



IMPACTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA VEGETACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO SAUCE GRANDE (ARGENTINA)

Andrea Soledad Brendel^{1,2}

(Manuscrito recibido el 29 de abril de 2021, en versión final 28 de julio de 2021)

Para citar este documento

Brendel, A.S. (2021). Impactos de la variabilidad climática sobre la vegetación de la cuenca del río Sauce Grande (Argentina). *Boletín geográfico*, 43(2), 13-112.

Resumen

El cambio climático ha generado impactos profundos en los ecosistemas terrestres, siendo la vegetación uno de los elementos más afectados. El objetivo de este trabajo fue analizar los impactos de variabilidad climática sobre la vegetación de la cuenca del río Sauce Grande (Argentina) mediante la aplicación del índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI, por sus siglas en inglés) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés). La metodología incluyó el análisis de datos de tres puntos del NDVI de febrero y octubre y el SPEI de dos meses durante el período 2000-2020. Se aplicó una correlación de Pearson entre ambos índices y se calculó la tendencia y variaciones a partir del test de Mann Kendall y el estimador de pendiente de Sen, respectivamente. Los resultados indicaron que la escala de SPEI de dos meses (SPEI-2) fue la más apropiada para analizar la dinámica de la vegetación del área de estudio, dado que el coeficiente de correlación fue superior a 0,782 con alto grado de significancia estadística ($p < 0,01$) en los tres sectores de la cuenca. Durante el período 2000-2020, el SPEI-2 presentó tendencia negativa y estadísticamente significativa en todo el área de estudio. Por lo tanto, se evidenció un aumento en la frecuencia de los períodos secos y un incremento en la magnitud de estos eventos, que fue creciente en sentido N-S durante el mes febrero y opuesto durante octubre. El NDVI de febrero y octubre también presentaron tendencia negativa y significancia estadística en toda la cuenca. Esta situación indicó que la vegetación presentó procesos de deterioro como

¹Instituto Argentino de Oceanografía (IADO-CONICET), Florida 8000, Complejo CCT CONICET Bahía Blanca, Edificio E1, Bahía Blanca (8000), Argentina. E-mail: asbrendel@iado-conicet-gob.ar.

²Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur (UNS). San Andrés 800, Bahía Blanca (8000), Argentina. E-mail: asbrendel@iado-conicet-gob.ar.

consecuencia del incremento de los períodos secos. La cuenca inferior fue la que reflejó los procesos de deterioro más importantes, ya que el NDVI de febrero presentó una tasa de disminución de -0,032, mientras que el de octubre fue de -0,044 en los 21 años analizados. Los resultados encontrados aportan información fundamental para los tomadores de decisión y los productores agropecuarios, dado que servirá de base para la planificación de las actividades agroeconómicas, para el ordenamiento del territorio y para orientar las políticas públicas destinadas a conservar los recursos naturales de la cuenca del río Sauce Grande.

Palabras clave: NDVI, SPEI, tendencia, sequía, actividades agropecuarias.

IMPACTS OF CLIMATIC VARIABILITY ON THE VEGETATION OF THE SAUCE GRANDE RIVER BASIN (ARGENTINA)

Abstract

Climate change has had profound impacts on terrestrial ecosystems, vegetation being one of the most affected elements. The objective of this work was to analyze the impacts of climate variability on the vegetation of the Sauce Grande river basin (Argentina) by applying the standardized precipitation and evapotranspiration index (SPEI) and the vegetation index of normalized difference (NDVI). The methodology included analyzing three-point data from the February and October NDVI and the two-month SPEI during the 2000-2020 period. A Pearson correlation was applied between both indices, and the trend and variations were calculated from the Mann Kendall test and the Sen slope estimator, respectively. The results indicated that the two-month SPEI scale (SPEI-2) was the most appropriate to analyze the dynamics of the vegetation of the study area since the correlation coefficient was higher than 0.782 with a high degree of statistical significance ($p < 0.01$) in the three sectors of the basin. During the 2000-2020 period, the SPEI-2 presented a negative and statistically significant trend throughout the study area. Therefore, there was an increase in the frequency of dry periods and an increase in the magnitude of these events, increasing in the N-S direction during February and the opposite during October. The NDVI for February and October also presented a negative trend and statistical significance throughout the basin. This situation indicated that the vegetation presented deterioration processes as a consequence of the increase in dry periods. The lower basin was the one that reflected the most critical deterioration processes since the February NDVI presented a decrease rate of -0.032, while that of October was -0.044 in the 21 years analyzed. The results were found to provide essential information for decision-makers and agricultural producers since it will serve as a basis for planning agroeconomic activities, land use planning, and guiding public policies to conserve the natural resources of the Sauce Grande river basin.

Keywords: NDVI, SPEI, trend, drought, agricultural activities.

Introducción

La vegetación es el elemento natural que responde a las características del medio al cual pertenece (Duval et al., 2015). Una sequía prolongada o períodos de elevados excesos de precipitación pueden incidir en la dinámica del intercambio de materia y energía de los ecosistemas y, por ende, en la capacidad fotosintética de la vegetación que cubre dichas regiones geográficas, lo cual se manifiesta en cambios en la intensidad del verdor de la vegetación (Álvarez & Basanta, 2015). En consecuencia, la vegetación es un factor clave que brinda información indirecta sobre la biodiversidad dentro de una región geográfica (Millano Tudare et al., 2017).

El cambio climático ha aumentado la frecuencia, severidad e intensidad de los períodos y secos y húmedos (Sheffield et al., 2012). Como consecuencia, se han generado impactos profundos en los ecosistemas terrestres, siendo la vegetación uno de los elementos más afectados (Luo et al., 2020). Estudios recientes demostraron que el 75 % de la superficie terrestre se encuentra significativamente alterada, con indicadores ecosistémicos que muestran una declinación acelerada (Plataforma Intergubernamental de Política Científica en Biodiversidad y Servicios de los Ecosistemas-IPBES, 2019). En ese sentido, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) es uno de los índices más utilizados en la evaluación del funcionamiento de los ecosistemas, permitiendo reflejar los cambios en la cobertura vegetal, la biomasa y los parámetros del ecosistema (Ferrelli, 2017, Liu et al., 2019). Se ha utilizado ampliamente para evaluar la degradación de la vegetación, las características del ecosistema, las condiciones fisiológicas de sequía y los patrones de la vegetación (Zhao et al., 2018). Además, el NDVI es un excelente estimador de la provisión de servicios ecosistémicos (Paruelo et al., 2016), como así también sus cambios reflejan con gran precisión la variabilidad climática de una región (Lara et al., 2018).

