

Los cambios observados en el régimen de precipitación en la Patagonia Argentina

Observed changes in the rainfall regime in the Argentinean Patagonia

Victoria A. Oruezabal*

Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (FCEyN, UBA); Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CONICET-UBA); CNRS - IRD - CONICET – UBA; Instituto Franco-Argentino para el estudio del Clima y sus impactos (IRL 3351 IFAECI), Buenos Aires, Argentina.

Paula B. Martin

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET); Servicio de Hidrografía Naval, Ministerio de Defensa; Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires (FFyL UBA), Argentina

María Elizabeth Castañeda

Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (FCEyN, UBA); Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

Revista de la Facultad de Agronomía

Universidad Nacional de La Plata, Argentina

ISSN: 1669-9513

Periodicidad: Semestral

vol. 121, núm. 2, 2022

redaccion.revista@agro.unlp.edu.ar

Recepción: 31 Mayo 2022

Aprobación: 25 Octubre 2022

URL: <http://portal.amelica.org/amelii/journal/23/233665010/>

DOI: <https://doi.org/10.24215/16699513e114>

Autor de correspondencia: victoria.oruezabal@cima.fcen.uba.ar

Resumen

La Patagonia Argentina es una vasta y compleja región que se caracteriza por su clima árido y semiárido, y que se ha visto afectada por sequías cada vez más frecuentes en el tiempo, perjudicando así distintas actividades económicas del territorio. Por lo tanto, el agua es un recurso natural invaluable. El objetivo general de este trabajo es estudiar los cambios del régimen de precipitación y las tendencias existentes en la zona patagónica para lo cual se elaboró una climatología actualizada de la precipitación mensual registrada en estaciones para el periodo 1961-2020. A las distribuciones de frecuencias mensuales de precipitación observadas se ajustó la función de distribución Gamma. Al mismo tiempo, se realizó un análisis estadístico estudiando las tendencias y los ciclos característicos. Se encontraron tendencias negativas cada vez más intensas en la región cordillerana y positivas al sur de esta. Además, se encontraron oscilaciones de alrededor de tres años en la región costera y oscilaciones de 30 años al sur de la región.

Palabras clave: cono sur de América, lluvia, distribución Gamma, Oscilaciones, tendencias

Abstract

Argentinean Patagonia is a vast and complex region which is mainly characterized by its dry and arid climate. Lately, it has been affected by droughts more frequently, jeopardizing their main economic activities. Therefore, water is an invaluable resource. The general objective of this work is to study the changes of the precipitation regime and the existing trends. With this objective in mind a climatology was elaborated from the 1961-2020 period. The monthly frequency distribution was fitted to a Gamma distribution. Even further, a statistical analysis was made studying the trends and the characterized cycles. Negative trends were found to be more intense in the West region near the Cordillera. Although in the south positive trends were found. Even more, oscillations around a three-year period were found in the east region and a 30-year cycle was found in the south region.

Keywords: southern cone of America, rain, Gamma distribution, Wavelets, trends

INTRODUCCIÓN

En los últimos 25 años la región norte patagónica se ha visto afectada por sequías que han puesto en jaque el suministro de agua potable, el stock de ganado de cría ante la ausencia de campos con pasturas disponibles, el funcionamiento de las centrales hidroeléctricas y el abastecimiento del riego, en especial en la región del Alto Valle. Las nevadas en la Cordillera de los Andes en algunos casos no alcanzan para recuperar el caudal de los ríos de la región y mucho menos para los efectos de la falta de agua en la meseta rionegrina. Por otro lado, también se han percibido excesos hídricos que difícilmente han sido olvidados por los residentes. El clima de la región Patagónica Argentina se caracteriza por la extrema sequedad del aire, debido a la escasez de precipitaciones y a la excesiva evapotranspiración potencial como consecuencia de los intensos vientos. Estas condiciones convierten al agua en un recurso escaso. Sin embargo, los estudios sobre la precipitación en esta región no abundan, debido a la escasez de registros oficiales continuos y a la baja densidad de estaciones meteorológicas en la región. Para profundizar, se puede citar por ejemplo a Castañeda y González (2008), quienes describieron la climatología de la lluvia en la Patagonia Argentina y abordaron el problema de las tendencias.

Según la Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015), en la mayor parte de la Argentina se registró un aumento de temperatura de hasta medio grado entre 1960-2010. En particular, la temperatura mínima fue la que sufrió los mayores aumentos. La región patagónica fue la que experimentó el mayor aumento de temperatura, con regiones que llegaron a superar 1°C. Por otra parte, la precipitación media aumentó en casi todo el país. Los mayores cambios de precipitación se dieron hacia el este del país en regiones semiáridas, lo cual permitió la expansión de la región agrícola. Por el contrario, para la región de estudio se registró una disminución de la precipitación para el periodo 1960-2020, tendencia que generó riesgos en la producción frutihortícola propia de la región.

Una de las funciones más ampliamente difundidas para representar frecuencias de precipitación es la distribución Gamma de dos parámetros (Thom, 1958). Martin y Serio (2007) estudiaron la distribución de las precipitaciones en la región Patagónica Argentina en el período 1961-2000, mediante el ajuste de las distribuciones de frecuencias mensuales observadas a la función de distribución Gamma. Agosta et al. (2019) estudiaron la relación entre la precipitación diaria y la persistencia de la componente este del viento registrado a nivel de la estación, a lo largo de la costa atlántica Patagónica, asociada a las condiciones sinópticas y su relación con El Niño-Oscilación del Sur.

Varios autores han realizado trabajos sobre las tendencias o variaciones de baja frecuencia de la precipitación en Argentina señalando la presencia de variabilidades significativas durante el siglo pasado (Schwerdfeger y Vasino, 1954; Castañeda y Barros, 1994; Barros y Castañeda, 2000; Barros y Castañeda, 2001; Barros et al., 2008; Saurral et al., 2017). En gran parte del territorio las tendencias muestran totales anuales cada vez mayores (Castañeda y González, 2008).

Por otra parte, la aproximación de series de datos a sumas finitas de oscilaciones es ampliamente utilizada. Por un lado, se puede utilizar un espectro de frecuencia de manera tal de poder distribuir la varianza de una serie temporal sobre un dominio de longitudes de onda. Pero esta metodología tiene limitaciones en el aspecto temporal, ya que se promedia esta variable. Para ellos se utilizó la metodología de wavelets (Torrence y Campo, 1998), la cual es una herramienta común para analizar las variaciones localizadas de poder en el tiempo en una serie. A partir de descomponer una serie temporal en tiempo frecuencia y espacio. Varios autores han utilizado estas metodologías para estudiar los comportamientos de otras variables en la región (Barrancund et al., 2008) o para estudiar la precipitación en la región norte del país (Penalba y Vargas, 2004).

El objetivo de este trabajo es estudiar la distribución de las precipitaciones en la región patagónica Argentina durante las últimas décadas, mediante el ajuste de las distribuciones de frecuencias mensuales observadas a la función de distribución Gamma. Por otro lado, se pretende estudiar los cambios en el régimen de la precipitación analizando la existencia de ciclos y tendencias.

METODOLOGÍA

Para describir la distribución de la precipitación en la región se utilizó la función Gamma, en particular se estudiaron sus parámetros asociados para describir el comportamiento de la precipitación. Junto con los métodos estadísticos para estudiar la ciclicidad y las tendencias de la región de estudio.

DATOS

Inicialmente vamos a definir el área de estudio a la región continental perteneciente a la República Argentina comprendida entre los paralelos 38°S y 55°S. Esta región se comprende del sur de la provincia de Buenos Aires y las provincias de Neuquén, Chubut, Santa Cruz y Tierra del Fuego e islas del Atlántico Sur en su totalidad. Bajo esta delimitación se buscó la mayor parte de estaciones meteorológicas que pertenezcan a la región.

