en comparación con el periodo de referencia (Figura 8). El escenario SSP5-8.5, en cambio, mostró una señal poco robusta de mayor D sobre la región oeste en ambos escenarios temporales, siendo más relevante para el futuro lejano (Figura 8).

La Tabla IX muestra el cambio esperado en D, evidenciando que las regiones climáticas del oeste de la provincia (regiones climáticas “*subhúmedo muy frío*” y “*semiárido moderadamente frío*”) presentarán en promedio una mayor duración media en los eventos de sequía en el futuro en comparación al periodo de referencia; mientras que para las demás regiones climáticas se espera una menor duración, sobre todo en aquellas regiones ubicadas hacia el noreste del área de estudio.

En la Figura 9 se presenta el indicador de severidad media de eventos (S). En este, sequías más prolongadas significan eventos que acumulan mayor cantidad de meses con valores de SPI negativos. El escenario SSP5-8.5 presenta el mayor cambio robusto en este atributo,

con eventos más severos en toda la región oeste para el futuro (Figura 9), territorio en el que también se observaron los eventos de mayor duración en comparación al periodo de referencia. Para esta región, en la zona de la cordillera de Los Andes, los eventos se presentan más severos con valores entre -7 y -9, lo que representa en promedio sequías con un 76% de mayor severidad.

Las regiones climáticas *subhúmeda muy fría*, *semiárida moderadamente fría* y *seca fría* (regiones 5, 6 y 7), ubicadas al oeste de la provincia y que poseen las mayores acumulaciones de lámina anual precipitada en el periodo de referencia (Almonacid *et al.*, 2021), son las más impactadas por la severidad media de los ES esperados bajo el escenario de mayor emisión de GEI, siendo más evidente en el futuro lejano (Tabla X). Entre éstas, la región climática *semiárida moderadamente fría* presenta los eventos más severos en comparación al periodo de referencia.

#### **4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

Durante los últimos 60 años, la mayor parte de la provincia de Santa Cruz registró una tendencia negativa significativa en la precipitación media anual y estacional, principalmente en el norte y noreste de la región. Estudios previos revelaron resultados similares en la tendencia negativa de la precipitación anual en el sur de Patagonia (Castañeda y González, 2008), en especial en la franja central con un promedio -3mm/año y tendencias levemente positivas en el sureste y noreste en el periodo 1950-1999. Estos resultados son coincidentes con Balmaceda-Huarte *et al.* (2021), quienes a partir del análisis de bases de datos de reanálisis encontraron para la Patagonia tendencias negativas en la precipitación anual para el periodo 1979-2017. Camilloni *et al.* (2023) analizaron los cambios observados en la precipitación anual y estacional del periodo 1961-2020 a partir del análisis de la base de datos GPCC, y encontraron tendencias negativas en la precipitación anual para la provincia de Santa Cruz, con reducciones de hasta un 20%/década. Sumado a esto, estudios recientes de Blanco y Doyle (2024) revelaron para la región un aumento en la superficie de zonas con mayor aridez, sobre todo al centro de la provincia de Santa Cruz, para el periodo 1991-2020 en comparación al periodo de

referencia 1961-1990.

La mayor frecuencia de eventos de sequía se manifestó en la costa noreste, con más de 4 eventos por década. Esto coincide con lo reportado por Spinoni *et al.* (2019), quienes estudiaron las sequías meteorológicas a partir del SPI12 y SPEI12 para el periodo 1951-2016, encontrando que la región centro-este de la provincia de Santa Cruz es la que presenta la mayor cantidad de eventos totales de sequía para el periodo estudiado. Spinoni *et al.* (2019) compararon, además, dos periodos pasados (1981-2016 y 1951-1980), y concluyeron que los eventos más severos se presentaron en el periodo más reciente, sobre todo en la región centro oeste de la provincia.

La disminución en la precipitación anual y estacional, así como la mayor cantidad de eventos de sequía meteorológica en el centro norte de la provincia, sumado al fenómeno de sobrepastoreo han contribuido en los últimos años a incrementar el riesgo de desertificación, principalmente en el centro- este de la provincia de Santa Cruz (Del Valle *et al.* 1998). Este proceso de desertificación no solo atenta contra la productividad primaria de los pastizales naturales, sino también al stock de carbono del suelo y otros nutrientes esenciales (Peri *et al.* 2021).

Para los modelos climáticos seleccionados, las simulaciones que consideraron los escenarios de menor emisión de GEI (SSP1-2.6 y SSP2-4.5) no mostraron cambios robustos en la precipitación media anual, en los cuales los valores oscilaron entre +5 y -5% con respecto al periodo de referencia. Mientras que para el escenario de mayor emisión de GEI (SSP5-8.5) se espera una fuerte reducción en la precipitación media anual, con las regiones más afectadas en el centro y noroeste, y con valores entre un 10-30% de reducción, siendo esta señal robusta. Situación similar fue descrita por Zhao y Dai (2022), quienes reportaron para el mismo escenario de emisiones de GEI, una disminución en la precipitación cercana al 30% en la región noroeste de Santa Cruz para el periodo 2070-2099 con respecto al periodo histórico 1970-1999, sobre 25 modelos integrantes del CMIP6. Cabe aclarar que los autores no seleccionaron a los modelos climáticos por su bondad de representación de la precipitación al ser un trabajo a escala global.

El escenario SSP5-8.5 evidencia que estos cambios negativos no se manifestaron de igual forma para cada estación del año. Por ejemplo, para el verano se espera una disminución entre el 15-45% de las lluvias acumuladas entre enero-febrero-marzo para el futuro lejano (2081-2100), sobre todo en el noroeste de la provincia, y entre un 15-25% de reducción para las precipitaciones del invierno (julio-agosto-septiembre) en el noreste. Resultados similares fueron reportados por Pessacg *et al.* (2022) quienes determinaron reducciones mayores al 30% en la precipitación del verano en el centro-noroeste de la provincia de Santa Cruz, al comparar un futuro lejano (2080-2099) y un pasado reciente (1979-2005) para un ensamble del modelo CORDEX bajo el escenario RCP 8.5. En coincidencia con Pessacg *et al.* (2022), el invierno presentó una señal positiva de cambio en la precipitación acumulada estacional, con un incremento de hasta el 25% en la región suroeste de la provincia. Justamente, esta es una de las regiones más húmedas con una precipitación media anual que ronda los 250-500 mm/año; siendo el otoño e invierno las estaciones más llovedoras dentro del año (Almonacid *et al.*, 2021).

Los eventos de sequía no presentaron un aumento significativo en su frecuencia al analizar los escenarios de mayor emisión de GEI. Por el contrario, se evidenciaron regiones donde se espera una menor cantidad de eventos totales de sequía en comparación al periodo de referencia, sobre todo en el oeste asociada a las zonas más húmedas de la provincia (Almonacid *et al.*, 2021). En forma similar, las proyecciones para la frecuencia de sequías extremas no presentan cambios relevantes en el futuro. Otros autores, mediante el uso de diferentes índices a nivel global (Cook *et al.*, 2020, Zhao *et al.*, 2021) encontraron una señal de aumento de los eventos de sequía para el sur de la Patagonia, con valores de hasta un 100% más de eventos para el escenario SSP5-8.5 (Zhao *et al.*, 2021) así como también eventos de sequía más largos en el futuro lejano, situación que si coincidió con los resultados encontrados en este trabajo.

Las proyecciones para la duración media de los eventos de sequía presentaron una doble señal de cambio, con una región centro-este asociada a eventos de menor duración media, sobre todo para los escenarios de mayor emisión de GEI (SSP2-4.5 y SSP5-8.5), y una región oeste con eventos de hasta 1 mes más largos de duración, principalmente en el futuro

lejano (2081-2100) y bajo el escenario SSP5-8.5. Esta última región, asociada a los grandes lagos de la provincia y cabecera de los principales ríos de la región (Masiokas *et al.*, 2019), será afectada por eventos más severos de sequía, sobre todo en el escenario de mayor emisión de GEI (SSP5-8.5), en el cual para el periodo 2081-2100 se proyectan eventos con un 76% de mayor severidad media, siendo esta señal robusta. Resultados similares fueron encontrados por Cook *et al.* (2020) al analizar 13 modelos del CMIP6, quienes informaron un aumento en el riesgo de sequías en la región sur de Argentina, explicado por una disminución en la precipitación escorrentía superficial y la humedad del suelo, sobre todos para los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Por su parte, Zhao *et al.* (2021) mediante el análisis de 25 modelos del CMIP6 reportaron que en el futuro lejano (2070-2099) para un escenario de mayor emisión de GEI (SSP5-8.5) se espera un aumento en la frecuencia de eventos de sequía, así como también eventos más largos para el sur de la Patagonia Argentina al analizar el índice de Palmer a nivel global (Palmer, 1965). Éste, incorpora el concepto de evapotranspiración como efecto de pérdida de agua del sistema.