La vegetación presentará diferentes tiempos de respuesta a la variabilidad climática (Luo et al., 2020). Por ejemplo, responde rápidamente a las sequías, principalmente las ocurridas durante el verano, en Canadá (Vicente-Serrano et al., 2012), mientras que, en una región árida del centro de China, a sequías de largo plazo (Luo et al., 2020). Por lo tanto, el monitoreo de las sequías con índices que incluyan no sólo precipitación sino temperatura, es fundamental para evaluar la severidad de este fenómeno con mayor precisión (Vicente Serrano et al., 2010).

Se han realizado numerosos estudios que analizan la repuesta de la vegetación a la variabilidad climática (Li et al., 2013; Vicente-Serrano et al., 2015; Luo et al., 2020). La mayoría de ellos se han centrado en las sequías, dado que es uno de los fenómenos naturales que mayores impactos negativos produce en los ecosistemas. Este fenómeno presenta como principal característica su alta frecuencia, amplio rango y larga duración (Liu et al., 2016). También genera impactos negativos sobre la agricultura, los recursos hídricos, los ecosistemas naturales y la sociedad, provocando grandes pérdidas económicas, hambruna, epidemia, degradación de la tierra, entre otros (Beguiría et al., 2010; Ferrelli, 2017). Durante las últimas tres décadas, todos los continentes registraron sequías de manera simultánea (Dai, 2011). Por ejemplo, en América del Sur, ocurrieron durante 1962, 1965/1966, 1971/1972, 1988/1989,

1995/1996 y 2008/2009 (Rivera & Penalba, 2014). En Argentina, la sequía de los años 2008 y 2009 afectó a casi todo el país, generando la muerte de un millón de cabezas de ganado (Scarpati & Capriolo, 2016), mientras que, en el sur de la Región Pampeana, se registraron pérdidas en la superficie cosechada de los cultivos de secano del 80 % (Brendel et al., 2017). Además, en esta región, se prevé que las sequías serán aún más intensas y periódicas en el futuro (Ferrelli et al., 2020).

El área de estudio es la cuenca del río Sauce Grande (4856 km²), localizada al sur de la Región Pampeana (Argentina) (Figura 1). La misma es considerada una de las más importantes de la región y presenta una gran relevancia agroecosistémica (Denegri & Gaspari, 2010; Carrascal Leal et al., 2013; Brendel, 2020). Dentro de ella se encuentra uno de los recursos de agua dulce más importante del sur de la Región Pampeana: el río Sauce Grande (Schefer, 2004). Además, se localizan cuerpos de agua de vital importancia. En este sentido, en la cuenca media, se destaca el dique Paso de Las Piedras, el cual es el principal reservorio de agua de la región, abasteciendo de agua potable a más de 500.000 habitantes, como así también es fuente de agua cruda para el polo industrial cercano (Figura 1). Por su parte, en la cuenca baja se emplaza la laguna Sauce Grande que se caracteriza por ser el cuerpo de agua más extenso de este sector de la cuenca, somero y de régimen permanente. Su principal atractivo turístico es la pesca deportiva del pejerrey (Arnaudo & Corbella, 2013).

La principal actividad económica de la cuenca del río Sauce Grande es la agricultura de secano con rotación de cultivos y pastoreo de ganado en pastizales naturales o seminaturales (Brendel et al., 2019). Los cultivos y pastizales abarcan el 75,6 % de la cuenca (Brendel et al., 2020). Esta cuenca ha reportado sequías de diferente magnitud y duración como, por ejemplo, durante los años 1962, 1995, 2008/2009, 2012/2013, entre otras (Brendel, 2020). La registrada durante los años 2008/2009 fue la más intensa de los últimos 20 años (Ferrelli, 2016). Es importante destacar que estos eventos han generado graves impactos sobre la producción agropecuaria y los recursos hídricos de la cuenca, como así también sobre la población (Casado et al., 2016; Brendel, 2020). En numerosas ocasiones, los períodos secos limitaron la provisión de agua para las actividades agrícolas e industriales (Casado et al., 2016) y generaron una reducción de los rendimientos de los cultivos de hasta un 52 % (Brendel, 2020). Por lo tanto, comprender la influencia de las sequías sobre las coberturas del suelo, y en particular sobre la dinámica de la vegetación, es fundamental para la detección temprana de daños (Vicente-Serrano et al., 2013; Zhang et al., 2017). Sin embargo, no se han realizado estudios que evalúen la interacción clima-vegetación en la cuenca del río Sauce Grande (Argentina). Por lo expuesto anteriormente el objetivo de este trabajo es analizar los impactos de variabilidad climática sobre la vegetación de la cuenca del río Sauce Grande mediante la aplicación del SPEI y el NDVI. Para ello se propone, i) detectar la escala de tiempo de SPEI que mejor represente las variaciones del NDVI en los momentos de máximo crecimiento de la vegetación, y ii) analizar la tendencia y el comportamiento de estos dos índices durante el período 2000-2020. Los resultados encontrados permitirán comprender, por primera vez en la región, la respuesta de la vegetación a la variabilidad climática, principalmente durante los períodos secos. Los mismos proporcionan información

fundamental para el manejo de los recursos naturales, como así también servirán de base para garantizar la permanencia de las actividades agropecuarias en la cuenca del río Sauce Grande.

Área de estudio

La cuenca del río Sauce Grande es exorreica. Está compuesta por el río Sauce Grande que nace en el Sistema Serrano de Ventania (1243 msnm) y desemboca en el Océano Atlántico (Figura 1). A lo largo de su extensión presenta dos cuerpos de agua principales: el dique Paso de Las Piedras y la laguna Sauce Grande (Figura 1).