La información meteorológica utilizada en este trabajo corresponde a valores mensuales de precipitación en 21 estaciones provenientes de la red de medición del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y 2 estaciones pertenecientes a la Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los Ríos Limay, Neuquén y Negro (AIC). Se tomó un período común de referencia entre 1961-2020. Debido al déficit de estaciones en la región y estaciones con períodos menores se tomaron dos subperíodos para una mejor comprensión de las variaciones de la precipitación mensual en la zona de estudio. Estos períodos fueron 1981-2020 y 1991-2020. En la Tabla 1 se presenta el listado de las estaciones utilizadas con sus correspondientes coordenadas geográficas. Todas las estaciones seleccionadas tienen 5% o menos de los datos de precipitaciones mensuales faltantes y la calidad de los datos se ha comprobado cuidadosamente.

Tabla 1
Estaciones utilizadas junto a sus periodos disponibles

Estación	Longitud	Latitud	Año
Bahía Blanca	-62.16	-38.71	1961-2020
Bariloche	-71.16	-41.15	1961-2020
Comodoro Rivadavia	-67.46	-45.79	1961-2020
El Calafate	-72.05	-50.28	1961-2020
Esquel	-71.15	-42.91	1961-2020
Gobernador Gregores	-70.16	-48.78	1961-2020
Maquinchao	-68.71	-41.24	1961-2020
Neuquén	-68.14	-38.95	1961-2020
Paso de Indios	-69.05	-43.86	1961-2020
Perito Moreno	-70.99	-46.54	1961-2020
Puerto Deseado	-65.91	-47.73	1961-2020
Puerto Madryn	-65.10	-42.76	1961-2020
Río Gallegos	-69.31	-51.61	1961-2020
Río Grande	-67.76	-53.78	1961-2020
San Antonio Oeste	-65.03	-40.76	1961-2020
San Julián	-67.80	-49.31	1961-2020
Trelew	-65.28	-43.21	1961-2020
Ushuaia	-68.30	-54.84	1961-2020
Viedma	-63.01	-40.86	1961-2020
El Bolsón	-71.53	-41.95	1981-2020
Villa la Angostura Segurel	-71.66	-40.78	1981-2020
Rahue	-70.93	-39.37	1981-2020
Chapelco	-71.14	-40.08	1991-2020

Para el primer periodo (1981-2020) se agregan las estaciones El Bolsón, Rahue, Villa la Angostura Segurel, que aportan información a una zona de pocas estaciones pero que no contaba con un registro tan extenso. Por otra parte, para el último periodo (1991-2020) se agrega la estación Chapelco, la cual, agrega información de la cordillera sur. El objetivo es comparar cuánto cambia la distribución tomando este periodo.

DISTRIBUCIÓN GAMMA

En primer lugar, se debe seleccionar una función de densidad de probabilidad que se ajuste a la distribución de frecuencias de las precipitaciones observadas. Para ello, es óptima la utilización de

distribuciones estadísticas paramétricas (Ison et al., 1971; Woolhiser, 1992). Debido a la natural variabilidad de las precipitaciones y a su distribución asimétrica respecto de los valores medios, es que la distribución de frecuencias requiere ser aproximada mediante funciones teóricas distintas de la normal o de Gauss. La función de distribución Gamma (Thom, 1958) es la más comúnmente utilizada con estos fines. Dado que la función Gamma está definida sólo para valores estrictamente mayores que cero, en el algoritmo de cálculo se incorporó la condición de reemplazar los valores nulos por 0,01 mm. La elección de este valor no fue arbitraria, ya que en los registros de precipitación se considera nulo cualquier valor inferior a 0,1 mm. Este algoritmo ha sido aplicado en trabajos previos (Serio y Murphy, 2006; Serio et al., 2007).

La muestra con la cual se está realizando el análisis (datos mensuales de precipitación de 1961-2020) es lo suficientemente extensa para ajustar la información a una distribución estadística, para lo cual, se debe elegir una distribución estadística apropiada. Varios autores han utilizado la distribución Gamma para describir la precipitación tanto para la región como para el resto del mundo (Husak et al., 2007; Volkova et al., 2014, Serio et al., 2010, Penalba y Rivera, 2012, Ison et al., 1971). La distribución Gamma es frecuentemente utilizada para representar la precipitación debido a que provee una flexible representación de una variedad de distribuciones utilizando solamente dos parámetros: el parámetro de forma α y el parámetro de escala β .

Una de las principales ventajas del uso de la distribución Gamma es que está definida únicamente para valores positivos, lo cual es aplicable a este caso, ya que no existe la precipitación negativa. Por otro lado, esta distribución está sesgada positivamente, la cola de la distribución está extendida hacia los valores positivos (derecha). Esto resulta útil ya que imita la distribución empírica de precipitación para áreas donde hay una posibilidad distinta de cero de precipitación extremadamente alta, a pesar de que típicamente la precipitación no sea elevada. Finalmente, este ajuste ofrece una enorme flexibilidad en la forma de la función de distribución. Esto permite que una distribución pueda ajustarse a cualquier tipo de regímenes de precipitación con una precisión considerable. (Husak et al., 2007; Wilks, 2006)

Para el ajuste de la distribución de frecuencia de la precipitación se utilizó la función Gamma de forma mensual (Thom, 1958). La frecuencia de distribución se define como:

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \quad \#1$$

donde α y β son las constantes a ser ajustadas, llamados respectivamente parámetros de forma y escala. Estos parámetros fueron obtenidos mediante el método de máxima verosimilitud. Mientras que la función Gamma, dada por:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad \#2$$

Para evaluar el ajuste, se utilizó un test de bondad de ajuste para ver cuán adecuada es la función Gamma para representar la precipitación del área. Para ellos se decidió utilizar una prueba no paramétrica, ya que no sería idóneo asumir la normalidad de la variable. Recientemente, algunos autores (Penalba y Rivera, 2012) utilizaron el test de Anderson-Darling, el cual es un test asintótico no paramétrico, que no utiliza agrupamientos, para así ser más sensible a las diferencias de las colas. Esta característica vuelve a este test ventajoso sobre otras pruebas no paramétricas como, Kolmorov-Smirnov. (Anderson y Darling, 1954). Con una confianza del 95%, se testeó la distribución Gamma de cada mes, para cada estación y para los tres períodos. Finalmente, más del 95 % de las estaciones resultaron significativas bajo esta metodología con una significancia del 95 %.

TENDENCIAS

LINEALES Y NO LINEALES

El coeficiente de correlación de Pearson se puede utilizar para resumir la relación lineal entre dos muestras de datos. Una forma de expresarlo es como el cociente entre la covarianza de las muestras con el producto de la desviación estándar de cada muestra de datos.

La regresión lineal simple busca resumir la relación entre dos variables por una simple línea recta. Este procedimiento se hace con el fin de elegir la recta con menor error de predicción en y dado cierto

x. Usualmente, se entiende como el mínimo error, a la mínima suma de los errores cuadrados. Adoptar este criterio resulta en que el proceso de aproximación a la recta sea más tolerante a pequeñas discrepancias. Sin embargo, se ajustará a grandes discrepancias, haciéndolo así débil a los "outliers".

Para evaluar el test de correlación de Pearson se utiliza un test Normal o t de Student en función de la cantidad de datos. Donde se plantea como hipótesis nula que la muestra pertenece a una población de coeficiente de correlación nulo. El objetivo es rechazar la hipótesis nula para probar que hay una tendencia lineal (Wilks, 2006).

Para complementar el análisis de las tendencias se utilizó el coeficiente de correlación de rango de Kendall, comúnmente conocido como coeficiente τ de Kendall. De aquí deriva un test robusto, no paramétrico y alternativo al coeficiente de correlación de Pearson. Este estadístico evalúa la variabilidad conjunta de los datos y no depende de una distribución teórica. Se calcula considerando las relaciones de todas las posibles combinaciones de pares de datos (x_i, y_i) , de las cuales hay $n(n-1)/2$ combinaciones posibles en una muestra de tamaño n (Wilks, 2006). En el caso que dos pares tengan miembros mayores a su contraparte, estos pares se llaman concordantes. Los casos donde cada par tiene un miembro mayor a su contraparte de diferentes muestras se lo llaman discordante. El estadístico se calcula restando los concordantes de los discordantes y dividiéndolo por la máxima combinatoria. El objetivo es ver si los datos varían de forma similar sin la necesidad de ajustarlo a una distribución teórica.