En el presente estudio se utilizó un solo índice de sequía, basado tan solo en la precipitación. Considerando que uno de los aspectos físicos en lo que se espera mayor cambio es la temperatura del aire, con un incremento de hasta 4°C para el escenario de mayor emisión de GEI (IPCC, 2023), es necesario en trabajos futuros incorporar el uso de otros indicadores que tengan en cuenta la temperatura y su influencia sobre la evapotranspiración (Zhao y Dai, 2022), como el SPEI (Vicente-Serrano *et al.*, 2010) y el índice de Palmer (PDSI). Cook *et al.* (2020) encontraron que la estimación de la frecuencia y severidad de sequías se incrementa al analizar la humedad del suelo y los cambios en la escorrentía de forma más robusta que los cambios solo basados en la precipitación. Por otro lado, Spinoni *et al.* (2018) recomiendan el uso de modelos climáticos regionales de mayor resolución espacial, como los producidos por el proyecto CORDEX (0,11°), así como también el ajuste de los desvíos de los modelos, a fin de reducir la incertidumbre relacionada a parámetros espaciales y desvíos estructurales en el proceso de modelado climático.

**Artículo en edición**

<https://doi.org/10.24215/1850468Xe035>

Se estima que la disminución en la precipitación, la alta variabilidad interanual en la precipitación y el calentamiento global cause reducciones severas en la productividad de los pastizales naturales, así como también en la capacidad de carga animal de los sistemas productivos (Qian *et al.*, 2012). Las respuestas en la productividad, estabilidad y propiedades de las comunidades vegetales podrían diferir según los distintos escenarios de cambio climático (Li *et al.*, 2018). Según los resultados obtenidos en el presente trabajo, la disminución en la precipitación anual y estacional, así como la existencia de eventos de sequías más largos y severos, junto con el aumento esperado en la temperatura media anual, podrían determinar efectos negativos sobre la productividad primaria de los pastizales naturales de la región, con la subsecuente disminución en la producción ganadera extensiva. También se podrían esperar efectos negativos sobre la productividad de los bosques nativos que se desarrollan en las zonas de montaña debido a un aumento de eventos de sequías más duraderos y severos, además de una disminución en la precipitación de otoño y verano.

**AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a la empresa ENAP SIPETROL por la contribución de recursos al proyecto de investigación, a la Municipalidad de Rio Gallegos y al Ing. Rec. Nat. Mariano Bertinat por su contribución desde la Secretaria de Estado de Ambiente de la provincia de Santa Cruz durante el periodo 2016-2023.

**REFERENCIAS**

Almazroui M., Ashfaq M., Islam N. M., Rashid I. U., Kamil S., Abid M. A., O'Brien E., Ismail M., Reboita M. S., Sörensson A. A., Arias P. A., Alves L. M., Tippet M. K., Saeed S., Haarsma R., Doblus-Reyes F. J., Saeed F., Kucharsky F., Nadeem I., Silva-Vidal Y., Rivera J. A., Ehsan M. A., Martínez-Castro D., Muñoz A., Ali M. A., Coppola E., Bamba Sylla M., 2021: Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. *Earth Systems and Environment*, 5: 155-183.

Almonacid L., Pessacg N., Díaz B., Bonfili O., Peri P.L., 2021: Nueva base de datos reticulada de precipitación para la provincia de Santa Cruz, Argentina. *Meteorológica*, Vol.

46 N° 2 (2021) 27 – 54.

Almonacid L., Pessacg N., Díaz B., Bonfilio O., Peri P.L., 2022: Nueva base de datos reticulada de temperatura para la provincia de Santa Cruz, Argentina. *Meteorológica* 47: 1-19.

Almonacid L., Pessacg N., Díaz B., Peri P.L., 2023: Climate regionalization of Santa Cruz province, Argentina. *Atmósfera* 37, 245-258.

Balmaceda-Huarte R., Olmo M.E., Bettolli M.L., Poggi M.M., 2021: Evaluation of multiple reanalyses in reproducing the spatio-temporal variability of temperature and precipitation indices over southern South America. *International Journal of Climatology*, 41:5572-5595.

Bianchi E., Villalba R., Viale M., Couvreur F., Marticorena R., 2016: New precipitation and temperature grids for northern Patagonia: Advances in relation to global climate grids. *Journal of Meteorological Research*, 30: 38 – 52.

Blanco P.S., Doyle M.E., 2024: Temporal variability of aridity in Argentina during the period 1961-2020. Disponible en SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4849485>.

Camilloni I., Blázquez J., Díaz L., Gulizia C., Müller G., Lovino M., Pessacg N., Rivera J., Saurral R., 2023: Estudio sobre cambios observados y escenarios climáticos futuros para Argentina para diferentes horizontes temporales y umbrales de calentamiento global. FUNDACEN. Proyecto ARG 19003: Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. 161 pp.

Chiew F. H. S., Whetton P. H., McMahon T. A., Pittock A. B., 1995: Simulation of the impacts of climate change on runoff and soil moisture in Australian catchments. *Journal of Hydrology* 167 (1995) 121 - 147.

Cook B.I., Mankin J.S., Marvel K., Williams P., Smerdon J.E., Anchukaitis K.J., 2020: Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future*,

8:1-20.

Daramola M. T., Xu M., 2021: Recent changes in global dryland temperature and precipitation. *International Journal of Climatology*; V 42:2; pp 1267- 1282.

Del Valle H. F., Elissalde N. O., Gagliardini D. A., Milovich J., 1998: Status of desertification in the Patagonian region: Assessment and mapping from satellite imagery. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 12:2, 95-121.

Dong Z., Liu H., Baiyinbaoligao, Hu H., Ali Khan M.Y., Wen J., Chen L., Tian F., 2022: Future projection of seasonal drought characteristics using CMIP6 in the Lancang-Mekong river basin. *Journal of Hydrology* 610, 127815.

Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E., 2016: Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, 1937-1958.

Farahmand A., AghaKouchak A., 2015: A generalized framework for deriving nonparametric standardized drought indicators. *Advances in Water Resources*, 73: 140-145.

Fung K.F., Huang Y.F., Koo C.H., 2020: Assessing drought conditions through temporal pattern, spatial characteristic and operational accuracy indicated by SPI and SPEI: case analysis for Peninsular Malaysia. *Natural Hazard (2020)* 103:2071-2101.

Garreaud R. D., Falvey M., 2009: The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios. *International Journal of Climatology*, vol. 29, no. 4, pp. 543–554.

Giorgi F., Raffaele F., Coppola E., 2019: The response of precipitation characteristics to global warming from climate projections. *Earth System Dynamics*, 10, 73-89.

Harris I., Osborn T.J., Lister D., 2020: Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, 7:109 18pp.

Hayes M., Svoboda M., Wall N., Widhalm M., 2011: The Lincoln Declaration on Drought Indices: universal meteorological drought index recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92:485–488.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)., 2023: Technical Summary. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 35-144). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157896.002

Li X., Sha J., Liang-Wang Z., 2019: Comparison of drought indices in the analysis of spatial and temporal changes of climatic droughts events in a basin. *Environmental Science and Pollution Research* (2019) 26:10695-10707.

Li W., Li X., Zhao Y., Zheng S., Bai Y., 2018: Ecosystem structure, functioning and stability under climate change and grazing in grasslands: current status and future prospects. *Current opinion in Environmental Sustainability*, 33:124-135.

Liu C., Yang C., Yang Q., Wang J., 2021: Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China. *Scientific Reports*, 11:1280.

Liu Z., Wang Y., Shao M., Jia X., Li X., 2016: Spatiotemporal analysis of multiscalar drought characteristics across the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*. 534, 281–299.

Masiokas M.H., Cara L., Villalba R., Pitte P., Luckman B.H., Toum E., Christie D.A., Le Quesne C., Mauget S., 2019: Streamflow variations across the Andes (18°-55°S) during the instrumental era. *Scientific Reports, Nature Research*, 9:17879.

McKee T.B., Doeskin N.J., Kleis J., 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society, Boston, MA, pp. 179-184.

**Artículo en edición**

<https://doi.org/10.24215/1850468Xe035>

Mishra A.K., Singh V.P., 2011: Drought modelling – A review. *Journal of Hydrology* 403: 157 – 175.

Núñez M., Solman S. A., Cabré M. F., 2009: Regional climate change experiments over southern South America. II: climate change scenarios in the late twenty-first century. *Climate Dynamics*, vol. 32, no. 7-8, pp. 1081–1095, 2009.

O'Neill CO., Tebaldi C., van Vuuren DP., Eyring V., Friedlingstein P., Hurtt G., Knutti R., Kriegler E., Lamarque JF., Lowe J., Meehl GA., Moss R., Riahi K., Sanderson BM., 2016: The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9: 3461-3482.

Palmer W.C., 1965: Meteorological drought. U.S Weather Bureau Research Paper, 45, 58pp.

Paruelo J.M., Beltrán A., Jobbágy E., Sala O.E., Golluscio R.A., 1998: The Climate of Patagonia: general patterns and controls on biotic processes. *Ecología Austral*, 8:85-101.

Peri P. L., Lasagno R. G., Chartier M., Roig F., Rosas Y. M., Martínez Pastur G., 2021. Soil erosion rates and nutrient loss in rangelands of southern Patagonia. *Imperiled: The Encyclopedia of Conservation*, 2022, pp. 102-110.