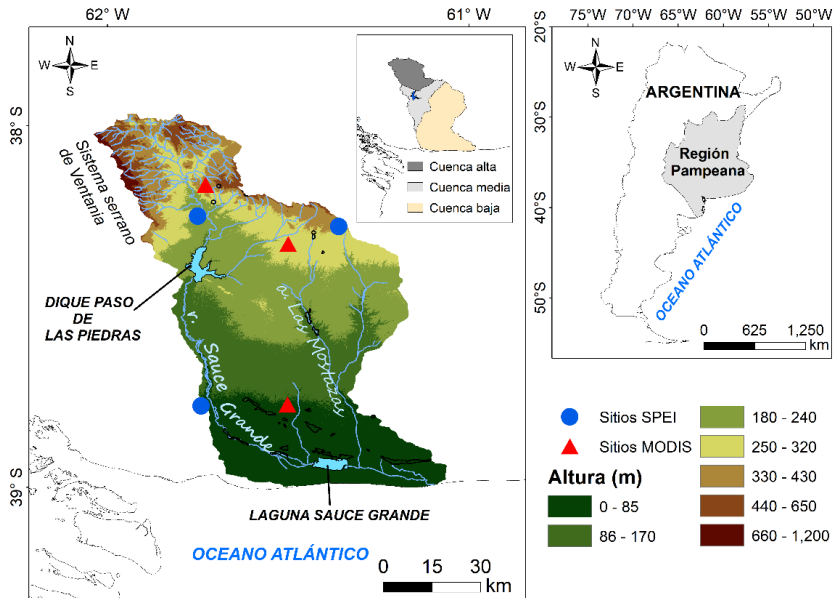


Figura 1. Localización de la cuenca del río Sauce Grande y de los sitios de SPEI y NDVI utilizados en el presente trabajo. Fuente: Elaboración propia

Según la clasificación climática de Thornthwaite (1948), el clima de la cuenca es subhúmedo húmedo al norte (cuenca alta, 750 mm), mientras que se clasifica como subhúmedo seco al sur (cuenca baja, 646 mm). Los cultivos de invierno (trigo, avena y cebada) son más frecuentes que los de verano (maíz, soja y girasol). El trigo es el principal cultivo de cosecha, seguido de cebada y el girasol. En menor medida, se realizan avena, soja y maíz (Brendel et al., 2019) (Figura 2).

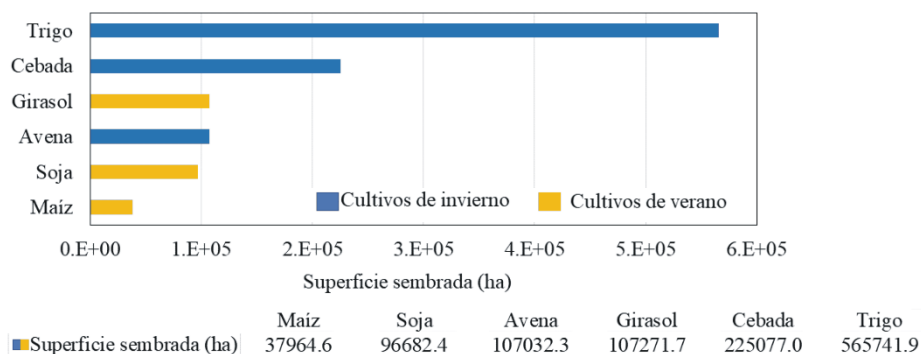


Figura 2. Superficie sembrada media de cultivos de invierno y verano durante el período 1970-2020. Elaboración propia sobre la base de las estimaciones agrícolas del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. Fuente: Elaboración propia

Metodología

Como primer paso, se estudió el comportamiento medio anual y mensual de la vegetación de la cuenca del río Sauce Grande a partir del NDVI. Este un índice que mide la vigorosidad y verdor de la vegetación (Schnur et al., 2010) y sus valores se obtienen a partir de la diferencia normalizada entre las bandas espectrales correspondientes al rojo (R) e infrarrojo cercano (IR) (1).

$$NDVI = \frac{R-IR}{R+IR} \quad (1)$$

Los valores de este índice oscilan entre 1 y -1. Los positivos corresponden áreas con vegetación, mientras que los negativos pertenecen a nubes, nieve, agua o rocas. Además, cuanto más extremos son los registros positivos mayor vigorosidad presentará la vegetación (Schnur et al., 2010). Se utilizaron datos de NDVI del producto MOD13Q1 derivados del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), que orbita a bordo del satélite TERRA. Los mismos fueron descargados de la página oficial de la NASA (<https://modis.ornl.gov/>) y están geométrica y atmosféricamente corregidos, incluyendo un índice de calidad de datos, basado en las condiciones ambientales en las cuales se registraron (Justice et al., 2002). El producto MOD13Q1 tiene una resolución espacial de 250 metros y una resolución temporal de 16 días. Se obtuvieron tres puntos (uno representativo de cada sector de la cuenca alta, media e inferior, (ver Figura 1) para el período 2000-2020. A partir de las series de tiempo, se calculó la media mensual y anual de cada sector analizado.

Posteriormente, para analizar los períodos secos y húmedos, se descargaron los datos del SPEI del sitio web (<http://sac.csic.es/spei/home.html>). Este es un índice climático mensual resultante de la diferencia entre la precipitación acumulada y la evapotranspiración potencial, que permite analizar detectar, monitorear y analizar los

eventos secos y húmedos (Vicente-Serrano et al., 2010). Su carácter multiescalar es la principal ventaja respecto a otros índices, ya que permite ser calculado a escalas de 1 a 48 meses, permitiendo conocer la respuesta de los distintos sistemas hidrológicos, ecológicos y agrícolas a los eventos secos y húmedos (Vicente-Serrano et al., 2013).

El conjunto de datos de este índice tiene resolución espacial de 0,5 ° y está disponible para el período 1955-presente. Es importante destacar que en Argentina y en particular en la cuenca del río Sauce Grande, la densidad espacial de la información meteorológica es escasa (Ferrelli et al., 2016; Brendel, 2020). Por lo tanto, a pesar de la baja resolución espacial del SPEI para una cuenca de pequeña extensión (Figura 1), el mismo se consideró como una fuente de información fundamental para analizar los períodos húmedos y secos en áreas con baja densidad de información meteorológica como la analizada. Este índice ha sido ampliamente utilizado en diversas regiones del mundo para monitorear y evaluar los períodos secos y húmedos con excelente precisión (Hernandez & Uddameri, 2014; Brendel et al., 2017; Wang et al., 2019).

La serie de datos de SPEI fue obtenida para los meses de febrero y octubre en múltiples escalas (1 a 12 meses) durante el período 2000-2020. Se analizaron tres sitios del SPEI que se localizaron cercanos a los sitios del NDVI (Figura 1). Se consideraron los meses de febrero y octubre dado que son los momentos de máximo crecimiento y vigorosidad de los cultivos de invierno y verano, respectivamente (Guerscham et al., 2003; Barragán et al., 2016, Brendel et al., 2019). El SPEI varía entre 3 y -3. Los registros con valores mayores a 1 se consideran húmedos, mientras que los registros con valores menores a -1 se consideran secos. Los períodos para los que el valor del SPEI se encuentra entre -0,99 y 0,99 son considerados normales (Vicente Serrano et al., 2010) (Tabla 1).