Al igual que en el coeficiente de correlación de Pearson, los valores de τ varían entre -1 y 1, una correlación positiva entre x e y se corresponde con un coeficiente τ positivo y es inverso para una correlación negativa y si τ es cero, se considera que la correlación es nula.

Para evaluar el test de correlación de Kendall se utiliza un test Normal o t de Student en función de la cantidad de datos. Donde se plantea como hipótesis nula que la muestra pertenece a una población de coeficiente de correlación nulo. El objetivo es rechazar la hipótesis nula para probar que hay una correlación.

TENDENCIAS PARCIALES

Las tendencias lineales son el ajuste más directo al comportamiento de una serie temporal. Sin embargo, las series temporales pueden contener otras características como periodicidades o cambios localizados en las tendencias. Según Karl et al., (2000) las tendencias lineales no son suficientes para detectar comportamiento de baja frecuencia. Tomé y Miranda (2005) proponen un análisis simple no lineal para estudiar una serie temporal que consiste en ajustar los datos como un conjunto de segmentos lineales, donde el número de segmentos se optimiza a partir de un método numérico.

Considerando una serie temporal de n elementos $i=1\dots n$, el objetivo es ajustar, utilizando cuadrados mínimos, un número desconocido de segmentos lineales continuos. La solución trivial es ajustarlo a una única recta, pero no es el objetivo de la metodología. Para tomar más de una recta se debe imponer otra condición. Entonces, se le impondrá una cantidad de datos para cada segmento lineal. Sean $m + 1$ el número de segmentos, entonces m es la cantidad de quiebres observados en la serie. El objetivo principal es conseguir el mejor ajuste en función de las funciones lineales.

$$y(t_i) = c + \sum_{k=0}^{m-1} (b_k - b_{k+1})T_k + b_m + 1^{t_i} \quad \#3$$

m es elegido de manera tal: $m=0, \dots, m$ y T_i punto de datos pertenece a $T_m < t_i < T_{m+1}$ de la serie temporal. La incógnita más importante que descifrar es el valor de m , o sea, la cantidad de quiebres que se encuentran en la serie temporal. Luego de despejar m la función 3 tiene $2m+2$ incógnitas: el tiempo m de la posición de los quiebres T_m , los $m+1$ pendientes de los segmentos b_k y la ordenada al origen C . La función no lineal 3, se linealiza al imponer la cantidad de quiebres. En ese caso, el problema del ajuste puede ser considerado como un sistema lineal sobre determinado del tipo:

$$|y - As| \quad \#4$$

Donde s es una matriz solución de $m+2$ elementos, $s = [b_1, b_2, \dots, b_m, b_{m+1}, c]$ y A es un coeficiente constante $[n \times m+2]$

La solución del sistema no lineal puede ser obtenida resolviendo el problema lineal, ecuación 4, para todos los posibles valores de las posiciones de los quiebres y finalmente, tomando la solución que minimice la suma de los cuadrados. La desventaja de esta simplificación es que la cantidad de los sistemas lineales a resolver crece exponencialmente, haciendo esta metodología inútil para series temporales extensas. Para estos casos, la solución es computacionalmente muy costosa.

Una solución para este problema es limitar la cantidad de quiebres. Limitando los quiebres y la distancia mínima entre ellos se reduce sustancialmente la cantidad de ocasiones que el sistema 4 tiene que ser resuelto.

Los autores de la metodología propuesta han dejado un programa de código abierto para aplicar la misma. El mínimo intervalo entre 2 quiebres consecutivos es un parámetro libre para el método. Este intervalo funciona como filtro. Aunque el tamaño es personalizable, es deseable que los puntos de quiebre estén lo suficientemente separados para no incurrir en tendencias propias de la variabilidad de la serie.

Utilizando la metodología y el software anteriormente descritos, se obtuvieron los años de quiebres de las tendencias y cómo las tendencias cambiaron en la región. Para la ejecución del software se tomaron en cuenta 1) y 2)

1) Ajustar la cantidad de quiebres buscados, a uno único.

2) Que la distancia mínima entre los quiebres sea de 15 (quince) datos. Un periodo de más de un año, para que el software no confunda el ciclo anual con una tendencia.

Se analizaron todas las estaciones del periodo 1961-2020, a excepción de Puerto Madryn que presenta 3 años de datos faltantes. En el control de calidad los datos faltantes fueron completados con la media mensual. Esta metodología de completado afecta a los resultados de las tendencias parciales.

ANÁLISIS ESPECTRAL

Hay un número de factores diferentes que pueden afectar una serie temporal. Para poder hacer predicciones se debe explorar cualquier forma regular que puede ser encontrada en los datos, como tendencias, o ciclos y correlaciones entre los datos.

Para tratar el problema de evaluar la no-aleatoriedad en las series temporales se utiliza el espectro de potencia. El análisis de espectro de potencia, también conocido como análisis armónico generalizado, está basado en la premisa de que las series temporales no están necesariamente compuestas de un número finito de oscilaciones, cada una con una longitud de onda discreta (como se supone tácitamente cuando aplica el análisis armónico clásico), sino más bien que consisten en virtualmente infinitos números de pequeñas oscilaciones ligando una distribución continua de longitudes de onda. Entonces, el espectro produce una medida de la distribución de varianza en una serie temporal sobre un dominio continuo de todas las posibles longitudes de onda, cada una arbitrariamente cerca a la siguiente, desde una longitud de onda infinita (tendencia lineal) a la longitud de onda más corta que puede ser resuelta por cualquier esquema de análisis armónico (igual a dos veces el intervalo entre sucesivas observaciones en las series).

Los procedimientos para computar el espectro de potencia varían, pero para la mayor parte ellos siguen las aproximaciones desarrolladas por Tukey (1950) y Blackman y Tukey (1958).

Para evaluarla estadísticamente se plantea un test de Anderson. Como hipótesis nula se consideró que coeficientes de correlación de la serie viene de una población con un coeficiente de correlación igual a cero, en otras palabras, la serie tiene persistencia. Con una hipótesis alternativa, donde el coeficiente de correlación no viene de una población con coeficiente de correlación igual a cero. Nuestro objetivo es descartar la hipótesis nula y encontrar alguna persistencia en la serie.

WAVELETS

El análisis de Wavelets es una herramienta común para analizar las variaciones localizadas de poder en el tiempo en una serie. A partir de descomponer una serie temporal en tiempo frecuencia y espacio.

La transformada de Wavelet puede ser usada para analizar una serie temporal que contiene poder no estacionario en diferentes frecuencias. Asume, además, que existe una serie temporal x_n , con un espaciado igual t y $n=0 \dots N-1$. Finalmente, asume que existe una función (n) que depende en un parámetro bidimensional n . Para ser admisible como tal, la función debe tener una media cero y está localizada tanto en tiempo como en frecuencia. La transformada de Wavelet descompone una señal $x(t)$ en funciones elementales (n) donde se puede generar una familia de funciones con las mismas propiedades mediante traslaciones t y dilataciones (s) . De esta manera genera bloques de información de escala y tiempo. De esta forma la transformada puede dilatarse y trasladarse en

tiempo y frecuencia. Lo que permitirá ver cambios en el dominio tiempo frecuencia (Torrence y Compo, 1998).

RESULTADOS

DISTRIBUCIÓN GAMMA

La Figura 1 muestra la distribución espacial de los parámetros de forma y escala respectivamente para la función Gamma, para los meses de enero, abril, julio y octubre, donde cada mes representa a cada una de las estaciones del año. El parámetro de escala (Figura 1 A) en enero presenta los mínimos valores en la región central de la Patagonia, los máximos en Tierra del Fuego y al sur de Buenos Aires. Mientras que para el mes de diciembre (figura no presentada) este patrón se invierte, con mínimos en estas regiones y un máximo en la cordillera.

