



# El clima modula los efectos del pastoreo sobre la productividad primaria en ecosistemas áridos de Argentina

Diana Alejandra Calvo<sup>1,2,\*</sup> , Guadalupe Peter<sup>1,2</sup> , Juan José Gaitán<sup>2,3,4</sup> 

(1) Universidad Nacional de Río Negro, Sede Atlántica, Centro de Estudios Ambientales desde la NorPatagonia (CEANPa). Río Negro, Argentina.

(2) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

(3) Instituto de Suelos, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

(4) Universidad Nacional de Luján (UNLu).

\* Autor de correspondencia: D.A. Calvo [[dacalvo@unrn.edu.ar](mailto:dacalvo@unrn.edu.ar)]

> Recibido el 30 de abril de 2021 - Aceptado el 13 de septiembre de 2021

**Como citar:** Calvo, D.A., Peter, G., Gaitán, J.J. 2021. El clima modula los efectos del pastoreo sobre la productividad primaria en ecosistemas áridos de Argentina. *Ecosistemas* 30(3): 2228 <https://doi.org/10.7818/ECOS.2228>

## El clima modula los efectos del pastoreo sobre la productividad primaria en ecosistemas áridos de Argentina

**Resumen:** La introducción de fuentes de agua artificiales para uso ganadero en ecosistemas donde el agua ha estado ausente durante su evolución ha provocado cambios en la vegetación. Se ha demostrado que existe una atenuación radial del impacto del pastoreo con la distancia a la fuente de agua, favoreciendo la formación de piósferas. En Argentina, no existen estudios que evalúen cómo actúa el clima como modulador de los efectos del pastoreo en piósferas a lo largo de gradientes ambientales. El objetivo de este estudio fue evaluar y analizar el rol que juega el clima como modulador de los efectos que el pastoreo induce a escala local. Esto permitiría comprender como actúa el clima sobre los efectos del pastoreo. Para ello se seleccionaron 77 piósferas a lo largo de un gradiente climático y se analizó la variabilidad espacial de los valores de NDVI (Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada) en el gradiente de pastoreo y su relación con la precipitación media anual y la temperatura media anual. Se observaron dos patrones diferentes de respuesta del NDVI. El patrón 1 presentó un aumento del NDVI con la distancia al punto de agua, mientras que el patrón 2 manifestó un comportamiento inverso. Las piósferas de los patrones 1 y 2 se ubicaron por encima y por debajo de los 280 mm de precipitación anual y de los 14.5 °C de temperatura media anual, respectivamente. Estos resultados sugieren que existe un comportamiento diferencial de la vegetación frente al pastoreo que estaría modulado por variables climáticas.

**Palabras clave:** arbustización; desertificación; piósferas; presión del pastoreo; zonas áridas y semiáridas

## Climate modulates grazing effects on primary productivity of arid ecosystems in Argentina

**Abstract:** The introduction of artificial water sources for livestock uses in ecosystems where water has been absent during their evolution has caused changes in vegetation. It has been proven that there is a radial mitigation of grazing impact with the distance between the water sources, which encourages the formation of piospheres. In Argentina, there are no studies that evaluate how climate acts as a modulator of the effects of grazing in piospheres along environmental gradients. The objective of this study was to evaluate and analyze the role that climate plays as a modulator of effects that grazing induces on a local scale. This would allow us to understand how the climate acts on the effects of grazing. For that, 77 piospheres were selected along a climatic gradient that covers arid and semi-arid areas of Argentina and the spatial variability of the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) values in the grazing gradient were analyzed as well as its relationship with mean annual precipitation and mean annual temperature. Two different patterns of NDVI response were observed within the grazing gradient. Pattern 1 presented an increase in NDVI with distance to the water point, while pattern 2 showed a reverse effect. The piospheres of patterns 1 and 2 were located above and below 280 mm of annual precipitation and 14.5 °C of mean annual temperature, respectively. These results suggest that there is a differential effect of grazing on vegetation, and that this effect is modulated by climatic variables.