SPEI	Categorías
2,0 o más	Extremadamente húmedo
1,5 a 1,99	Muy húmedo
1,0 a 1,49	Moderadamente húmedo
-0,99 a 0,99	Normal
-1,0 a -1,49	Moderadamente seco
-1,5 a -1,99	Muy seco
-2,0 o menos	Extremadamente seco

Tabla 1. Categorías del SPEI. Fuente: Elaboración propia

Para detectar la escala de SPEI que mejor represente las variaciones de la vegetación, se aplicó un análisis de correlación de Pearson entre el SPEI desde 1 a 12 meses y el NDVI de febrero y octubre en los tres sitios de la cuenca del río Sauce Grande. Mediante su aplicación, se obtuvo que la escala de dos meses fue la más

apropiada (SPEI-2). Se seleccionaron las series de tiempo de esta escala y se graficaron en conjunto con el NDVI de febrero y octubre en cada sector de la cuenca durante el período 2000-2020. Finalmente, para el mismo período, se realizó un análisis de tendencias del SPEI-2 y del NDVI de febrero y octubre. Para ello, se aplicó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall 1975) y el estimador de pendiente de Sen (1968) para cuantificar la magnitud de las variaciones de cada variable. La utilización del test de Mann-Kendall para una serie de n datos independientes e idénticamente distribuidos supone que la hipótesis nula no debe ser rechazada. La hipótesis nula (H_0) y alterna (H_a) para cada una de las estaciones de análisis son: H_0 : no se presenta una tendencia lineal en la serie; H_a : hay una tendencia lineal en la serie. La prueba de Mann Kendall se mide con el estadístico Tau-b de Kendall. Si dicho valor es positivo, entonces la serie presenta una tendencia positiva y si ese valor es negativo, la serie posee una tendencia negativa. La tendencia es estadísticamente significativa si el valor de p es $< 0,05$. Esta metodología fue aplicada en el software R Studio mediante la utilización del paquete Trend (Pohlert, 2017), ampliamente utilizado en estudios que incluyen variables climáticas, edáficas y ecosistémicas (Tong et al., 2017; Jiang et al., 2019; Luo et al., 2020).

Resultados y Discusión

Comportamiento de la vegetación de la cuenca del río Sauce Grande.

El comportamiento del NDVI medio mensual (2000-2020) en los tres sectores de la cuenca del río Sauce Grande, se presenta en la Figura 3. El NDVI medio anual fue mayor en la cuenca alta (NDVI = 0,5), seguido de la cuenca media (NDVI = 0,46), mientras que en la cuenca inferior el valor de NDVI fue el más bajo (0,44). Por lo tanto, el área de estudio presentó un gradiente decreciente del valor de NDVI anual en sentido N-S, indicando una mayor vigorosidad de la vegetación en cuenca alta que en la cuenca inferior. Esta situación, se relaciona con el clima del área de estudio el cual es subhúmedo húmedo al norte (cuenca alta) y subhúmedo seco al sur (cuenca baja) (Brendel, 2020).

Por otro lado, el NDVI medio mensual mostró, a lo largo del año, una dinámica similar en toda el área de estudio (Figura 3). Los mínimos valores se observaron durante diciembre y enero (NDVI promedio = 0,40) y en el invierno (NDVI promedio = 0,43) (Figura 3), mientras que el NDVI fue máximo durante la primavera en la totalidad de la cuenca, siendo octubre el mes que registró el NDVI más elevado (0,56 en la cuenca alta, 0,59 en la cuenca media y 0,52 en la cuenca inferior) (Figura 3). Los valores bajos de NDVI durante el invierno se deben a que los cultivos de invierno están recientemente sembrados y presentan escaso crecimiento, mientras que el NDVI mínimo durante diciembre y enero, se relaciona con el momento de la cosecha de los mismos. En contraposición, el NDVI máximo en octubre coincide con el momento de floración de los cultivos de invierno, mientras que los altos valores durante febrero coinciden con el momento de mayor crecimiento de los cultivos de verano (Guerschamm et al., 2003; Barragán et al., 2016).

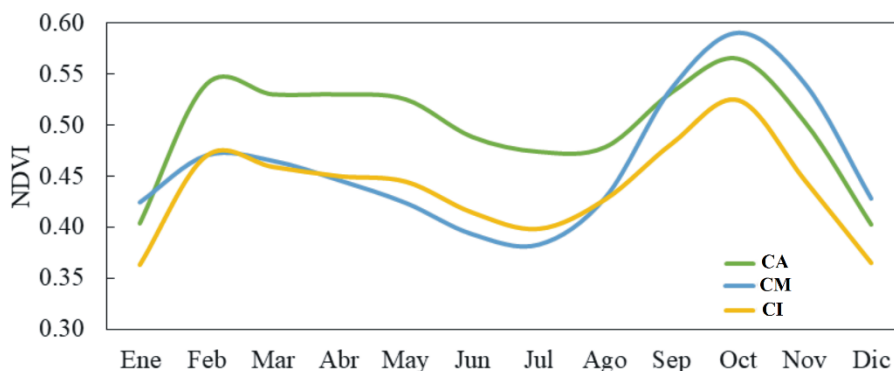


Figura 3. NDVI medio mensual (2000-2020) en la cuenca alta (CA), media (CM) e inferior (CI) del río Sauce Grande. Fuente: Elaboración propia

Análisis de correlación entre el NDVI y el SPEI.

Tras conocer el comportamiento del NDVI mensual y anual en el área de estudio (Figura 3), se seleccionó el NDVI de febrero y octubre, dado que son los momentos de mayor crecimiento y desarrollo de los cultivos de verano e invierno, respectivamente. Luego, se realizó un análisis de correlación de Pearson entre el SPEI a múltiples escalas (1 a 12 meses) y el NDVI de febrero y octubre, con el objetivo de detectar la escala de SPEI que mejor represente las variaciones de la vegetación en el área de estudio. La respuesta de la vegetación a la variabilidad climática depende en gran medida de la escala de tiempo que se analice, dada la diferente resistencia de los tipos de vegetación a los déficits y excesos hídricos (Vicente-Serrano et al., 2013; Potopová et al., 2016).