Pessacg N., Liberoff A., Salvadores F., Rimoldi F., Brandizi L., Alonso Roldán V., Mac Donell L., Ambrosio M., Raguileo D., Malnero H., Rius P., Diaz L., 2021: Emergencia hídrica 2021-2022: Situación socio-ambiental de las cuencas de los ríos Chubut y Senguer. Informe técnico. Grupo técnico del Comité de Cuenca del Rio Chubut. Disponible en <http://www.repositorio.cenpat-conicet.gob.ar/123456789/1485>

Pessacg N., Blázquez J., Lancelotti J., Solman S., 2022: Climate changes in coastal areas of Patagonia: Observed trends and future projections. En: Helbling EW., Narvarte MA., Gonzalez RA., Villafañe VE. (eds) *Global Change in Atlantic Coastal Patagonian Ecosystems. Natural and Social Sciences of Patagonia*, pp 13-42.

Quiring S.M., 2009: Monitoring drought: an evaluation of meteorological drought indices. *Geography Compass* 3 (1), 64–88.

Qian S., Wang L.Y., Gong X.F., 2012: Climate change and its effects on grassland productivity and carrying capacity of livestock in the main grasslands of China. *Rangeland Journal* 2012, 34:341-347.

Rivera J.A., Penalba O.C., 2014: Trends and spatial patterns of drought affected area in southern America. *Climate*, 2:264-278.

Rivera J. A., Araneo D. C., Penalba O. C., Villalba R., 2018: Regional aspects of streamflow droughts in the Andean rivers of Patagonia, Argentina. Links with large-scale climatic oscillations. *Hydrology Research*, 49:1, 134-149.

Rossato L., Marengo J.A., De Angelis C.F., Marinho Pires L.B., Mendiondo EM., 2017: Impact of soil moisture over Palmer Drought Severity Index and its future projections in Brazil. *Revista Brasileira de Recursos hídricos*, v.22, e36.

Spinoni J., Vogt V., Naumann G., Barbosa P., Dosio A., 2018: Will drought events become more frequent and severe in Europe? *International Journal of Climatology* 38:1718-1736.

Spinoni J., Barbosa P., De Jager A., McCormick N., Naumann G., Vogt J.V., Magni D., Masante D., Mazzeschi M., 2019: A new global database of meteorological drought events from 1951 to 2016. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 22, 24pp.

Szép I.J., Mika J., Dunkel Z., 2005: Palmer drought severity index as soil moisture indicator: physical interpretation, statistical behavior and relation to global climate. *Physics and Chemistry of the Earth* 30:231-243.

Trenberth K. E., 1983: What are seasons? *Bulletin of American Meteorological Society* 64(11), 1276-1282.

Vera C., Skanski M., González M., 2023: Características de las sequías en el sur de

Sudamérica. SISSA-ART-001-2023, 26pp.

Vicente-Serrano S.M., Begueria S., Lopez-Moreno J.I., 2010: A multiscale drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate* 23(7):1696-1718.

World Meteorological Organization (WMO) y Global Water Partnership (GWP)., 2016: *Handbook of Drought Indicators and Indices*. Autores: Svoboda M., Fuchs B.A., WMNO-N° 1173. Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva.

Xu F., Bento V. A., Qu Y., Wang Q., 2023: Projections of global drought and their climate drivers using CMIP6 global climate models. *Water*, 15, 2272, 18 pp.

Yadav R., Tripathi SK., Pranuthi G., Dubey K., 2014: Trend analysis by Mann-Kendall test for precipitation and temperature for thirteen districts of Uttarakhand. *Journal of Agrometeorology* 16 (2): 164-171.

Yuan W., Zhou G., 2004: Comparison between standardized precipitation index and Z-index in China. *Acta Phytoecol Sin* 28(4): 523–529.

Zargar A., Sadiq R., Naser B., Khan F.I., 2011: A review of drought indices. *Environmental Reviews*, 19:333–349.

Zhang Y., Wang P., Chen Y., Yang J., Wu D., Ma Y., Huo Z., Liu S., 2023: The optimal time-scale of Standardized Precipitation Index for early identifying summer maize drought in the Huang-Huai-Hai region, China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 46-101350.

Zhao T., Dai A., 2022: CMIP6 model-projected hydroclimatic and drought changes and their causes in the twenty-first century. *Journal of Climate*, 35:897-921.

Zhao X., Huang G., Li Y., Lin Q., Jin J., Lu C., Guo J., 2021. Projections of meteorological drought based on CMIP6 multi-model ensemble: A case study of Henan Province, China.

**Artículo en edición**

<https://doi.org/10.24215/1850468Xe035>

Journal of Contaminant Hydrology 243-103887.

**Figuras y Tablas**

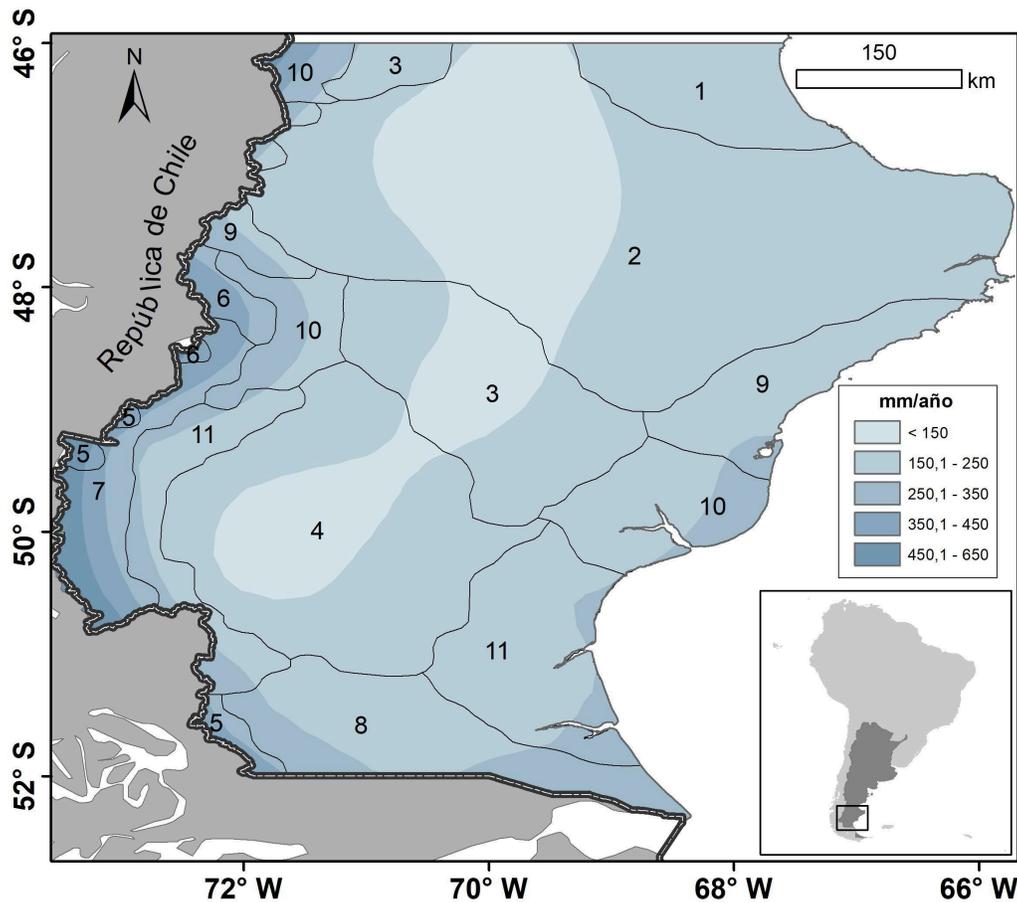


Figura 1. Isohietas medias anuales para la provincia de Santa Cruz para el periodo 1995-2014. Regiones climáticas (1) muy árido templado, (2) muy árido templado frío, (3) muy árido templado moderadamente frío, (4) muy árido frío, (5) subhúmedo muy frío, (6) semiárido moderadamente frío, (7) seco frío, (8) semiárido muy frío, (9) árido templado frío, (10) árido moderadamente frío, (11) árido frío.