**Keywords:** desertification; drylands; grazing pressure; piosphere; shrub encroachment

## Introducción

A nivel mundial se considera a la desertificación como una problemática ambiental causada por actividades humanas (European Commission's Joint Research Centre 2016) que avanza sobre los ecosistemas áridos, semiáridos y seco subhúmedos. Provoca la degradación del suelo y la vegetación, y también, una pérdida o disminución de los servicios ecosistémicos, comprometiendo así la sostenibilidad de las comunidades que habitan en ellas (Gaitán 2017).

Más del 65% de las tierras áridas y semiáridas son utilizadas como tierras de pastoreo, en las cuales la vegetación es usada como fuente de forraje para el ganado doméstico (Millenium Ecosystem Assessment 2005). El pastoreo, junto con el clima, han sido señalados como determinantes primarios de la estructura (Gaitán et al. 2014), el funcionamiento (Oesterheld et al. 1999) y la susceptibilidad a la degradación (Reynolds et al. 1999) de dichos ecosistemas. Existe una cantidad importante de información sobre la problemática general de degradación y desertificación, atribuibles al uso ganadero de los pastizales, con antecedentes en regiones

áridas y semiáridas de Argentina (Bertiller et al. 2002; Rostagno et al. 2006; Pazos et al. 2007; Bisigato et al. 2009; Gaitán et al. 2009; Torres Robles et al. 2015) y del mundo (e.g., Sala et al. 1988; Pickup y Chewing 1994; Saltz et al. 1999). El manejo tradicional del ganado ha provocado cambios en la estructura y la composición florística de la vegetación (León y Aguiar 1985; Peter et al. 2012; Bär Lamas et al. 2013). Sin embargo, los efectos del pastoreo son variables entre los ecosistemas, y dependen de factores tales como la identidad y densidad de los herbívoros, el régimen de pastoreo, el atributo o proceso del ecosistema considerado (Milchunas y Lauenroth 1993) y la interacción con el clima (Gaitán et al. 2014).

En zonas áridas, el pastoreo por ganado doméstico se ve limitado por la distancia a la que los animales pueden alejarse de las fuentes de agua (Todd 2006). La introducción de fuentes de agua artificiales para el ganado en ecosistemas donde el agua ha estado ausente durante la evolución de éstos (D'Odorico et al. 2013) provoca un incremento de la erosión, una reducción de la cobertura de la vegetación y cambios en las propiedades químicas y físicas del suelo (Washington-Allen et al. 2004). Estos cambios reducen la productividad potencial de la tierra y la provisión de servicios ecosistémicos que brindan estos ecosistemas (Vogel y Smith 2002).

Varios trabajos demuestran que el impacto del pastoreo aumenta a medida que decrece la distancia al punto de agua (D'Odorico et al. 2013; Cheli et al. 2016) favoreciendo la formación de piósferas, definidas como la atenuación radial del impacto desde un punto concentrador (Lange 1969; Cheli et al. 2016). La necesidad del ganado de beber regularmente incrementa la intensidad de uso de las áreas cercanas a las fuentes de agua (Lange 1969; Todd 2006). Según James et al. (1999) y Todd (2006), estos gradientes ofrecen un diseño experimental adecuado para evaluar el efecto del pastoreo sobre los ecosistemas áridos y proporcionan la clave para poder estudiar de manera separada en el paisaje los efectos inducidos por el pastoreo de aquellos debidos a otros factores (Pickup 1989).

La productividad primaria neta aérea (ANPP) es un atributo funcional clave de los ecosistemas terrestres debido a sus relaciones con la biomasa animal, la productividad secundaria y el ciclo de nutrientes (McNaughton et al. 1989; Castillo et al. 2008). En las zonas áridas y semiáridas modificadas, la ANPP condiciona el potencial de producción ganadera (Oesterheld et al. 1992) y, por ello, la cantidad y estacionalidad de la producción primaria limita la densidad de herbívoros y modela las estrategias de pastoreo (Jobbágy y Sala 2000).

Se utilizó el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) como un indicador de la respuesta de la vegetación al gradiente de pastoreo. Este índice ha demostrado ser un buen indicador de la productividad primaria neta aérea, ya que está directamente relacionado con la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación (Pettorelli et al. 2005). Además, en un estudio previo realizado en los pastizales áridos de la Patagonia, Gaitán et al. (2013) analizaron la relación entre nueve índices de vegetación y atributos estructurales y funcionales de los ecosistemas y hallaron que el NDVI fue el mejor predictor de ellos.