En toda el área de estudio, el NDVI de febrero y octubre presentó correlación positiva con todas las escalas del SPEI (Tabla 2). Sin embargo, en el caso del NDVI de febrero se encontró significancia estadística solo con el SPEI 1, 2 y 3 meses en la cuenca alta e inferior y con el SPEI 1, 2, 3 y 4 en la cuenca media (Tabla 2). Por su parte, el NDVI de octubre registró evidencia científica con las escalas de SPEI desde 1 a 7 meses en el caso de la cuenca alta e inferior y hasta el SPEI 8 en la cuenca media. A pesar de ello, ambos NDVI presentaron una mayor correlación en la escala de 2 meses en toda la cuenca ($p < 0,01$) (Tabla 2). Por lo tanto, esta situación indica que los cultivos de la cuenca del río Sauce Grande presentan una fuerte respuesta a la variabilidad climática de corto plazo (SPEI 1 y 2) y en menor medida, estacional (SPEI 3) y semestral o mayores (SPEI 6, SPEI 7 y SPEI-8) al igual que en lo reportado en numerosas investigaciones a escala mundial y nacional (p.ej., Tong et al., 2017; Ferrelli, 2017; Vega, 2019). En este sentido, algunos estudios demostraron que la vegetación puede responder rápidamente al contenido de agua del suelo, reflejándose en las escalas de corto plazo del SPEI, como lo encontrado en esta investigación (Hunt et al., 2014; Cremallera et al., 2016). Sin embargo, en otras regiones del mundo existe

un gran retraso en la respuesta de la vegetación a las sequías principalmente, que puede superar el año (Liu et al., 2016; Luo et al., 2020).

Cuenca	NDVI mes	SPEI											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CA	Feb	0,70*	0,81**	0,69*	0,51	0,52	0,57	0,53	0,53	0,52	0,50	0,49	0,51
	Oct	0,66*	0,85**	0,62*	0,61*	0,65*	0,64*	0,65*	0,55	0,54	0,55	0,58	0,59
CM	Feb	0,65*	0,78**	0,75*	0,66*	0,50	0,53	0,42	0,41	0,38	0,31	0,23	0,24
	Oct	0,67*	0,79**	0,74*	0,69*	0,68*	0,72*	0,74*	0,66*	0,61	0,61	0,63	0,67
CI	Feb	0,64*	0,81**	0,63*	0,29	0,17	0,15	0,04	0,03	0,00	0,02	0,01	0,03
	Oct	0,7*	0,84**	0,71*	0,74*	0,75*	0,72*	0,72*	0,61	0,66	0,56	0,51	0,60

Tabla 2. Correlación de Pearson entre el SPEI a múltiples escalas y el NDVI de febrero y octubre en la cuenca del río Sauce Grande. CA: Cuenca Alta, CM: Cuenca Media, CI: Cuenca Inferior. **La correlación es significativa en el nivel 0,01, * La correlación es significativa en el nivel 0,05. Fuente: Elaboración propia

Análisis espacio-temporal y tendencia del SPEI y el NDVI durante el período 2000-2020.

Como se mencionó anteriormente, una vez que se detectó la escala del SPEI que mejor representó las variaciones de los cultivos, se procedió a analizar la dinámica y tendencia del SPEI y el NDVI en el momento de máximo crecimiento de los cultivos de invierno (octubre) y verano (febrero), durante el período 2000-2020 (Figura 4). La tendencia del SPEI de febrero y octubre fue negativa y estadísticamente significativa ($p < 0,05$) en toda el área de estudio. En la cuenca alta, el SPEI de febrero disminuyó $-0,88/21$ años ($p = 0,045$), mientras que en la cuenca media y baja la tasa de disminución fue de $-1,138$ ($p = 0,043$) y $-1,262$ ($p = 0,002$), durante los 21 años analizados. En el caso del SPEI de octubre, la disminución fue de $-2,05$ en la cuenca alta ($p = 0,03203$), $-1,84$ ($p = 0,0372$) en la cuenca media y $-1,82$ en la cuenca baja ($p = 0,00492$) en el período 2000-2020.

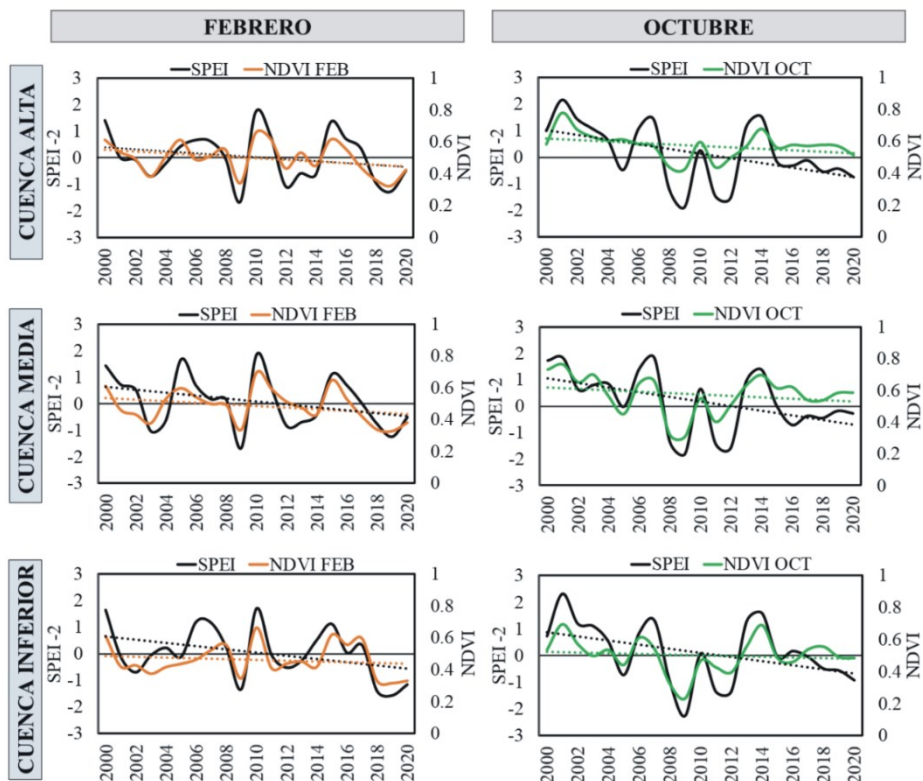


Figura 4. Evolución y tendencia del SPEI-2 y el NDVI de febrero y octubre durante el período 2000-2020 en la cuenca del río Sauce Grande. Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, el área de estudio presentó, por un lado, un aumento en la frecuencia de los períodos secos y por el otro, un incremento en la magnitud de estos de estos eventos, que fue creciente en sentido N-S en febrero y opuesto, durante octubre (Figura 4). Estos resultados coinciden con lo hallado en diversas regiones, dado que el aumento de los períodos secos ha sido reportado en, por ejemplo, la cuenca del río Yangtsé (China) durante el período 1981-2015 (Jiang et al., 2020), en Siria durante el período 1961-2012 (Mathbout et al., 2018), en la Península Ibérica (1961-2011) (Vicente-Serrano et al., 2014), en el sur de la Región Pampeana (Argentina) (Ferrelli et al., 2019), entre otros. Además, la intensidad de estos eventos fue mayor en gran parte del mundo desde 1970 (IPCC, 2013).