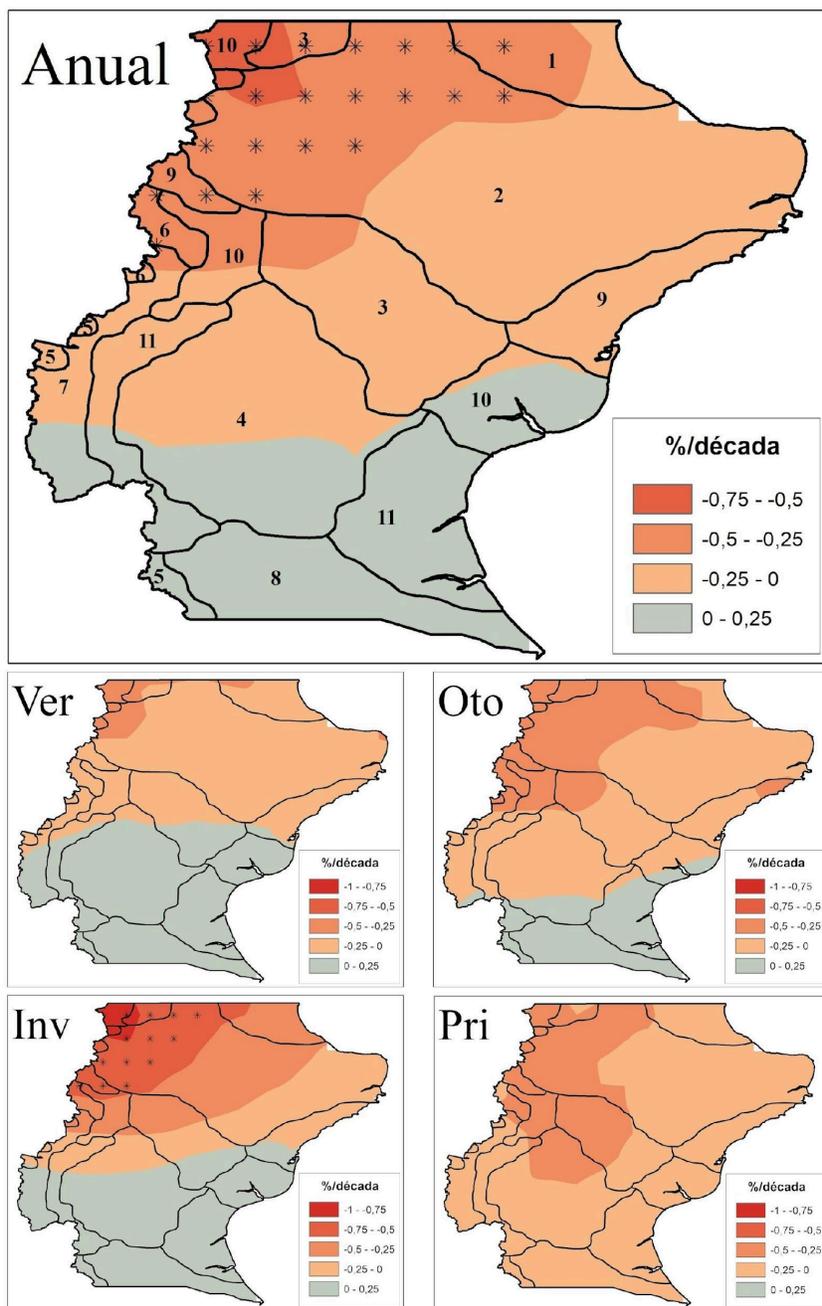


Figura 2. Análisis de tendencias en la precipitación anual y estacional para el periodo 1961-2020. Regiones climáticas (1) muy árido templado, (2) muy árido templado frío, (3) muy árido templado moderadamente frío, (4) muy árido frío, (5) subhúmedo muy frío, (6) semiárido moderadamente frío, (7) seco frío, (8) semiárido muy frío, (9) árido templado frío, (10) árido moderadamente frío, (11) árido frío. (\*) representa las zonas con tendencia significativa con un nivel de confianza  $\alpha < 0,05$ .

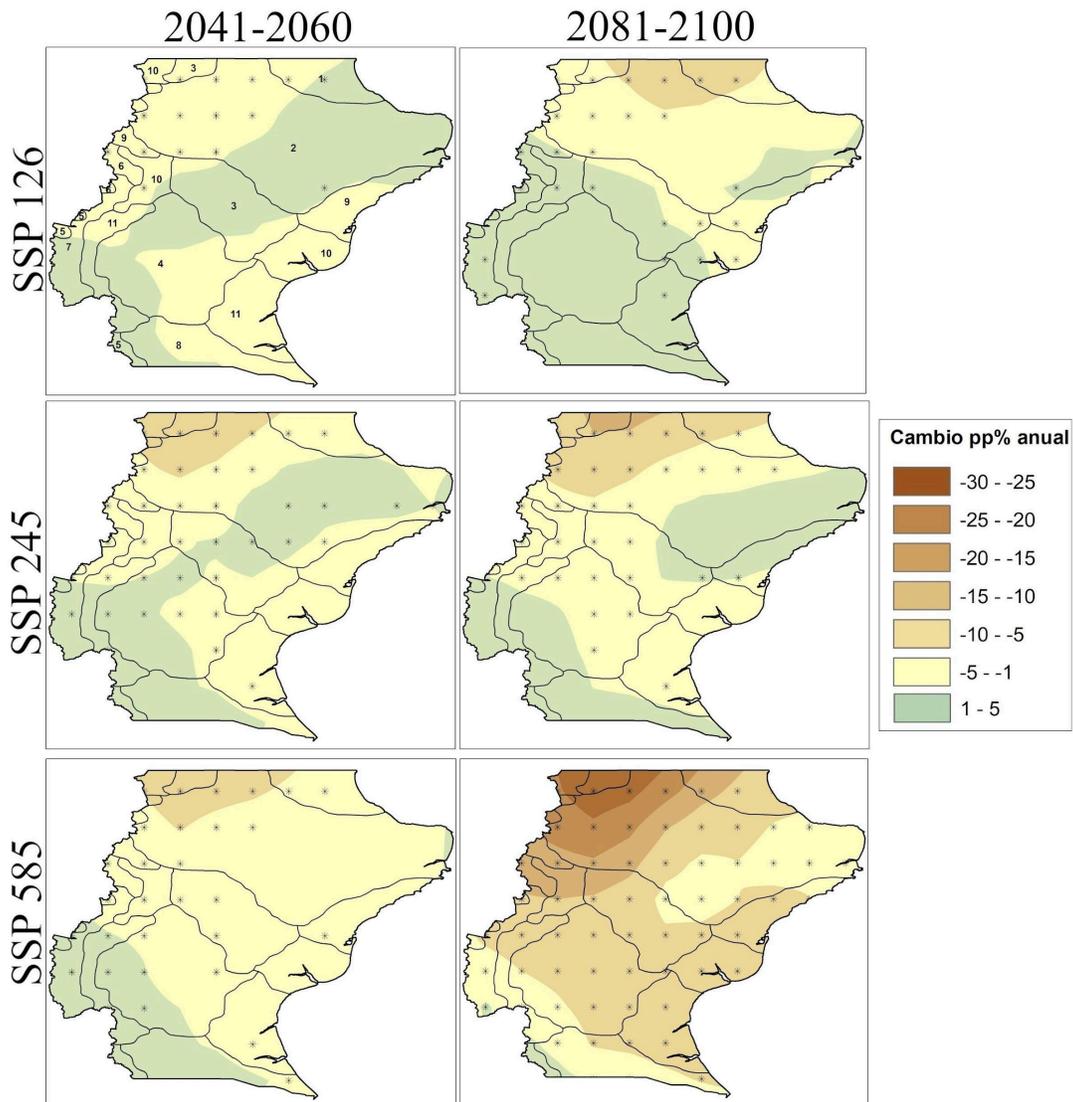


Figura 3. Cambio en la precipitación anual (%) para dos periodos futuros (2041-2060 y 2081-2100) bajo tres escenarios de emisión de gases de efecto invernadero. \* Significa que la proyección es robusta dado que 4 o más modelos coinciden en la señal de cambio.

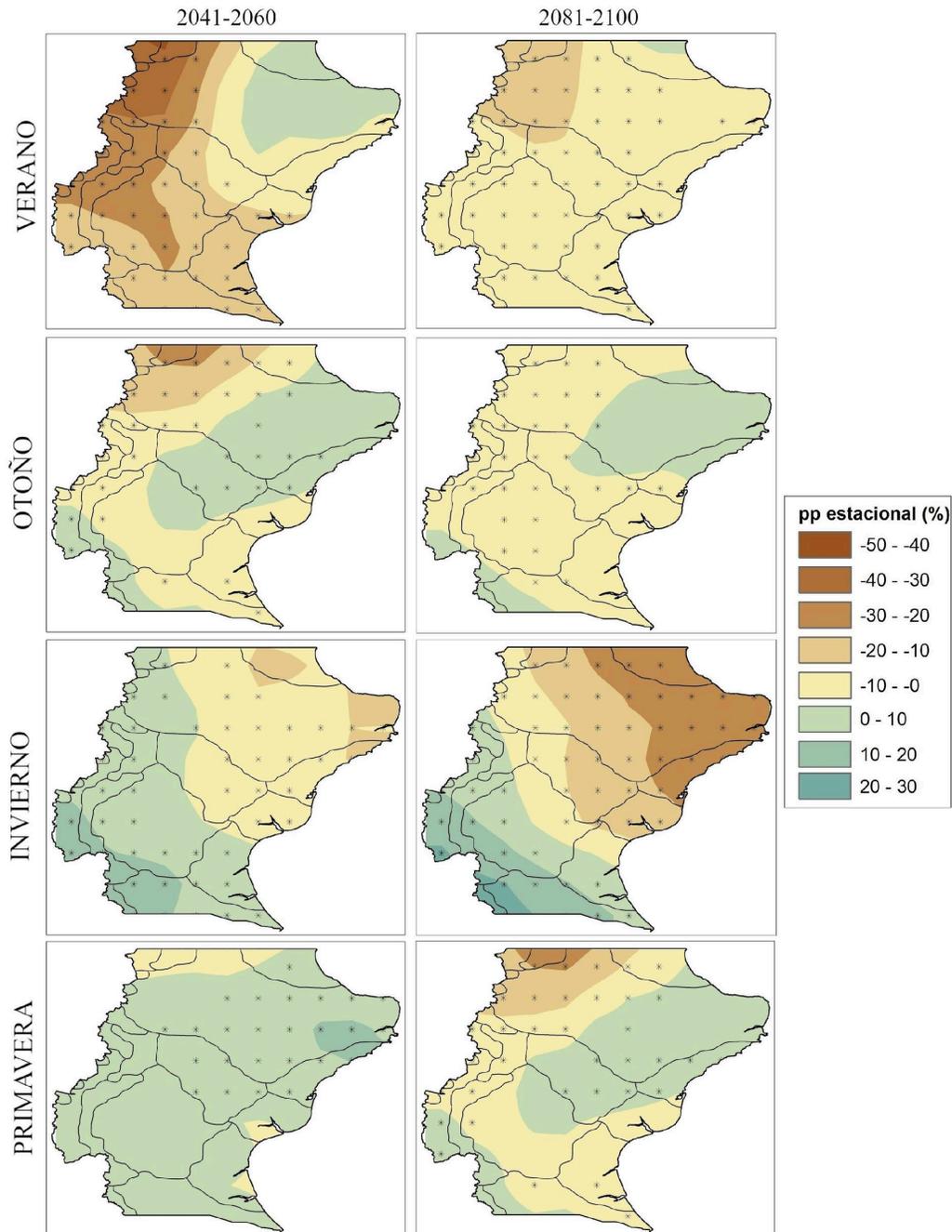


Figura 4. Cambio proyectado para la precipitación estacional (%) para dos horizontes temporales futuros (2041-2060 y 2081-2100) y para el escenario de emisión de gases de efecto invernadero SSP 5-8.5. \* Significa que la proyección es robusta dado que 4 o más modelos coinciden en la señal de cambio.