El parámetro de forma (Figura 1 B) tiene un comportamiento latitudinal, para los meses de enero, abril y octubre los máximos se encuentran por encima de los 46°, siendo el mes de abril el que presentan los valores absolutos. Mientras que julio tiene una distribución homogénea en general, con máximos en la cordillera y al sur de Buenos Aires. El parámetro de escala permite ver cuán amplia es la distribución, en este caso se aprecia que en las estaciones que aumenta la precipitación, aumenta su parámetro beta, por lo cual se amplía la distribución. Se aplicó la misma metodología a los otros periodos encontrando resultados similares. Se aprecia un aumento tanto de alpha y beta en los meses invernales en la región del noroeste patagónico.

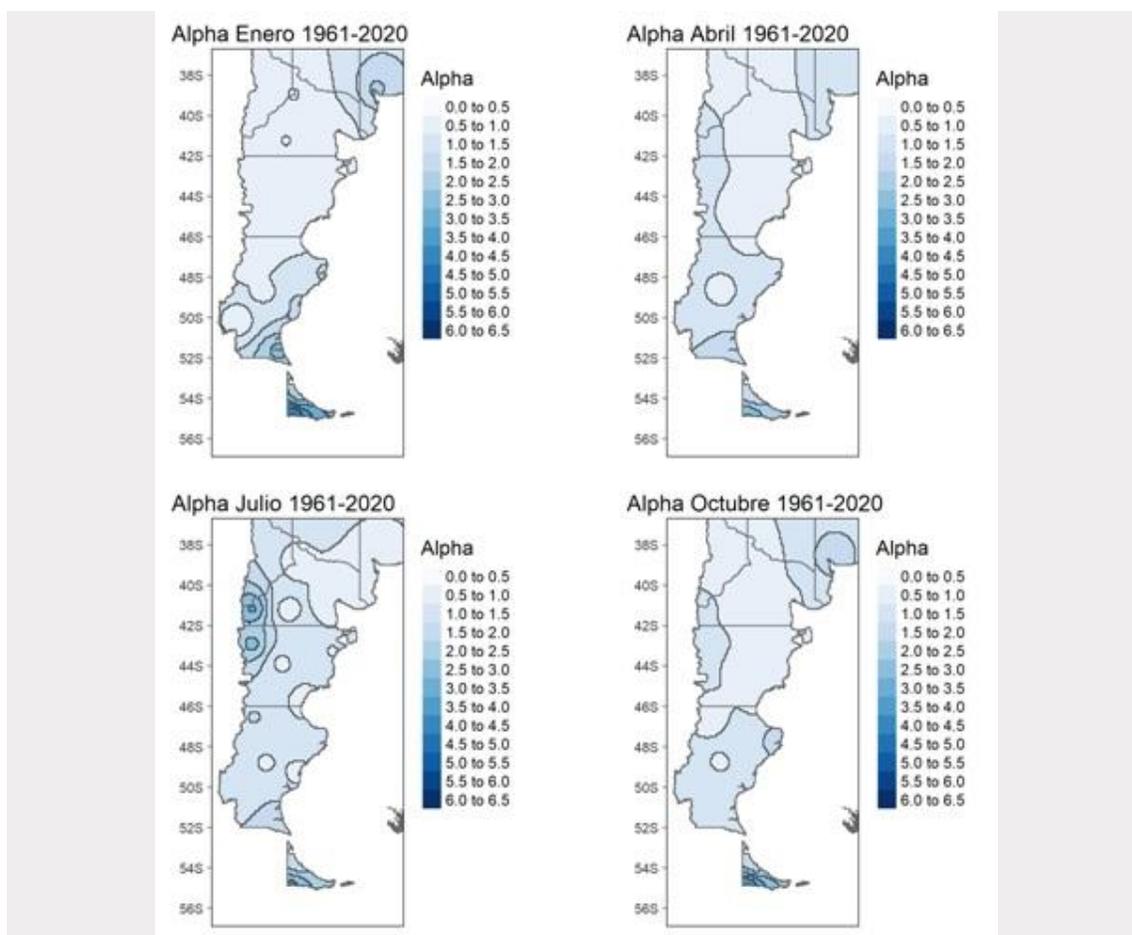


Figura 1. A

Distribución espacial del parámetro de escala α de la distribución Gamma ajustada para enero abril (Panel superior) julio y octubre (Panel inferior) para el periodo 1961-2020.

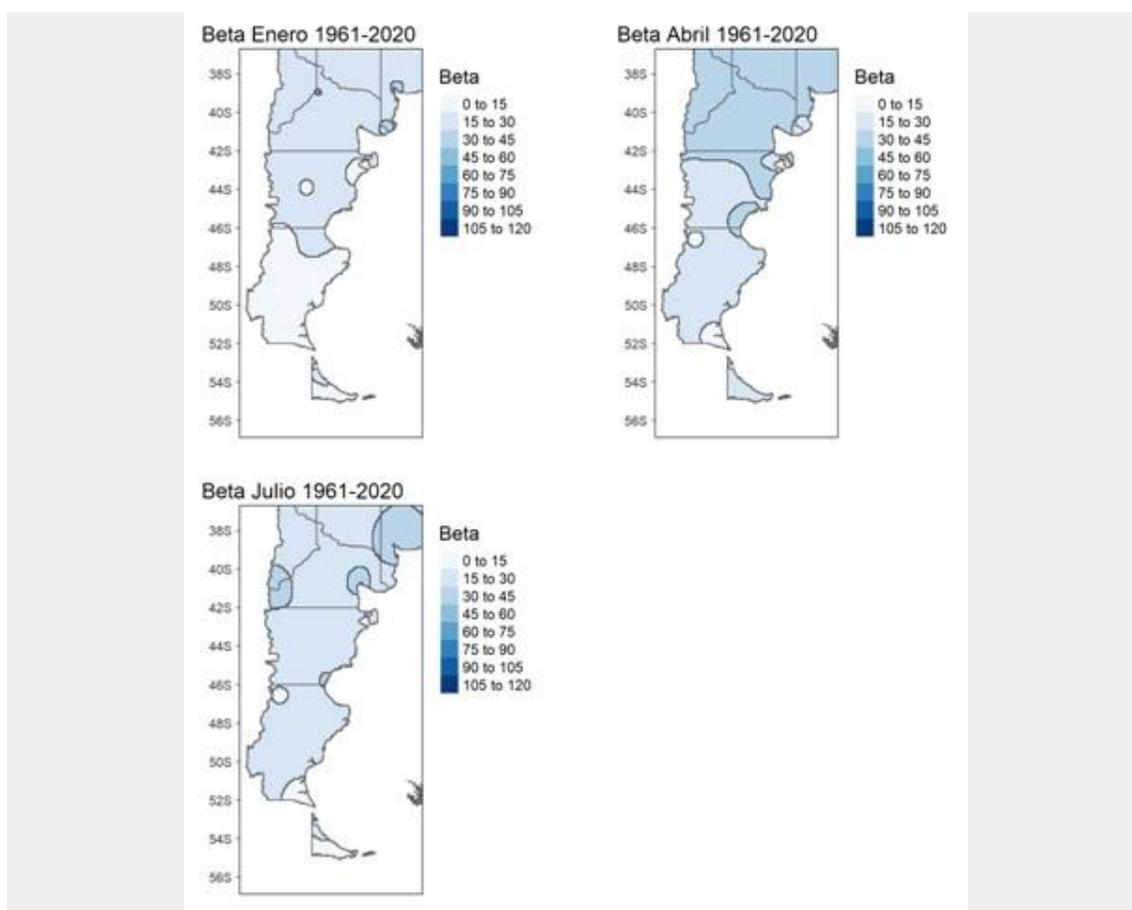


Figura 1. B

Distribución espacial del parámetro de escala β de la distribución Gamma ajustada para enero, abril (Panel superior), julio y octubre (Panel inferior) para el periodo 1961-2020.