Por otro lado, el NDVI de febrero y octubre presentó, al igual que el SPEI, tendencia negativa y estadísticamente significativa en la totalidad del área de estudio ($p < 0,05$) (Figura 4). La disminución del NDVI de febrero fue similar en la cuenca

alta y media (-0,117 durante los 21 años), mientras que de mayor impacto en la cuenca inferior (-0,032/21 años). Se encontró la misma situación al analizar el NDVI de octubre, dado que la cuenca baja fue la que presentó la tasa de disminución del NDVI más elevada (-0,044 durante 2000-2020), indicando importantes procesos de degradación de la vegetación, al igual que en ocurrido en otras regiones del mundo (Tong et al., 2017; Luo et al., 2020). Esta situación es fundamental tenerla en cuenta, dado que se demostró que el 75 % de la superficie terrestre se encuentra significativamente alterada, con indicadores ecosistémicos que muestran una declinación acelerada (IPBES, 2019). En el sur de la Región Pampeana, se incrementaron los procesos de erosión eólica y se produjo un deterioro de la textura, composición química y desaparición del horizonte fértil (Pezzola et al., 2004; Ferrelli, 2017).

Durante el período de estudio y a lo largo de toda la cuenca, el NDVI de los dos meses analizados fluctuó en función de las variaciones del SPEI (Figura 4), al igual que en los registrado en otras regiones del mundo y del país (p.ej., Brendel et al., 2017; Tong et al., 2017, Sun et al., 2020). El NDVI se incrementó cuando los valores del SPEI fueron positivos (períodos húmedos) y disminuyó, cuando los valores fueron negativos (períodos secos) (Figura 4). En el caso del NDVI de febrero, el máximo fue registrado durante el año 2010 en toda la cuenca y su valor fue de ≈ 0.69 (Figura 4). Esta situación fue producto de la ocurrencia de un evento muy húmedo, que fue registrado en toda la cuenca y que, a su vez, fue el más intenso de todo el período de estudio. En ese sentido, el SPEI fue de 1,70 en la cuenca alta y baja y 1,84 en la cuenca media (Figura 4). Además, se observaron otros momentos donde el NDVI de febrero fue alto como consecuencia de la mayor disponibilidad hídrica. Por ejemplo, en 2015 donde el NDVI fue de 0,61 en la cuenca alta, 0,64 en la cuenca media y 0,62 en la cuenca baja, como consecuencia de un evento de moderada humedad (SPEI: 1,34, 1,10 y 1,20, respectivamente) (Figura 4).

Por otro lado, el NDVI de octubre fue máximo en el año 2001 en los tres sectores de la cuenca. Su valor fue de 0,78 en la cuenca alta, 0,76 en la cuenca media y 0,69 en la cuenca inferior (Figura 4). Similarmente a lo evidenciado en febrero, el máximo valor del NDVI de octubre en la cuenca alta e inferior fue producto de un mes extremadamente húmedo (SPEI: 2,15 y 2,30, respectivamente), mientras que, en la cuenca media, se registró un evento muy húmedo (SPEI 1,8) (Figura 4). Estos eventos, fueron los de mayor magnitud de todo el período de estudio. Por lo tanto, el máximo valor de NDVI de octubre estuvo en relación con el evento pluviométrico de humedad más intenso (Figura 4).

En contraposición, el NDVI presentó valores bajos cuando el SPEI fue negativo (Figura 4). En este sentido, la cuenca del río Sauce Grande mostró el mínimo valor del NDVI de febrero en el año 2019 y fue de 0,32 en los tres sitios, producto de un evento moderadamente seco en la cuenca alta y media (SPEI -1,26 y -1,25, respectivamente) y uno muy seco en la cuenca inferior (SPEI: -1,56). Durante el año 2009, el NDVI de febrero también presentó un valor bajo ($\approx 0,33$) como consecuencia de un evento muy seco que se desarrolló a lo largo de toda la cuenca (Figura 4). En este año, también se registró el mínimo valor del NDVI octubre. La sequía ocurrida

durante 2009, también ocasionó una significativa reducción del NDVI de octubre, alcanzando el mínimo valor de todo el período analizado (Figura 4). En la cuenca alta, el NDVI fue de 0,42 y el evento que lo generó se categorizó como muy seco (SPEI: -1,88). En la cuenca media, la sequía fue de la misma intensidad que en la cuenca alta pero el NDVI fue menor (0,31). Sin embargo, en la cuenca baja la sequía fue caracterizada como extrema (SPEI: -2,26), lo que ocasionó un NDVI de 0,23, el cual fue el más bajo de todo el período de estudio (Figura 4). Por lo tanto, la sequía, y particularmente la del año 2009, generó una drástica reducción de la actividad fotosintética de la vegetación, expresado en valores bajos del NDVI, al igual que en lo reportado en el sur de la Región Pampeana (Ferrelli et al., 2011). En la cuenca baja del río Sauce Grande, la sequía del año 2009 generó graves impactos en la economía local, dado que el rendimiento del cultivo de trigo se redujo en un 52 %, mientras que en la cuenca alta en un 20 % (Brendel, 2020).

Conclusión

En este trabajo se determinó, por primera vez, los efectos de la variabilidad climática sobre la vegetación de la cuenca del río Sauce Grande (Argentina) durante el período 2000-2020. Se detectó que la escala de SPEI más apropiada para analizar la dinámica de la vegetación en el área de estudio fue la de dos meses. Esta situación indicó que la vegetación responde rápidamente a los excesos o déficit de agua. Durante los 21 años analizados, el SPEI-2 en los momentos de máximo crecimiento de la vegetación (febrero y octubre) mostró tendencia negativa y estadísticamente significativa en toda el área de estudio. Esta situación reflejó un aumento en la frecuencia de los períodos secos. Además, se registró un incremento en la magnitud de estos de estos eventos, que fue creciente en sentido N-S durante el mes febrero y opuesto durante octubre. Similarmente a lo reflejado por el SPEI-2, el NDVI también mostró tendencia negativa y significancia estadística durante los 21 años estudiados, indicando que la vegetación presentó procesos de deterioro como consecuencia de las sequías. La cuenca inferior fue la que presentó los procesos de degradación más importantes.