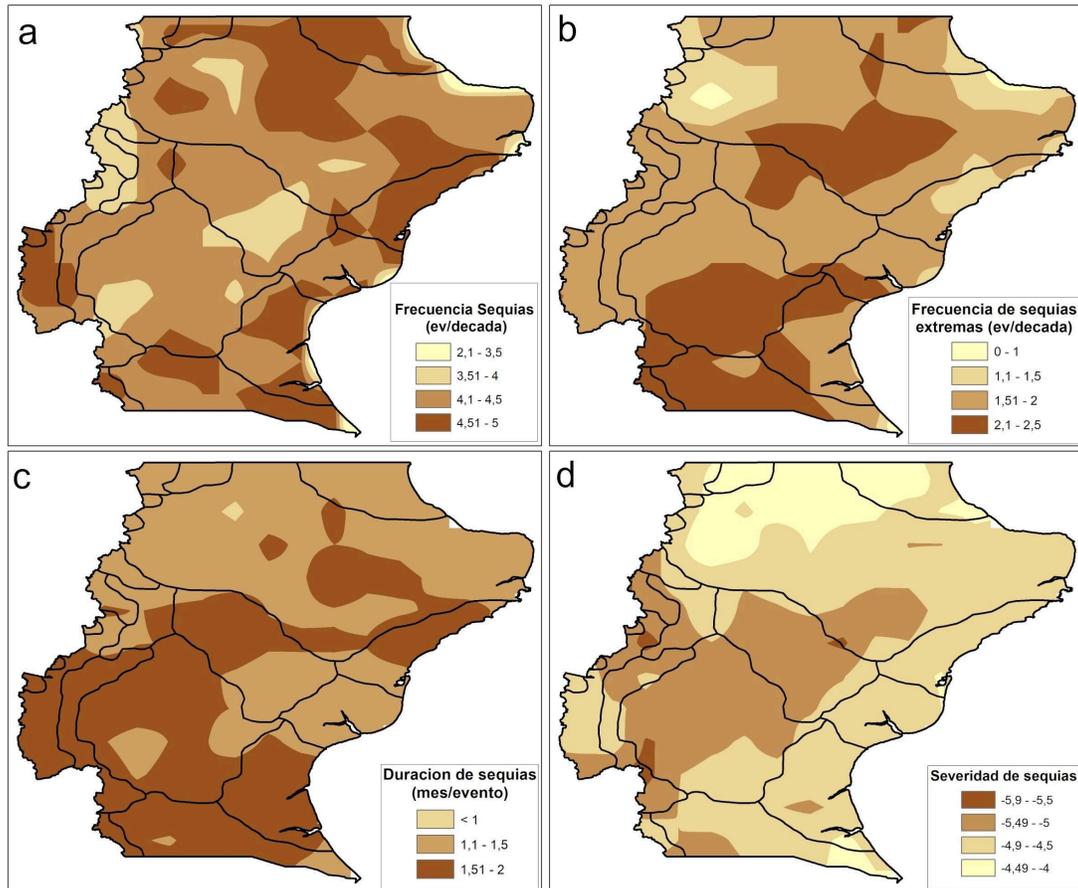


Figura 5. Frecuencia de eventos totales (a) y extremos de sequía (b), duración media (c) y severidad (d) de los eventos para la provincia de Santa Cruz, para el periodo pasado (1961-2020) según la escala de tiempo de seis meses calculada para el SPI (SPI6).

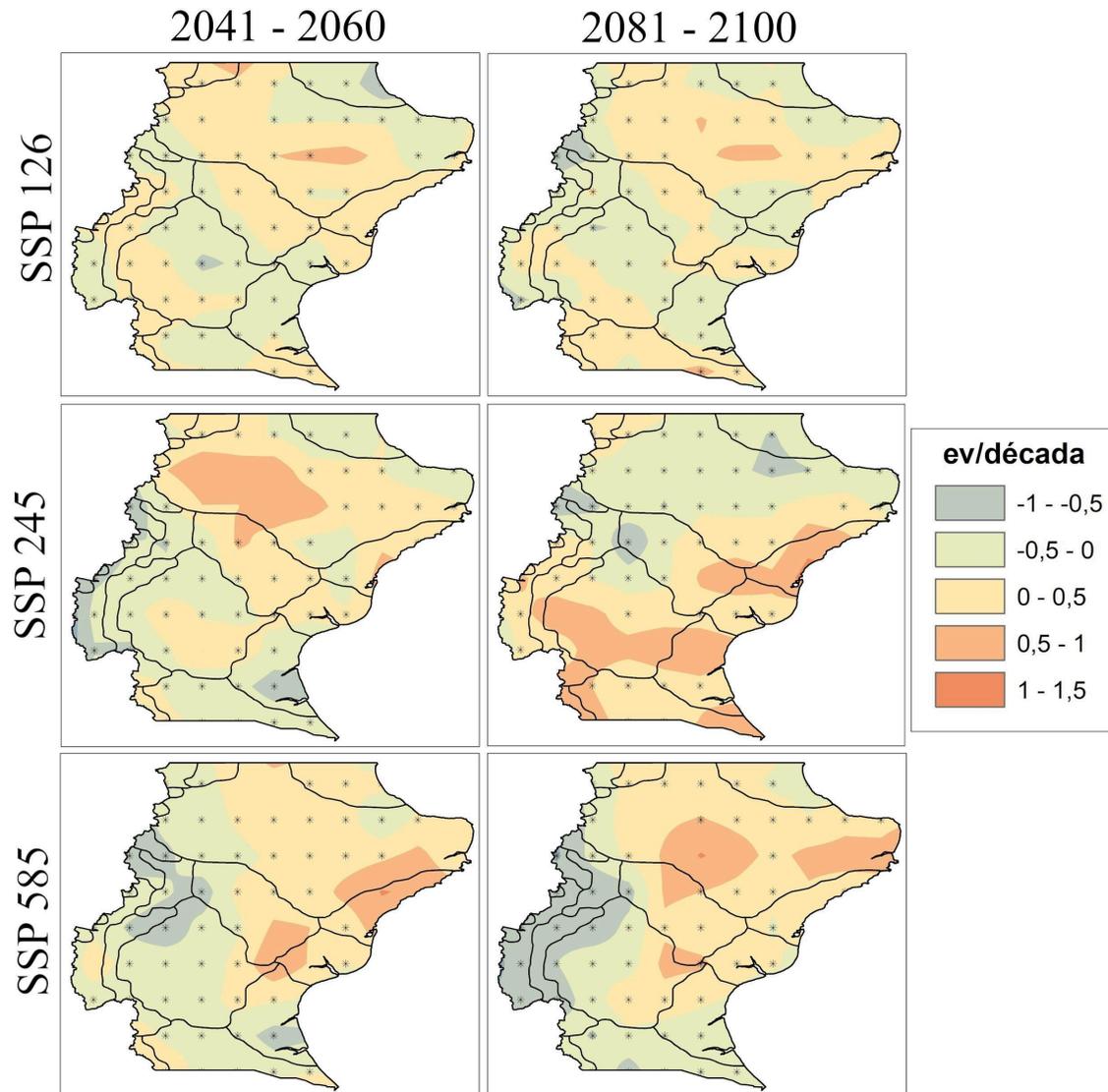


Figura 6. Diferencia en la frecuencia de eventos de sequía totales por década, proyectada para el futuro cercano (2041-2060) y lejano (2081-2100) en comparación al periodo de referencia (1995-2014) para el ensamble de 5 simulaciones calculado sobre el SPI6 para los escenarios de emisión de GEI SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5. \* Significa que la proyección es robusta dado que 4 o más modelos coinciden en la señal de cambio.