De manera general, α y β , mantienen sus patrones a lo largo de los periodos.

En la Figura 2 se aprecian los campos del parámetro α para el mes de agosto. Los meses que presentan las diferencias entre periodos son junio, julio y agosto (los primeros dos no son presentados), donde aumenta considerablemente el gradiente horizontal. Se aprecia un aumento de α hacia el noroeste de región, aumentando con cada periodo. En la Figura 3 se presentan los parámetros de β para el mes de Mayo. La variación de β es similar a la de α , pero, las máximas diferencias se observan en los meses de Mayo, junio y julio (los últimos dos no presentados) con máximos en este último.

TENDENCIA

Con el objetivo de ver las tendencias de la precipitación para los periodos estudiados se realizó un ajuste lineal bajo el método de Pearson. Este ajuste lineal

fue testeado con un test Normal con un 95% de confianza. Para el periodo de 1961-2020 (Figura 4 A) se observan tendencias negativas en la región de la cordillera y se extiende hacia el centro en la provincia de Santa Cruz. Al sur de la misma provincia se encuentran pequeñas tendencias positivas. El periodo 1981-2020 (Figura 4 B), abarca una menor expansión territorial, se conservan las tendencias negativas en Santa Cruz y las tendencias positivas en Tierra del Fuego. Finalmente, para el periodo 1991-2020 (Figura 4 C) se encuentran tendencias positivas al sur de Santa Cruz y al norte de Tierra del Fuego. A su vez, se presentan tendencias negativas en la zona oeste de la provincia de Santa Cruz y en el centro de Chubut.

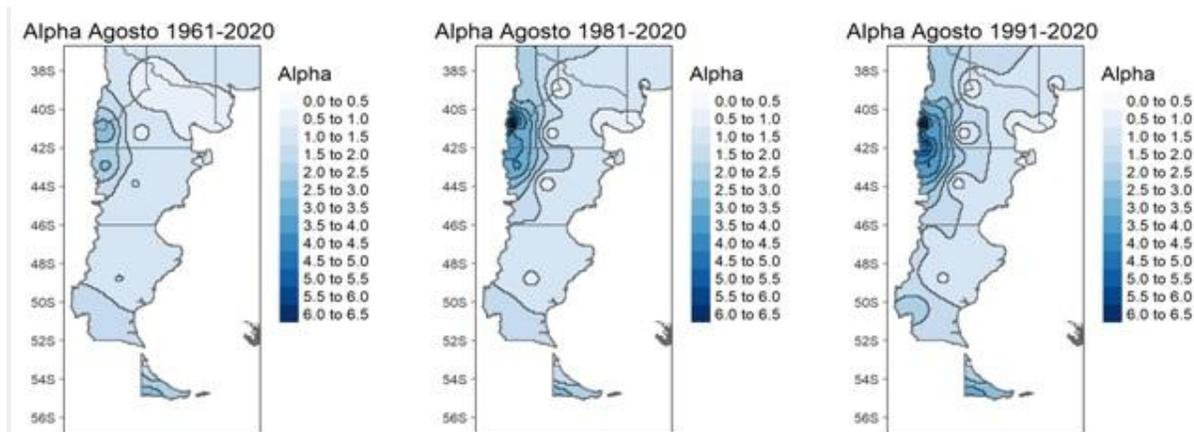


Figura 2

Distribución espacial del parámetro de forma α de la distribución Gamma ajustada para el agosto para los periodos 1961-2020,1981-2020,1991-2020. Se consideran los intervalos como cerrados para su menor valor y abiertos para el máximo.

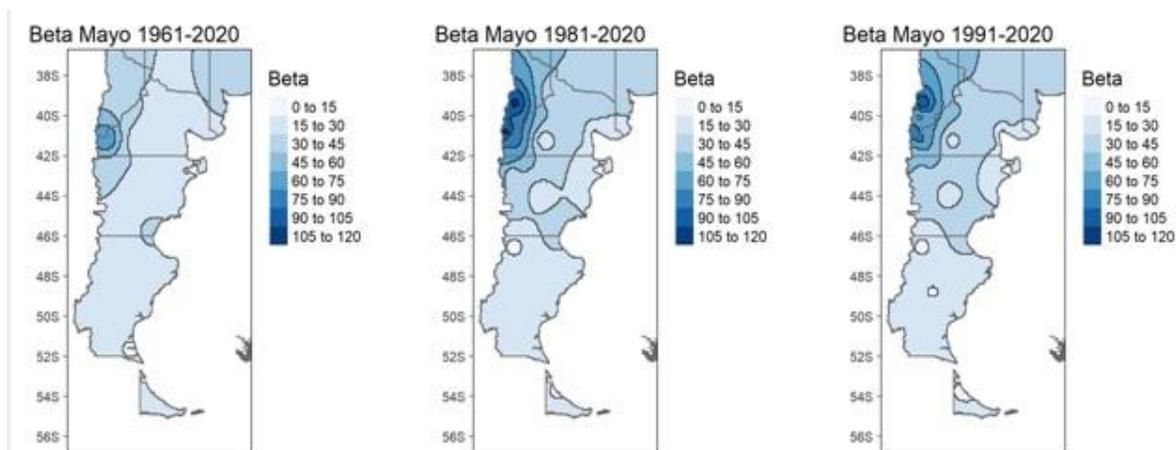


Figura 3

Distribución espacial del parámetro de escala β de la distribución Gamma ajustada para el mes de mayo para los periodos 1961-2020,1981-2020,1991-2020. Se consideran los intervalos como cerrados para su menor valor y abiertos para el máximo.

En la Figura 5 se muestran las pendientes de la precipitación bajo el método de Pearson. El patrón, como ya se vio, se mantiene a lo largo de los periodos, pero se muestra una clara intensificación de las precipitaciones a medida que se avanza hacia el presente. La región noroeste patagónica muestra ser la más afectada con tendencias que se vuelven cada vez más negativas. La provincia de Buenos Aires presenta un comportamiento similar. Pero aún no demuestra significancia estadística. Mientras tanto, se aprecia el comportamiento inverso en la zona sur de Santa Cruz y Norte de Tierra del Fuego.

Para realizar una comparación con las tendencias lineales se calcularon las tendencias no lineales bajo el método de Kendall (Kendall, 1938), con un 95% de confianza. Los resultados fueron uniformes, las tendencias no lineales se encuentran en las mismas regiones que las ya analizadas, pero abarcan mayor cantidad del territorio que las ya analizadas. Para todos los periodos se extienden más hacia el norte de la región.

Bajo el método de Kendall se observa consistencia con las tendencias lineales obtenidas. Así también, se aprecia cómo de forma constante se observa una disminución en la precipitación en el sur de la cordillera.

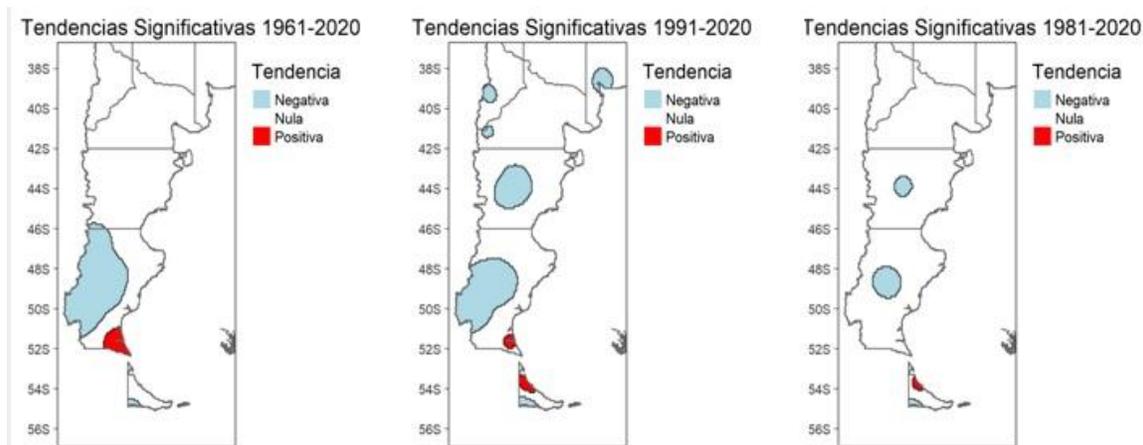


Figura 4

Mapa de las tendencias lineales de precipitación anual bajo el método de Pearson con un 95% de significancia. Para los periodos: 1961-2020, 1981-2020 y 1991-2020. Se consideran los intervalos como cerrados para su menor valor y abiertos para el máximo.