Es necesario considerar en investigaciones posteriores, la utilización de un conjunto de datos meteorológicos que presente una mayor resolución espacial que la utilizada en este trabajo. La misma permitiría evaluar y analizar los cambios espaciales con mayor precisión. Además, es importante tener en cuenta que existen otros factores que modifican la respuesta de la vegetación, tales como el tipo de clima, el tipo de vegetación, la textura del suelo, el estado fenológico, entre otros. Estos serán tenidos en cuenta en futuras investigaciones sobre área de estudio. Finalmente, este trabajo aporta información fundamental para los tomadores de decisión y los productores agropecuarios, dado que servirá de base para la planificación de las actividades agroeconómicas, para el ordenamiento del territorio y para orientar las políticas públicas destinadas a conservar los recursos naturales de la cuenca del río Sauce Grande.

Agradecimientos

La autora agradece al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Universidad Nacional del Sur (UNS) por el financiamiento de este estudio.

Referencias

- Álvarez, C. & Basanta, M. (2015). Manejo sustentable de sistemas agrícolas en la región central de Córdoba: una experiencia de largo plazo en INTA EEA Manfredi. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 41(2), 215-222
- Arnaudo, M.F. & Corbella, V. (2013). Análisis de la potencialidad de monte hermoso para lograr el desarrollo local a partir de bienes culturales. *Revista de Investigación en Turismo y Desarrollo Local*, 6(15), 1-11.
- Barragán, F., Marini, F., Ángeles, G. & Garabito, C. (2016). *Determinación del uso del suelo en una zona semiárida mediante un estudio multitemporal con imágenes Landsat*. Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica y II Jornadas de Sistemas de Información Geográfica. Universidad Nacional de General Sarmiento, Buenos Aires.
- Beguiría, S., Vicente-Serrano, S.M. & Angulo-Martínez, M. (2010). A multiscalar global drought dataset: the SPEIbase: a new gridded product for the analysis of drought variability and impacts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(10), 1351-1354.
- Brendel, A.S., Bohn, V.Y. & Piccolo, M.C. (2017). Variabilidad de la precipitación y su relación con los rendimientos agrícolas en una región semiárida de la llanura pampeana (Argentina). *Estudios Geográficos*, 78, 7-29.
- Brendel, A.S., Ferrelli, F., Piccolo, M. C. & Perillo, G. M. (2019). Assessment of the effectiveness of supervised and unsupervised methods: maximizing land-cover classification accuracy with spectral indices data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(1), 014503.
- Brendel, A.S. (2020). Estudio integral de los recursos hídricos y las coberturas del suelo de la cuenca media y baja del río Sauce Grande (Argentina) (Tesis Doctoral). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca.
- Brendel, A.S., Ferrelli, F., Piccolo, M.C. & Perillo, G.M.E. (2020). Vulnerabilidad eco-ambiental y estrategias de manejo sustentable del territorio: el caso de la cuenca del río Sauce Grande (Argentina). *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 40(2), 299-322.
- Carrascal Leal, C.C., Denegri, G.A. & Delgado, M.I. (2013). Costos mínimos de compensación y cuantificación de la oferta hídrica en la cuenca alta del río Sauce

- Impactos de la variabilidad climática en la vegetación de la cuenca del río Sauce Grande... Grande, Argentina. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, 80, 55-70.*
- Casado, A., Peiry, J. L. & Campo, A.M. (2016). Geomorphic and vegetation changes in a meandering dryland river regulated by a large dam, Sauce Grande River, Argentina. *Geomorphology*, 268, 21-34.
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1), 45-65.
- Denegri, G.A. & Gaspari, F.J. (2010). Lineamientos para la formulación de pagos por servicios ambientales. Estudio de caso: Alta cuenca del Río Sauce Grande. Argentina. *Cuadernos Geográficos*, 46, 93-110.
- Duval, V.S., Benedetti, G.M. & Campo, A.M. (2015). Relación clima-vegetación: adaptaciones de la comunidad del jarillal al clima semiárido, Parque Nacional Lihué Calel, provincia de La Pampa, Argentina. *Investigaciones geográficas*, 88, 33-44.
- Ferrelli, F., Bohn, V.Y. & Piccolo, M.C. (2011). Aplicación de geotecnologías al estudio de las precipitaciones y su relación con las coberturas del suelo (Pcia. de Buenos Aires, Argentina). *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 11, 355-374.
- Ferrelli, F., Bustos, M.L., Piccolo, M.C., Cisneros, M.A.H. & Perillo, G.M.E. (2016). Downscaling de variables climáticas a partir del reanálisis NCEP/NCAR en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Papeles de Geografía*, 62, 21-33.
- Ferrelli, F. (2016). Efectos de eventos El Niño y La Niña sobre las lagunas del sur de la Región Pampeana (Argentina). *InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade*, 122-142.
- Ferrelli, F. (2017). Variabilidad pluviométrica y sus efectos sobre las coberturas del suelo al sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*, 58(1), 26-37.
- Ferrelli, F., Brendel, A.S., Aliaga, V.S., Piccolo, M.C. & Perillo, G.M.E. (2019). Climate regionalization and trends based on daily temperature and precipitation extremes in the south of the Pampas (Argentina). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 45(1), 393-416.
- Ferrelli, F., Brendel, A.S., Piccolo, M.C. & Perillo, G.M.E. (2020). Evaluación de eventos secos y húmedos en el contexto del cambio climático: El caso del sur de la Región Pampeana (Argentina). *Papeles de Geografía*, 66, 27-46
- Guerschman, J.P., Paruelo, J. M., Bella, C.D., Giallorenzi, M. C. & Pacin, F. (2003). Land cover classification in the Argentine Pampas using multi-temporal Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*, 24(17), 3381-3402.