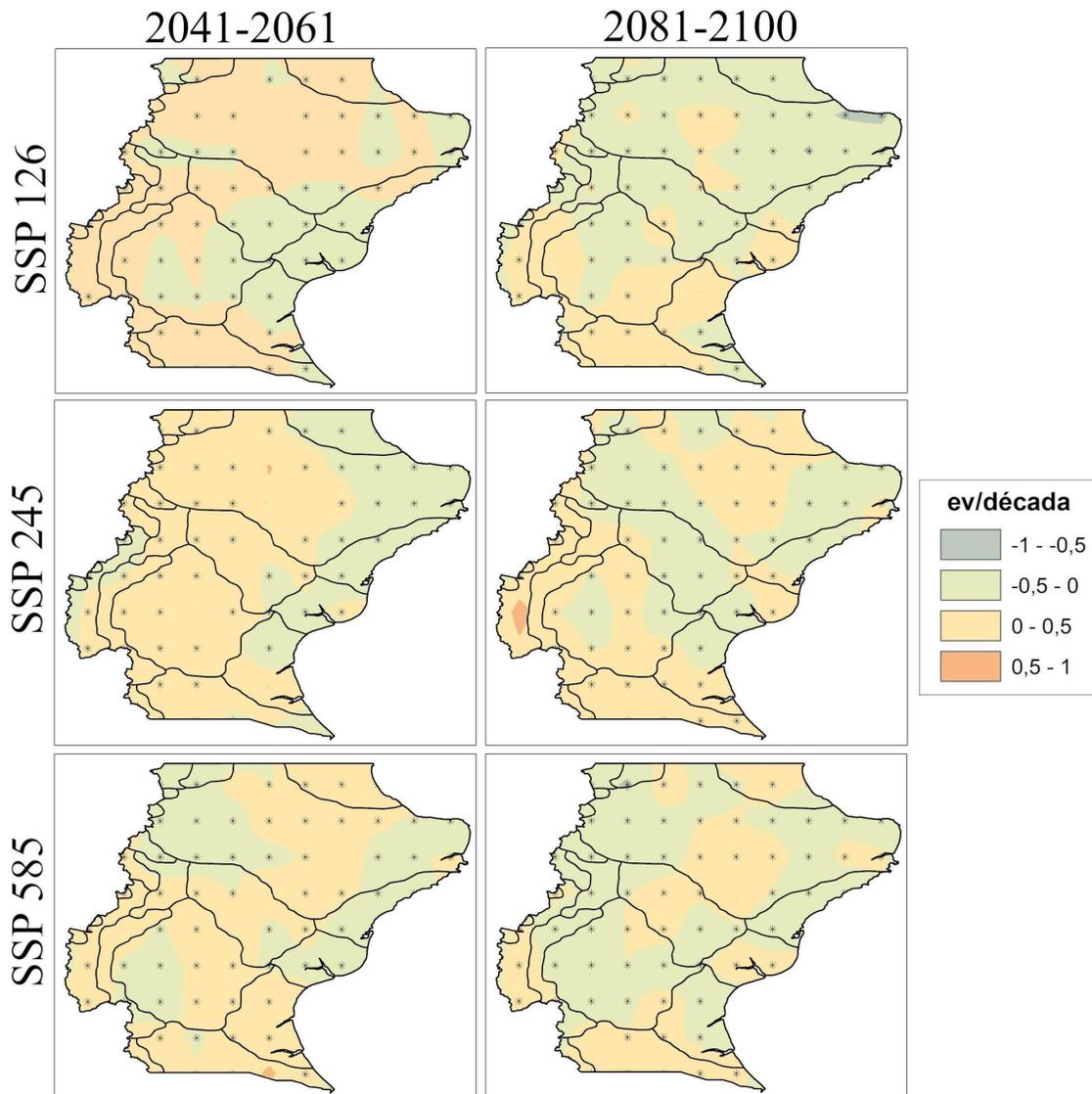


Figura 7. Diferencia en la frecuencia de eventos extremos de sequía totales por década, proyectada para el futuro cercano (2041-2060) y lejano (2081-2100) en comparación al periodo de referencia (1995-2014) para el ensamble de 5 simulaciones calculado sobre el SPI6 para los escenarios de emisión de GEI SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5. \* Significa que la proyección es robusta dado que 4 o más modelos coinciden en la señal de cambio.

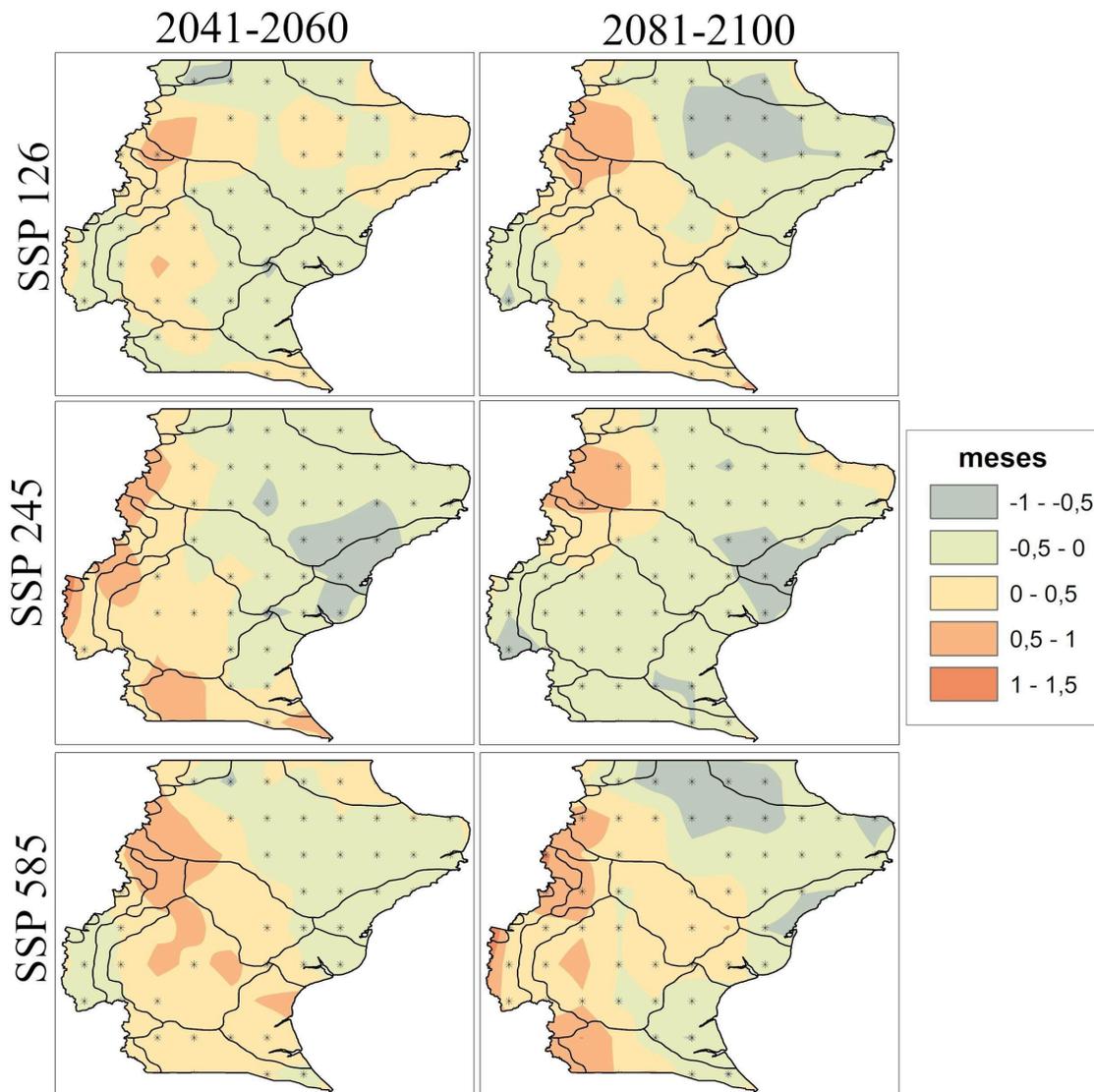


Figura 8. Diferencia en la duración media de los eventos de sequía, proyectada para el futuro cercano (2041-2060) y lejano (2081-2100) en comparación al periodo de referencia (1995-2014) para el ensamble de 5 simulaciones calculado sobre el SPI6 para los escenarios de emisión de GEI SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5. \* Significa que la proyección es robusta dado que 4 o más modelos coinciden en la señal de cambio.