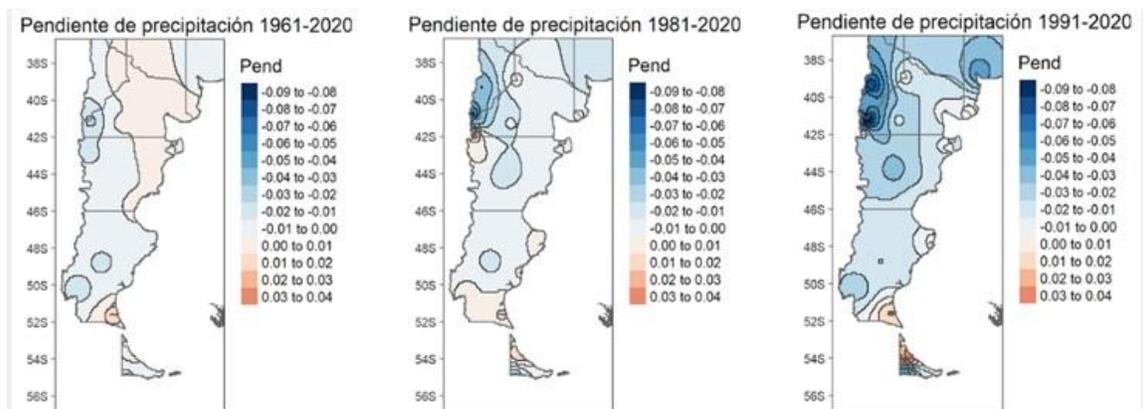


Figura 5

Mapa de las pendientes lineales de precipitación anual bajo el método de Pearson para los periodos 1961-2020, 1981-2020, 1991-2020. Se consideran los intervalos como cerrados para su menor valor y abiertos para el máximo.

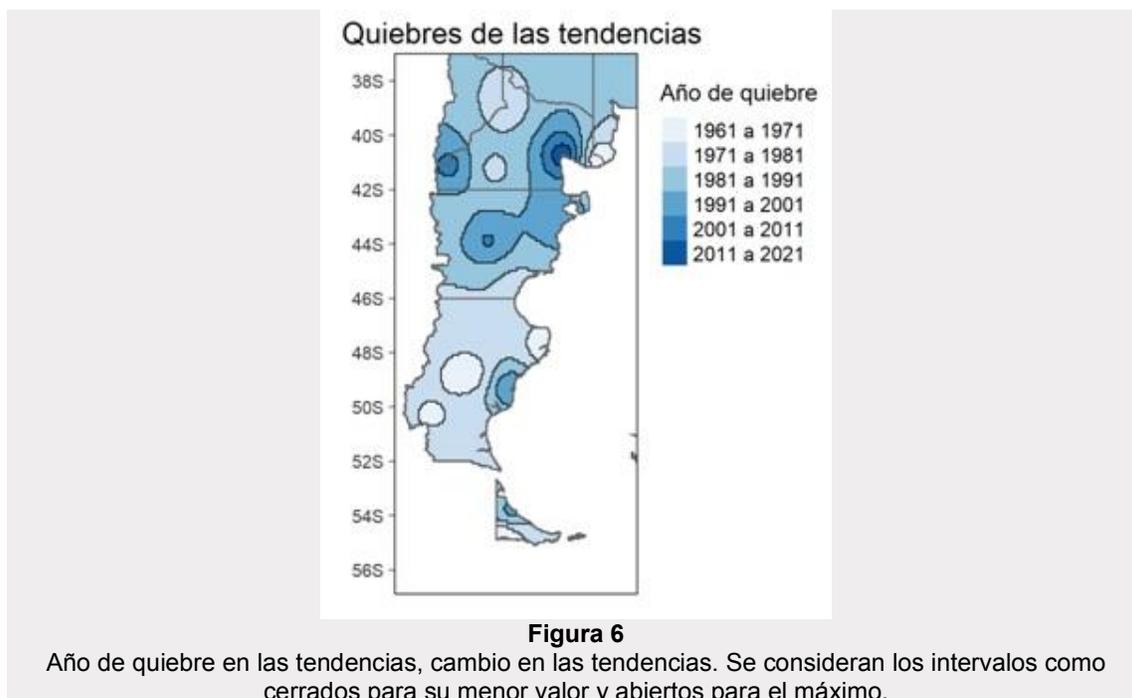
TENDENCIAS PARCIALES

Todas las estaciones presentaron 1(un) único quiebre, a excepción de Bahía Blanca que no presentó ninguno.

En la Figura 7 se muestran cómo cambian las tendencias en cada estación y una interpolación de los años de quiebre en las mismas. Los años de quiebre tienen un patrón latitudinal y longitudinal, al norte de la provincia de Santa Cruz se encuentran los quiebres más actuales alrededor de los años

1990 y 2000, mientras que al sur se encuentran quiebres alrededor de los años 1970. Al mismo tiempo, en la costa atlántica se encuentran los quiebres más actuales, alrededor de los años 2000.

En lo que respecta al cambio de las tendencias, el comportamiento más representativo de la región son tendencias positivas en el primer periodo, seguidas por una tendencia negativa para el siguiente periodo.



ANÁLISIS ESPECTRAL Y WAVELETS

Para realizar un análisis de los ciclos se estudiaron en conjunto un análisis espectral y de wavelets para estudiar los ciclos predominantes y su perdurabilidad en el tiempo. Se puede observar que el periodo que presenta la mayor parte de la varianza explica es el ciclo anual. Todas las estaciones mostraron un ciclo anual marcado en la precipitación, Bariloche, Bahía Blanca son ejemplos de estaciones que la única frecuencia significativa está ligada al ciclo anual. Para analizar los otros ciclos, se filtró el ciclo anual para ver la importancia de las otras frecuencias sin la intervención del ciclo anual. Con esta información, se encuentran varias estaciones que además de presentar un ciclo anual presentan otras periodicidades. Estaciones como San Julián y Maquinchao muestran mucho ruido en menores frecuencias, en ciclos que representan unos pocos meses y un ciclo mayor de cada 20 años. Por otro lado, San Julián, Puerto Madryn y Puerto Deseado tienen un ciclo marcado cada aproximadamente

3 años. Finalmente, estaciones al sur de la región como Ushuaia, Gobernador Gregores y Río Grande tienen el ciclo más grande de todos de alrededor de 30 años. Se observa que el ciclo de 3 años es propio de las estaciones costeras y el ciclo de 30 años se encuentra al sur de la región. El ciclo de 20 años se da en 2 estaciones que no son cercanas entre sí.

Finalmente, para concluir con los ciclos se realizó un análisis de Wavelets que permite ver la permanencia de los distintos ciclos en el tiempo. En la Figura 7 se observan los análisis de Wavelets para las mismas estaciones que se vienen analizando. Se puede apreciar que en el caso de Bariloche el ciclo anual tiene una permanencia fuerte en el tiempo con una pequeña baja alrededor del año 2010. Mientras que para las otras estaciones en este periodo no presenta una permanencia tan intensa, a pesar de que se probó su significancia estadística. De manera inversa, se aprecia que el ciclo de 20 años es intenso desde los años 1970. Mientras que el ciclo de 30 años se aprecia recién en los últimos 30 años.