- Hernandez, E.A. & Uddameri, V. (2014). Standardized precipitation evaporation index (SPEI)-based drought assessment in semi-arid south Texas. *Environmental Earth Sciences*, 71(6), 2491-2501.
- Hunt, E.D., Svoboda, M., Wardlow, B., Hubbard, K., Hayes, M. & Arkebauer, T. (2014). Monitoring the effects of rapid onset of drought on non-irrigated maize with agronomic data and climate-based drought indices. *Agricultural and Forest Meteorology*, 191, 1-11.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2013): Climate change 2013: the physical science basis. In Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. En: Stocker, T.F, Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. Y Midgley, P.M., (Eds), Cambridge University Press, Cambridge, 203 pp.
- Jiang, W., Wang, L., Feng, L., Zhang, M. & Yao, R. (2020). Drought characteristics and its impact on changes in surface vegetation from 1981 to 2015 in the Yangtze River Basin, China. *International Journal of Climatology*, 40(7), 3380-3397.
- Justice, C.O., Townshend, J.R.G., Vermote, E.F., Masuoka, E., Wolfe, R.E., Saleous, N. & Morisette, J.T. (2002). An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote sensing of Environment*, 83(1-2), 3-15.
- Kendall, M.G. (1948). *Rank correlation methods*, London, Griffin.
- Lara, B., Gandini, M., Gantes, P. & Matteucci, S.D. (2018). Regional patterns of ecosystem functional diversity in the Argentina Pampas using MODIS time-series. *Ecological Informatics*, 43, 65-72.
- Li, F., Zhao, W. & Liu, H. (2013). The response of aboveground net primary productivity of desert vegetation to rainfall pulse in the temperate desert region of northwest China. *PLoS One*, 8(9), e73003.
- 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.
- Liu, L., Wang, Y., Wang, Z., Li, D., Zhang, Y., Qin, D. & Li, S. (2019). Elevation-dependent decline in vegetation greening rate driven by increasing dryness based on three satellite NDVI datasets on the Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 107, 105569.
- Luo, N., Mao, D., Wen, B. & Liu, X. (2020). Climate Change Affected Vegetation Dynamics in the Northern Xinjiang of China: Evaluation by SPEI and NDVI. *Land*, 9(3), 90.
- Mann, H.B. (1945). Non-parametric tests against trend, *Econometrica*, 13.
- Mathbout, S., Lopez-Bustins, J.A., Martin-Vide, J., Bech, J. & Rodrigo, F.S. (2018). Spatial and temporal analysis of drought variability at several time scales in Syria during 1961–2012. *Atmospheric Research*, 200, 153-168.
- Millano-Tudare, J.L., Paredes-Trejo, F.J., Jaimes, E., Pineda, N., Mendoza, J. G., Garcés, Y. & Pineda, I. (2017). Patrones fenológicos de cinco tipos de cobertura en

Impactos de la variabilidad climática en la vegetación de la cuenca del río Sauce Grande...
bosque seco tropical, sur-cojedes, Venezuela. *Revista Agrollania de Ciencia y Tecnología*, 14, 106-112.

Plataforma Intergubernamental de Política Científica en Biodiversidad y Servicios de los Ecosistemas (IPBES). (2019). *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the IPBES. Unedited Ver-*. Obtenido de: https://www.ipbes.net/system/tdf/spm_global_unedited_advance.pdf?file=1&type=node&id=35245 (Acceso: 18/03/2021).

Paruelo, J.M., Texeira, M., Staiano, L., Mastrángelo, M., Amdan, L. & Gallego, F. (2016). An integrative index of Ecosystem Services provision based on remotely sensed data. *Ecological Indicators*, 71, 145-154.

Pezzola, A., Winschel, C. & Sanchez, R. (2004). Estudio multitemporal de la degradación del monte nativo en el partido de Patagones-Buenos Aires. *Boletín Técnico*, 12, 1-11.

Pohlert, T. (2017). Non-parametric trend tests and change-point detection, 4.

Potopová, V., Štěpánek, P., Farda, A., Türkott, L., Zahradníček, P. & Soukup, J. (2016). Drought stress impact on vegetable crop yields in the Elbe River Lowland between 1961 and 2014. *Cuadernos De Investigacion Geografica*, 42(1), 127-143.

Rivera, J.A. & Penalba, O.C. (2014). Trends and spatial patterns of drought affected area in Southern South America. *Climate*, 2(4), 264-278.

Scarpati, O.E. & Capriolo, A.D. (2016). Sequías agrícolas: recurrencia, clasificación y distribución en la Región Pampeana argentina. *Cuadernos Geográficos*, 55.

Schefer, J.C. (2004). Los recursos hídricos y el abastecimiento de agua. Bahía Blanca. *Centro de estudios y participación para el desarrollo local y regional*, 132.

Schnur, M.T., Xie, H. & Wang, X. (2010). Estimating root zone soil moisture at distant sites using MODIS NDVI and EVI in a semi-arid region of southwestern USA. *Ecological Informatics*, 5(5), 400-409.

Sen, P.K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*. 63(324), 1379-1389.

Sheffield, J., Wood, E.F. & Roderick, M.L. (2012). Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, 491(7424), 435-438.

Sun, Y., Liu, S., Dong, Y., Dong, S. & Shi, F. (2020). Effects of multi-time scales drought on vegetation dynamics in Qaidam River Basin, Qinghai-Tibet Plateau from 1998 to 2015. *Theoretical and Applied Climatology*, 141(1), 117-131.

Thorntwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94.

Tong, S., Bao, Y., Te, R., Ma, Q., Ha, S. & Lusi, A. (2017). Analysis of drought characteristics in Xilingol grassland of Northern China based on SPEI and its impact on vegetation. *Mathematical Problems in Engineering*, 11.

- Vega-Jácome, F. (2019). Respuesta de la vegetación a diferentes escalas temporales de sequía en Los andes Peruanos. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú, 36 pp.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J. J., López-Moreno, J.I., Azorin-Molina, C. & Sanchez-Lorenzo, A. (2012). Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interactions*, 16(10), 1-27.
- Vicente-Serrano, S.M., Gouveia, C., Camarero, J.J., Beguería, S., Trigo, R., López-Moreno, J.I. & Sanchez-Lorenzo, A. (2013). Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(1), 52-57.
- Vicente-Serrano, S.M., Lopez-Moreno, J.I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García-Ruiz, J. M. & Espejo, F. (2014). Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters*, 9(4), 044001.
- Vicente-Serrano, S.M., Cabello, D., Tomás-Burguera, M., Martín-Hernández, N., Beguería, S., Azorin-Molina, C. & Kenawy, A.E. (2015). Drought variability and land degradation in semiarid regions: Assessment using remote sensing data and drought indices (1982–2011). *Remote Sensing*, 7(4), 4391-4423.
- Wang, Y., Liu, G. & Guo, E. (2019). Spatial distribution and temporal variation of drought in Inner Mongolia during 1901–2014 using Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Science of the Total Environment*, 654, 850-862.
- Zhang, Q., Kong, D., Singh, V. P. & Shi, P. (2017). Response of vegetation to different time-scales drought across China: Spatiotemporal patterns, causes and implications. *Global and Planetary Change*, 152, 1-11.
- Zhao, A., Zhang, A., Cao, S., Liu, X., Liu, J. & Cheng, D. (2018). Responses of vegetation productivity to multi-scale drought in Loess Plateau, China. *Catena*, 163, 165-171.