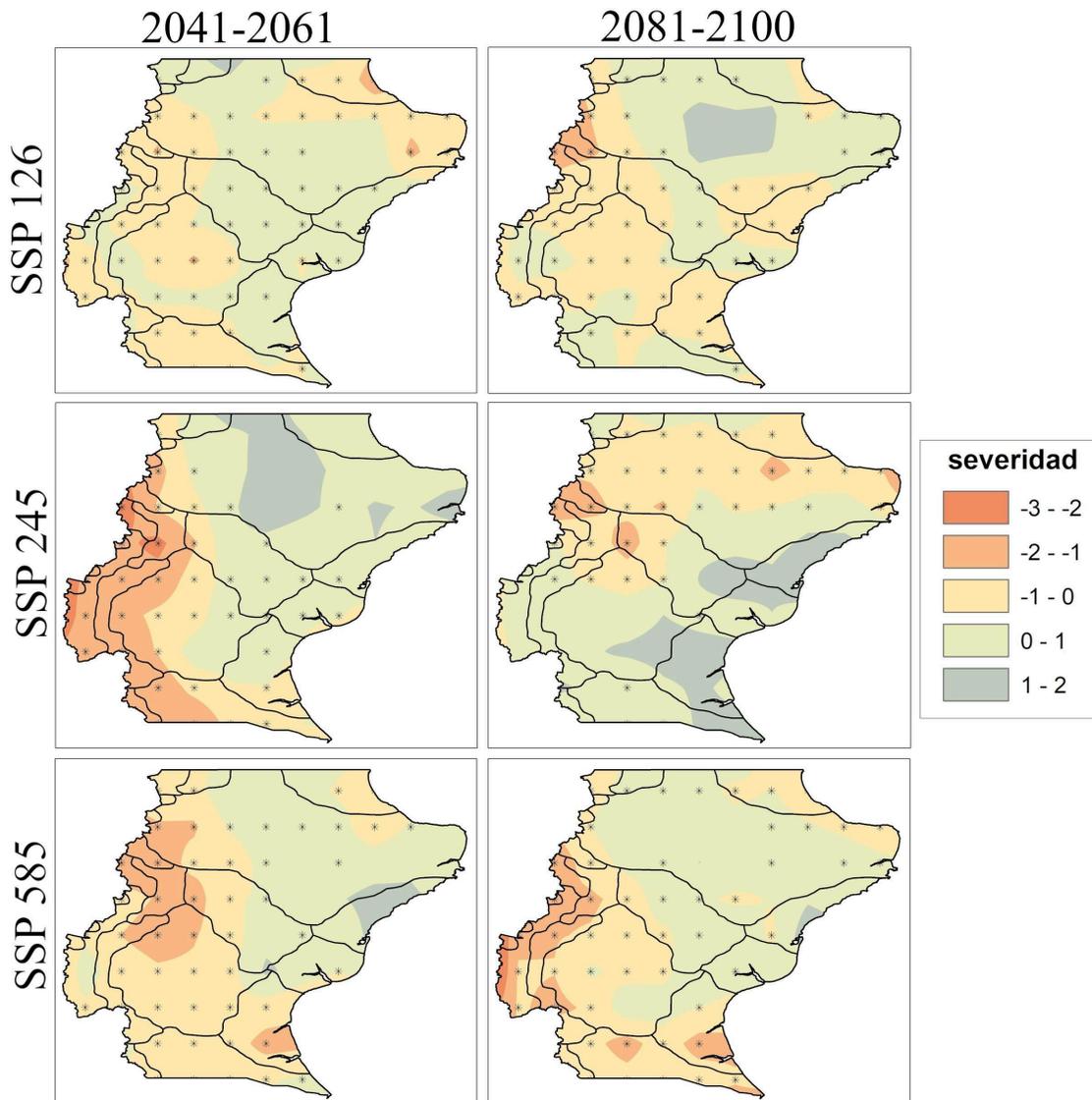


Figura 9. Diferencia en la severidad media de los eventos de sequía, proyectada para el futuro cercano (2041-2060) y lejano (2081-2100) en comparación al periodo de referencia (1995-2014) para el ensamble de 5 simulaciones calculado sobre el SPI6 para los escenarios de emisión de GEI SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5. \* Significa que la proyección es robusta dado que 4 o más modelos coinciden en la señal de cambio.

Modelo	Resolución espacial	Institucion
ACCES-CM2	1,90° x 1,30°	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation-Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science (CSIRO-ARCCSS)
ACCES-ESM1-5	1,90° x 1,20°	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)
BCC-CS2M-MR	1,10° x 1,10°	Beijing Climate Center (BCC)
CanESM5-p1	2,80° x 2,80°	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Environment and Climate Change
CMCC-CM2-SR5	0,93° x 1,25°	Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC)
CMIP6_average	1,88° x 1,25°	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation-Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science (CSIRO-ARCCSS)
CNRM-CM6-1f2	1,40° x 1,40°	Centre National de Recherches Meteorologiques (CNRM)
CNRM-ESM2-1f2	1,40° x 1,40°	Centre National de Recherches Meteorologiques (CNRM)
EC-Earth3	0,70° x 0,70°	EC-Earth-Consortium
Ec-Earth3-Veg	0,70° x 0,70°	EC-Earth-Consortium
FGOALS-f3-L	1,00° x 1,25°	Chinese Academy of Sciences (CAS)
GFDL-ESM4	1,30° x 1,00°	National Oceanic and Atmospheric Administration, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (NOAA-GFDL)
GISS-E2-1-G	2,00° x 2,50°	Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS)
HadGEM3-GC31-LL-f3	1,25° x 1,85°	Met Office Hadley Centre (MOHC)
INM-CM4-8	2,00° x 1,50°	Institute for Numerical Mathematics, Russian Academy of Science (INM)
INM-CM5-0	2,00° x 1,50°	Institute for Numerical Mathematics, Russian Academy of Science (INM)
IPSL-CM6A-LR	2,50° x 1,30°	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)
KACE-1-0-G	1,30° x 0,90°	National Institute of Meteorological Sciences/Korea Meteorological Administration (NIMS-KMA)
MIROC6	1,40° x 1,40°	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology-Atmosphere and Ocean Research Institute-National Institute for Environmental Studies-Center for Computational Science (MIROC)
MIROC-ES2L-f2	2,80° x 2,80°	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology-Atmosphere and Ocean Research Institute-National Institute for Environmental Studies-Center for Computational Science (MIROC)
MPI-ESM1-2-HR	0,90° x 0,90°	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)
MPI-ESM1-2-LR	1,90° x 1,90°	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)
MRI-ESM2-0	1,10° x 1,10°	Meteorological Research Institute (MRI)
NESM3	1,90° x 1,90°	Nanjing University of Information Science and Technology (NUIST)
NorESM2-LM	2,50° x 1,90°	Climate modeling Consortium consisting of CICERO (NCC)
NorESM2-MM	0,90° x 1,30°	Climate modeling Consortium consisting of CICERO (NCC)
UKESM1-0-LL-f2	1,90° x 1,30°	Met Office Hadley Centre (MOHC)

Tabla I. Características principales de los modelos climáticos integrantes del proyecto CMIP6.

Categorías climáticas de humedad	SPI
Húmedo extremo	≥2.0
Húmedo severo	1.5 a 1.99
Moderadamente húmedo	1.0 a 1.49
Normal	0.99 a -0.99
Moderadamente seco	-1.0 a -1.49
Sequia severa	-1.5 a -1.99
Sequia extrema	≤-2.0

Tabla II. Categorías climáticas por humedad según Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) (McKee *et al.*, 1993).

Modelo	Desvio medio (%)	Desvio maximo (%)	Desvio minimo (%)
HadGEM3-GC31-LL-f3	243,2	883,2	47,6
UKESM1-0-LL-f2	243,4	892,6	49,8
ACCES-CM2	269,3	955,1	55,5
EC-Earth3	274,5	694,5	66,0
Ec-Earth3-Veg	277,3	713,0	58,4
MPI-ESM1-2-HR	287,9	1146,0	36,1
CMCC-CM2-SR5	332,3	1059,2	57,0
FGOALS-f3-L	354,4	1167,3	69,6
NorESM2-MM	355,6	1216,4	71,8
GISS-E2-1-G	366,7	1141,2	70,6
GFDL-ESM4	396,7	1411,6	56,0
ACCES-ESM1-5	399,2	1082,2	91,0
BCC-CS2M-MR	409,5	1357,5	30,5
CMIP6_average	432,6	1411,0	63,3
INM-CM5-0	490,7	2202,5	55,9
INM-CM4-8	497,0	1484,1	40,4
KACE-1-0-G	508,9	1967,8	81,7
MRI-ESM2-0	584,6	2110,7	114,0
CanESM5-p1	591,3	1989,2	22,6
NESM3	616,0	2356,2	14,1
MIROC6	631,1	1916,2	55,9
NorESM2-LM	663,6	2219,5	47,4
MPI-ESM1-2-LR	715,1	2637,5	30,6
MIROC-ES2L-f2	763,9	2456,3	19,2
CNRM-CM6-1f2	802,7	2946,1	59,6
IPSL-CM6A-LR	803,1	2625,9	76,5
CNRM-ESM2-1f2	813,8	2963,5	54,0

Tabla III. Desvío medio (%) en la precipitación media anual representada por 27 modelos integrantes de CMIP6 testeados a partir de la base de datos CRU para el periodo de referencia 1995-2014.

Region Climatica	Anual		Verano		Otoño		Invierno		Primavera	
	%/ año.de cada	mm/de cada								
Muy arido templado	-0,29	-4,04	-0,21	-0,66	-0,26	-1,30	-0,45	-1,59	-0,20	-0,49
Muy arido templado frio	-0,27	-4,81	-0,14	-0,62	-0,26	-1,64	-0,39	-1,92	-0,23	-0,62
Muy arido moderadamente frio	-0,20	-3,84	-0,05	-0,20	-0,21	-1,37	-0,23	-1,50	-0,25	-0,77
Muy arido frio	-0,02	-0,61	0,08	0,88	-0,04	-0,57	0,08	0,67	-0,21	-1,59
Subhumedo muy frio	-0,01	-1,55	0,07	2,57	-0,03	-1,52	0,07	2,11	-0,14	-4,71
Semiarido moderadamente frio	-0,31	-29,33	-0,15	-3,59	-0,39	-10,16	-0,45	-9,98	-0,26	-5,60
Seco frio	-0,04	-3,03	0,03	1,53	-0,08	-2,33	0,04	2,37	-0,15	-4,60
Semiarido muy frio	0,07	3,35	0,14	1,89	0,08	0,85	0,20	1,94	-0,11	-1,33
Arido templado frio	-0,18	-8,11	-0,10	-1,04	-0,24	-2,90	-0,16	-2,84	-0,18	-1,33
Arido moderadamente frio	-0,10	-6,58	0,02	-0,31	-0,14	-2,34	-0,08	-2,49	-0,20	-1,44
Arido frio	-0,01	-0,52	0,08	0,95	-0,01	-0,46	0,12	0,84	-0,16	-1,85

Tabla IV. Tendencia media por década (%/década) en la precipitación anual y estacional para el periodo 1961-2020 por región climática.