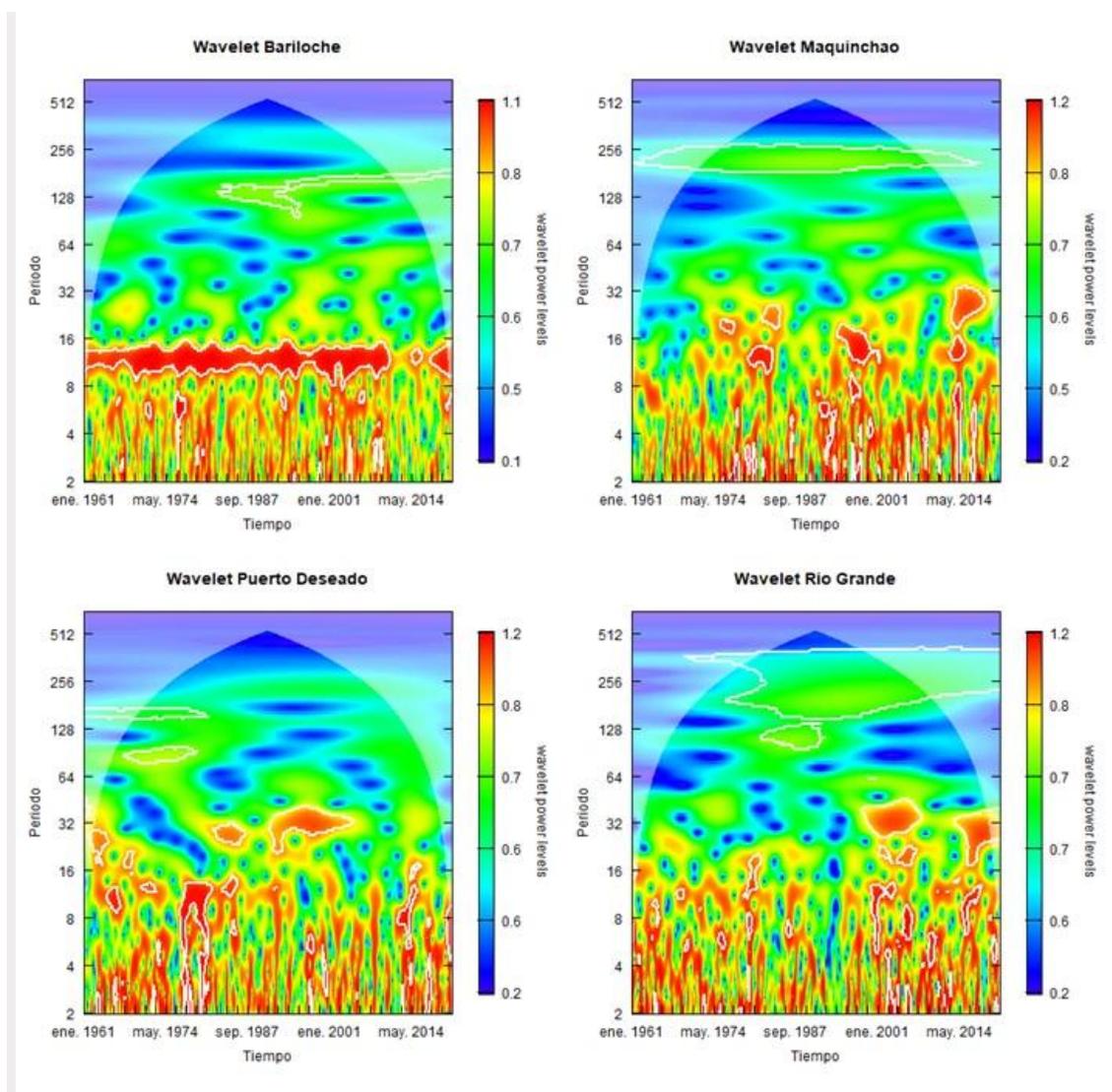


Figura 7
Espectro de Wavelets en función del tiempo y el periodo de las estaciones: Bariloche, Maquinchao, Puerto Deseado y Rio Grande.

DISCUSIÓN

DISTRIBUCIÓN GAMMA

Luego del análisis de los parámetros alpha y beta, se debe tener en cuenta los siguiente: el parámetro alpha puede apreciarse en la función de distribución como el sesgo de esta, mientras mayor es el parámetro, menor es el sesgo. En particular mientras mayor sea alpha, son regiones con distribuciones con mayor similitud a una distribución normal (Canavos, 1988). Por lo tanto, las regiones donde se encuentran los mayores valores de alpha (Tierra del fuego en el verano, la zona norte cordillerana, así como las regiones descritas en resultados) en sus respectivos meses tienen sus máximos de similitud con la distribución normal.

Por otra parte, el parámetro beta representa la variabilidad propia de la distribución. Mientras mayor sea el parámetro en cuestión, mayores serán los valores posibles de la distribución, pero menores serán las probabilidades de ocurrencia de cada uno de ellos. Evidentemente, donde se halle los mayores valores de beta (usualmente al norte de la región) se encontrarán distribuciones que se extienden más.

Anteriormente, Martin y Serio (2007) estudiaron la distribución de los parámetros alpha y beta para la región patagónica para el periodo 1961-2000. Donde se obtuvieron resultados similares en la distribución de los parámetros. Sin embargo, los valores calculados para este periodo menor dan parámetros de alpha y beta menores a los hallados para los últimos 60 años.

TENDENCIAS

Tras el estudio de las tendencias en sus diferentes expresiones matemáticas, se notó lo siguiente: primero una tendencia negativa en la provincia de Santa Cruz (su alcance geográfico depende del periodo a analizar) y una tendencia positiva en Tierra del Fuego y sur de Santa Cruz. Tanto para tendencias lineales y no lineales.

Anteriormente, otras investigaciones han arrojado resultados similares a los encontrados en este trabajo. El estudio de las tendencias en la región ha sido estudiado por diversos autores. Castañeda y Barros (1994) ya habían calculado las tendencias para el periodo 1916-1991. El estudio no presenta una vasta cantidad de estaciones de la región. De cualquier manera, ya se observan al sur de la provincia de Santa Cruz tendencias positivas en la precipitación. Mientras que la región de la cordillera no es estudiada. Posteriormente Minetti y Vargas (1997), encontraron tendencias positivas de la precipitación en la región andina. Entre los años 1930-1960, oponiéndose a los resultados que se encontraron en este trabajo para los periodos posteriores. Sin embargo, los autores responsabilizan de esta tendencia al incremento de la actividad anticiclónica. Más recientemente, Castañeda y González (2008) analizaron las tendencias lineales para el periodo 1950-1999 a partir de una base de datos del UDEL (Universidad de Delaware), donde se encontraron tendencias positivas al sur de la provincia de Santa Cruz y al norte de la región patagónica, por otro lado, se encontraron tendencias negativas en la región andina, resultados similares a los ya analizados.

Por otro lado, el análisis de los quiebres llevó a resultados en algunos puntos similares al realizado con el mismo método por Castañeda y González (2008) para el periodo 1950-1999. Se encuentran resultados similares en la región centro-norte donde en la década de 1970 se concentran la mayor cantidad de quiebres. Y una expansión hacia el sur donde los quiebres se dan en la década de 1960. Por otro lado, la región costera tiene quiebres en la década de 1990 mientras que con un período más extendido se aprecian luego del año 2000.

WAVELETS

Utilizando esta metodología, se puede apreciar que todas las estaciones presentan un marcado ciclo anual. Bariloche, es de las estaciones que más permanencia temporal presenta con un ciclo. De cualquier forma, el resto de las estaciones no presentan una fuerte permanencia, pero muestran significancia estadística. Otros ciclos presentan permanencia en años puntuales. Sea el ciclo de 20 años (alrededor del 1970) o el de 30 años (alrededor de los últimos 30 años).