Diversos estudios han evaluado los cambios en diferentes atributos de los ecosistemas a lo largo de gradientes de pastoreo en piósferas de zonas áridas del mundo, por ejemplo, características del suelo (Facelli y Springbett 2009), banco de semillas (Leder et al. 2015, 2017), selectividad de forraje (Bertiller y Ares 2011) y establecimiento de plántulas (Facelli y Springbett 2009). Resultados en la región de la Patagonia argentina han demostrado cambios fisiológicos y florísticos, en defensas antiherbívoros de las plantas y en cobertura de especies preferidas en función de la distancia a las fuentes de agua (Bisigato et al. 2005; Bertiller y Ares 2008; Cheli et al. 2016). Más allá de la existencia de esta información, no hay estudios en los que se hayan evaluado piósferas a lo largo de amplios gradientes ambientales.

Una mejor comprensión de los efectos del pastoreo sobre la ANPP, y el rol que juega el clima como modulador de estos efectos, puede proporcionar conocimientos fundamentales a los gestores de las tierras y a los responsables de las políticas públicas para promover un uso más sostenible de los ecosistemas áridos y se-

miáridos (Augustine y McNaughton 1998). Esto permitiría comprender el rol que juega el clima como modulador de los efectos que el pastoreo induce a escala local en los ecosistemas áridos y semiáridos. Por lo tanto, los objetivos de este estudio son: i) caracterizar los patrones de respuesta de la vegetación al gradiente de pastoreo, para lo que se utilizaron piósferas ubicadas a lo largo de un amplio gradiente ambiental en regiones áridas y semiáridas de Argentina; ii) estudiar el efecto del clima (temperaturas y precipitaciones) sobre dichos patrones de respuesta de la vegetación.

## Material y métodos

### Área de estudio

El trabajo se llevó a cabo en las eco-regiones de Monte de Llanuras y Mesetas, Monte de Sierras y Bolsones, Espinal y Estepa Patagónica de Argentina (Fig. 1) (Morello et al. 2012). La vegetación predominante es arbustivo-graminosa y el área de estudio abarca un gradiente que incluye desde arbustales con árboles aislados en el norte hasta una estepa casi exclusivamente gramínea en el sur (Torres Robles et al. 2015). La vegetación muestra una distribución en forma de "islas" dispersas en una matriz de suelo desnudo (Bertiller et al. 2004). Los parches de vegetación forman montículos fitogénicos dominados por arbustos debajo de los cuales crecen otros grupos funcionales: pastos perennes, hierbas y costras biológicas (Rostagno et al. 1991; Coronato y Bertiller 1997; Aguiar y Sala 1999; Bisigato y Bertiller 1997).

El área de estudio cuenta con un clima subtemplado seco de transición, con veranos cálidos e inviernos moderados, con temperaturas medias anuales de 12.6 °C a 18 °C y un promedio de precipitaciones anuales entre 30 y 225 mm para las eco-regiones Estepa Patagónica y Monte de Llanuras y Mesetas, respectivamente, con una variabilidad interanual elevada (Labraga y Villalba 2009; Nabte et al. 2013). Mientras que se pueden encontrar valores promedio de hasta 590 mm para las eco-regiones de Monte de Sierras y Bolsones y Espinal (Godagnone y Bran 2009). Estos cambios dentro de las variables climáticas generan un gradiente, tanto de temperaturas como de precipitaciones, que va en aumento desde el suroeste hacia el noreste de Argentina.