ID Region Climática	SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP5-8.5	
	2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100
1 Muy arido templado	0,60	-5,01	-1,13	-4,44	-2,34	-7,30
2 Muy arido templado frio	0,21	-2,35	-1,21	-2,08	-2,38	-8,86
3 Muy arido moderadamente frio	0,29	0,24	-0,17	-0,32	-2,68	-6,21
4 Muy arido frio	-0,04	2,54	-0,02	-0,47	-0,91	-6,97
5 Subhumedo muy frio	-0,34	2,49	-0,14	0,13	0,63	-6,09
7 Seco frio	0,11	2,52	-0,02	0,20	0,36	-6,33
8 Semiarido muy frio	-0,76	3,19	0,26	0,43	0,32	-4,79
9 Arido templado frio	-0,85	-0,20	-1,58	0,48	-2,66	-6,25
10 Arido moderadamente frio	-1,53	-0,82	-3,24	-4,12	-3,84	-12,92
11 Arido frio	-1,23	1,70	-1,14	-1,01	-1,69	-7,90

Tabla V. Valores medios del cambio (%) en la precipitación anual para el futuro cercano (2041-2060) y el futuro lejano (2081-2100) bajo tres escenarios de emisión de gases de efecto invernadero según las diferentes regiones climáticas de la provincia de Santa Cruz.

ID Region climatica	Frec. Eventos (ev/década)	Frec. Eventos extremos (ev/década)	Duracion (mes/ev)	Severidad (Severidad/ev.)
1 Muy arido templado	3,5	1,8	2,5	-6,8
2 Muy arido templado frio	3,2	1,5	2,4	-7,4
3 Muy arido moderadamente frio	3,3	1,8	2,6	-7,4
4 Muy arido frio	3,3	1,9	3,1	-7,7
5 Subhumedo muy frio	3,5	2,0	3,1	-7,2
6 Semiarido moderadamente frio	3,2	1,7	3,0	-7,8
7 Seco frio	3,5	1,8	3,1	-7,2
8 Semiarido muy frio	3,5	1,8	3,0	-7,3
9 Arido templado frio	3,5	1,4	2,1	-6,7
10 Arido moderadamente frio	3,5	1,6	2,9	-7,2
11 Arido frio	3,2	1,9	3,0	-7,8

Tabla VI. Resumen de las principales características de las sequías (FS, FSext, D, S) para cada zona climática para SPI-6 en el periodo 1961-2020.

ID	Region climatica	SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP5-8.5	
		2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100
1	Muy arido templado	-0,33	-0,12	-0,29	-0,43	0,14	0,08
2	Muy arido templado frio	0,09	0,12	0,28	-0,18	0,16	0,35
3	Muy arido moderadamente frio	0,14	-0,05	0,17	0,06	0,03	0,21
4	Muy arido frio	-0,06	-0,10	0,01	0,41	-0,13	-0,04
5	Subhumedo muy frio	0,09	0,24	-0,12	0,64	0,18	-0,42
6	Semiarido moderadamente frio	0,05	-0,51	-0,64	-0,29	-0,56	-0,88
7	Seco frio	-0,14	-0,14	-0,48	0,37	-0,05	-0,69
8	Semiarido muy frio	0,02	0,38	-0,18	0,46	-0,14	-0,32
9	Arido templado frio	0,08	-0,31	-0,02	0,27	0,18	0,01
10	Arido moderadamente frio	0,03	0,06	-0,11	0,21	0,03	-0,26
11	Arido frio	-0,07	-0,15	-0,40	0,42	-0,37	-0,29

Tabla VII. Valores medios del cambio (%) en la frecuencia de eventos totales de sequía para el futuro cercano (2041-2060) y el futuro lejano (2081-2100) bajo tres escenarios de emisión de gases según las diferentes regiones climáticas de la provincia de Santa Cruz.

\*celdas en verde indican valor a más de 1 desvío estándar por debajo de la media aritmética; celdas en rojo indican más de 1 desvío estándar por encima de la media aritmética

ID	Region climatica	SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP5-8.5	
		2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100
1	Muy arido templado	0,06	-0,16	-0,07	0,07	0,08	0,05
2	Muy arido templado frio	0,10	-0,18	0,07	-0,04	-0,02	-0,03
3	Muy arido moderadamente frio	-0,05	-0,08	0,14	-0,08	0,10	-0,07
4	Muy arido frio	-0,08	0,02	0,16	-0,02	0,03	-0,14
5	Subhumedo muy frio	0,20	0,02	0,06	0,18	0,21	0,07
6	Semiarido moderadamente frio	0,02	-0,01	-0,02	0,13	0,13	-0,01
7	Seco frio	0,38	0,07	0,12	0,41	0,31	0,18
8	Semiarido muy frio	0,12	0,07	0,03	0,33	0,21	0,13
9	Arido templado frio	-0,07	-0,15	-0,14	-0,07	-0,17	-0,32
10	Arido moderadamente frio	-0,10	0,01	0,03	0,04	-0,09	0,03
11	Arido frio	0,03	0,07	0,03	0,08	0,24	-0,08

Tabla VIII. Valores medios del cambio (%) en la frecuencia de eventos extremos de sequía para el futuro cercano (2041-2060) y el futuro lejano (2081-2100) bajo tres escenarios de emisión de gases según las diferentes regiones climáticas de la provincia de Santa Cruz.

\*celdas en verde indican valor a más de 1 desvío estándar por debajo de la media aritmética; celdas en rojo indican más de 1 desvío estándar por encima de la media aritmética

ID	Region climatica	SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP5-8.5	
		2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100
1	Muy arido templado	-0,18	-0,53	-0,38	-0,34	0,02	-0,71
2	Muy arido templado frio	0,08	-0,23	-0,28	-0,06	-0,03	-0,22
3	Muy arido moderadamente frio	-0,21	0,06	-0,15	-0,17	0,16	0,13
4	Muy arido frio	0,03	0,13	0,12	-0,22	0,34	0,21
5	Subhumedo muy frio	-0,23	-0,19	0,43	-0,32	0,03	0,68
6	Semiarido moderadamente frio	0,15	0,45	0,61	0,31	0,40	0,99
7	Seco frio	-0,30	-0,47	0,30	-0,56	-0,31	0,27
8	Semiarido muy frio	0,24	0,24	0,60	-0,34	0,13	0,13
9	Arido templado frio	0,24	0,13	-0,31	-0,18	0,02	-0,17
10	Arido moderadamente frio	-0,17	0,08	-0,09	-0,05	0,23	0,20
11	Arido frio	-0,29	0,10	0,14	-0,36	0,20	-0,21

**Artículo en edición**

<https://doi.org/10.24215/1850468Xe035>

Tabla IX. Valores medios del cambio (%) en la duración media de los eventos de sequía para el futuro cercano (2041-2060) y el futuro lejano (2081-2100) bajo tres escenarios de emisión de gases según las diferentes regiones climáticas de la provincia de Santa Cruz.

*\*celdas en verde indican valor a más de 1 desvío estándar por debajo de la media aritmética; celdas en rojo indican más de 1 desvío estándar por encima de la media aritmética*

ID	Region climatica	SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP5-8.5	
		2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100	2041-2060	2081-2100
1	Muy arido templado	-0,20	0,43	-0,07	-0,18	0,14	0,90
2	Muy arido templado frio	0,03	0,40	0,34	-0,28	0,16	0,68
3	Muy arido moderadamente frio	0,45	-0,02	0,22	0,23	-0,11	0,24
4	Muy arido frio	-0,05	-0,23	-0,17	0,69	-0,51	-0,30
5	Subhumedo muy frio	0,04	0,31	-0,66	0,91	-0,01	-1,42
6	Semiarido moderadamente frio	-0,22	-1,04	-1,35	-0,78	-1,17	-2,20
7	Seco frio	-0,05	0,07	-1,00	0,81	0,04	-1,38
8	Semiarido muy frio	-0,29	0,32	-0,85	0,83	-0,35	-0,75
9	Arido templado frio	-0,13	-0,87	0,03	0,43	0,02	0,12
10	Arido moderadamente frio	0,14	0,04	-0,09	0,37	-0,16	-0,67
11	Arido frio	0,07	-0,25	-0,73	0,90	-0,83	-0,38

Tabla X. Valores medios del cambio (%) en la severidad media de los eventos de sequía para el futuro cercano (2041-2060) y el futuro lejano (2081-2100) bajo tres escenarios de emisión de gases según las diferentes regiones climáticas de la provincia de Santa Cruz.

*\*celdas en verde indican valor a más de 1 desvío estándar por debajo de la media aritmética; celdas en rojo indican más de 1 desvío estándar por encima de la media aritmética*