CONCLUSIONES

Se estudiaron las condiciones climatológicas del periodo 1961-2020 para la región patagónica. Además, se le aplicó un tratamiento estadístico, para evaluar: tendencias sean lineales, no-lineales o parciales; periodicidades con el espectro de frecuencias y el gráfico de wavelets.

La precipitación en la región es eficazmente representada por la función Gamma, demostrando un marcado comportamiento estacional. El parámetro de forma tiene una variación tanto del tipo latitudinal como longitudinal, mientras que el parámetro de escala tiene una variación prácticamente latitudinal. Estudios previos, muestran menores valores en lo que respecta al parámetro de escala, como los estudios fueron hechos para diferentes periodos, no son comparables. A futuro, podría estudiarse el cambio de este parámetro con el tiempo.

Desde un punto de vista estadístico, se pueden observar tendencias negativas en el oeste patagónico, estos descensos, pueden ser perjudiciales para los cultivos, así como, para la producción de energía hidroeléctrica que se realiza en la región. Más aún, los ríos de esa región ya están teniendo déficit para renovar su caudal (Vich, 2014), una disminución de éste ayudaría a la presencia de sequías. Por otra parte, se encuentran algunas tendencias positivas en el sur de la región.

De manera general, las tendencias cambian alrededor de los 1990-2000 en el norte, mientras que al sur se dan alrededor de la década del 70'. De la misma forma, en la región centro norte las tendencias tendían al aumento y luego se presentan tendencias negativas.

Finalmente, la región se caracteriza por un marcado ciclo anual que se mantiene en el tiempo. Además, se encuentran ciclos de 30 años al sur de la región con una presencia marcada en los últimos 30 años y un ciclo de 3 años en la costa ocupando la región de norte a sur.

BIBLIOGRAFÍA

- Agosta, E., Martin, P. & Serio, L.** (2019). Persistent Easterly Winds Leading to Precipitation in the Atlantic Coast of Patagonia. *International Journal of Climatology*, 39.
- Anderson, T. W. & Darling, D. A.** (1954). A Test of Goodness of Fit. *Journal of the American Statistical Association*, 49 (268), 765-769.
- Barrucand, M., Rusticucci, M. & Vargas, W.** (2008). "Temperature extremes in the south of South America in relation to Atlantic Ocean surface temperature and Southern Hemisphere circulation" *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 113(20)
- Barros, V. & Castañeda, M. E.** (2000). Recent Precipitation Trends in Southern South America East of the Andes: An Indication of Climatic Variability.
- Barros, V. & Castañeda, M. E.** (2001). Tendencias de la precipitación en el Oeste de Argentina. *Meteorológica*, 26(1), 5-23.
- Barros, V., Doyle, M. & Camilloni, I.** (2008). Precipitation trends in southeastern South America: Relationship with ENSO phases and with low-level circulation. *Theoretical and Applied Climatology*, 93, 19-33. <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0329-x>
- Blackman, R. B. & Tukey, J. W.** (1958). The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering. *Bell System Tech. J.*, 37(1), 185-282.
- Canavos, G.** (1988). *Probabilidad y Estadística, Aplicaciones y Métodos*, (1era edición). McGraw-Hill
- Castañeda, M. E. y González, M.** (2008). Statistical analysis of the precipitation trends in the Patagonia region in Southern South America. *Atmósfera*, 21 (3), 303-317.
- Castañeda, M.E. & Barros, V.** (1994). Las tendencias de la precipitación en el Cono sur de América al Este de los Andes. *Meteorológica*, 19, 23-32.
- Husak, G., Michaelsen, J. & Funk, C.** (2007). Use of the gamma distribution to represent monthly rainfall in Africa for drought monitoring applications. *International Journal of Climatology*, 27, 935-944. <https://doi.org/10.1002/joc.1441>
- Ison, N., Feyerherm, A. & Dean Bark, L.** (1971). Wet period precipitation and the gamma distribution. *Journal of Applied Meteorology*, 10, 658-665.
- Karl, T., Knight, R. & Baker, B.** (2000). The record breaking global temperatures of 1997 and 1998: Evidence for an increase in the rate of global warming? *Geophysical Research Letters – GEOPHYS RES LETT*, 27, 719-722. <https://doi.org/10.1029/1999GL010877>
- Kendall, M.** (1938). A New Measure of Rank Correlation. *Biometrika*, 30, 81-93. <https://doi.org/doi10.2307/2332226>
- Martin, P. & Serio, L.** (2007). Estudio de la distribución de la precipitación mensual y estacional en la región patagónica argentina. *GEOACTA*, 32, 145-150.
- Minetti, J. & Vargas, W. M.** (1997). Interaction Processes between the annual wave and the disturbances in series of daily. *Journal of Climate. American Meteorological Society*, 10(2).
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.** (2015). Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático.
- Saurral, R., Camilloni, I. & Barros, V.** (2017). Low-frequency variability and trends in centennial precipitation stations in southern South America. *International Journal of Climatology*, 37, 1774-1793. <https://doi.org/10.1002/joc.4810>
- Schwerdfeger, W. & Vasino, C.** (1954). La variación secular de las precipitaciones en el este y centro de la República Argentina. *Meteoros*, 3,4, 93-174.
- Serio, L., Martin, P. & Murphy, G.** (2010). Evaluación de una metodología de pronóstico estadístico para la condición hídrica del suelo en la región pampeana argentina. *AgriScientia*, 27, 11-17.
- Serio, L. & Murphy, G.** (2006). Cálculo de la probabilidad mensual de alcanzar distintas categorías de sequías definidas por medio del Índice Estandarizado de Precipitación. Trabajo presentado en el XI Reunión Argentina de Agrometeorología. La Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Serio, L., Spescha, L. & Murphy, G.** (2007). Validación de las Precipitaciones Decadicas en la Región Pampeana Estimadas por el Modelo Atmosférico del ECMWF (Validation of 10-Daily Precipitation Data in the Pampas Region Estimated by the ECMWF Atmospheric Model). *In The Second International Workshop on Crop Monitoring and Forecasting in South America.*(pp.45-52). Office for Official Publications of the European Communities.
- Penalba, O. & Vargas, W.** (2004). Interdecadal and Interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina. *International Journal of Climatology*. 24. 1565 - 1580. [10.1002/joc.1069](https://doi.org/10.1002/joc.1069).

- Penalba, O. & Rivera, J.** (2012). Uso de la distribución gamma para la representación de la precipitación mensual en el sudeste de Sudamérica. Cambios espacio-temporales en sus parámetros. Presentado en: XI Congreso Argentino de Meteorología (CONGREMET). Mendoza, Argentina
- Thom, H.** (1958). A note on the Gamma distribution. *Monthly Weather Review*, 86, 117-122
- Tomé, A. & Miranda, P.** (2005). Continuous partial trends and low-frequency oscillations of time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 12, 451-460. <https://doi.org/10.5194/npg-12-451-2005>
- Torrence, C. & Compo, G. P.** (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *American Meteorological Society*, 79(1).
- Tukey, J.** (1950). The sampling theory of power spectrum estimates. *Symposium on Applications of Autocorrelation Analysis to Physical Problems.*, 47-67.
- Vich, A. I. J., Norte, F. A. & Lauro, C.** (2014). Análisis regional de frecuencias de caudales de ríos pertenecientes a cuencas con nacientes en la cordillera de Los Andes. *Metereologica*, 39(1).
- Volkova, T., Longobardi, A. & Krasnogorskaya, N.** (2014). Gamma distribution function as a tool for monthly precipitation generation in the Bashkortostan Republic, Russian Federation. *Latest Trends in Energy, Environment and Development*, 88-95.
- Wilks, D.** (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (2. a ed.). ELSEVIER.
- Woolhiser, DA.** (1992). Modelling daily precipitation-progress and problems. En: *Statistics in the Environmental and Earth Sciences*, Walden AT, Guttorp P (eds). Edward Arnold: Londres, Reino Unido; pp71-89.