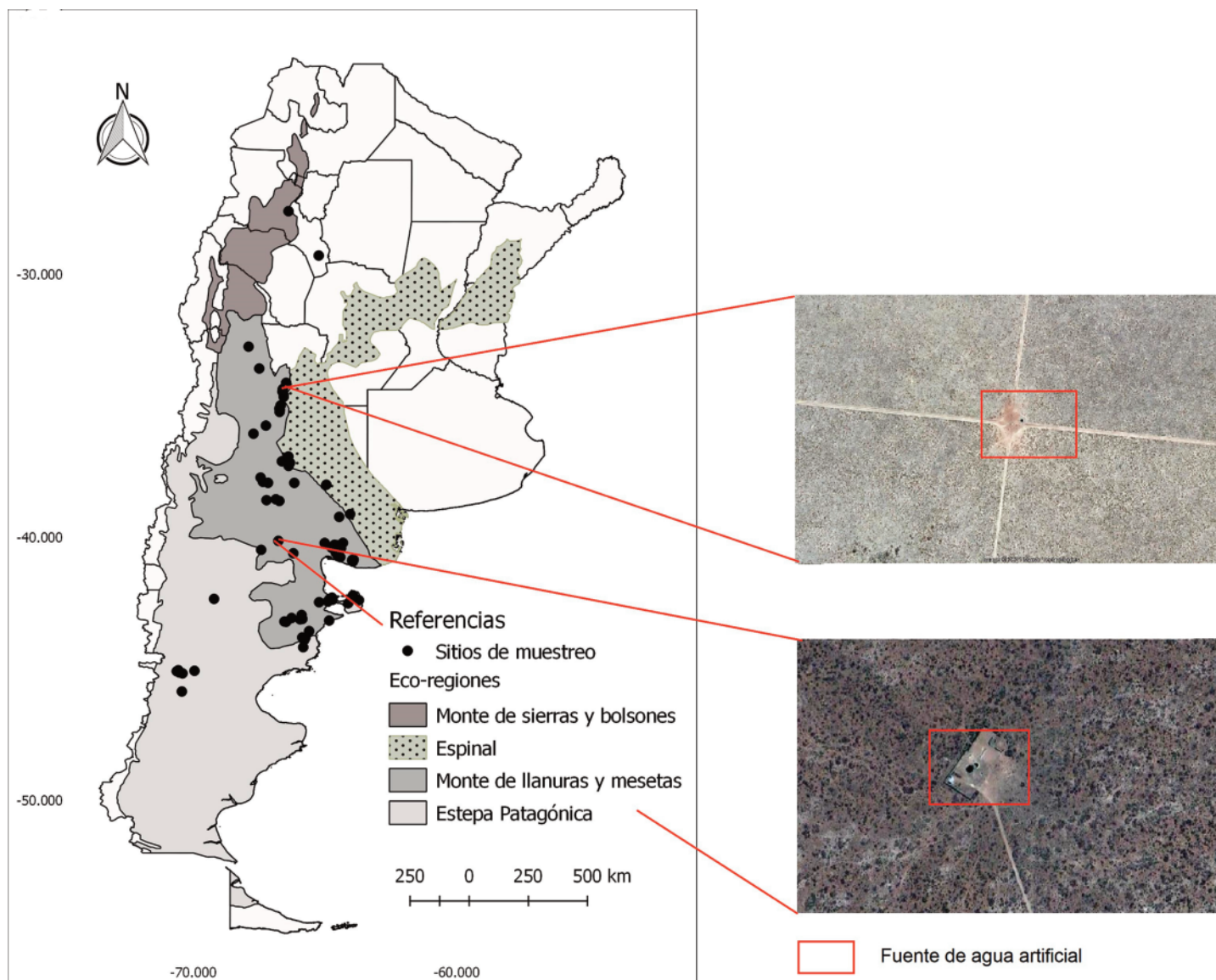
La principal actividad dentro del área es la ganadería extensiva. Además, tienen lugar incendios forestales (de origen natural y antrópico) y se practican desmontes con el objetivo de reducir la biomasa arbustiva y aumentar la accesibilidad forrajera del pastizal o para erradicar la vegetación nativa e implantar pasturas o cereales (Peter et al. 2013; Villagra y Álvarez 2019).

### Identificación y selección de piósferas

Se realizó un análisis visual exploratorio de imágenes de alta resolución GeoEye (Google Earth 2018) de las regiones áridas/semiáridas de Argentina y se seleccionaron 77 fuentes de agua artificiales considerando, dentro de un radio de 1500 metros, que las áreas cumplan con los siguientes criterios: i) que cuenten con una topografía homogénea, ii) que no se observen cambios en el sustrato geológico o cambios evidentes en el tipo de suelo, iii) que no se observen usos evidentes diferentes al pastoreo, iv) que no haya influencia de rutas, caminos internos u otra infraestructura diferente a la fuente de agua artificial, y v) que no haya solapamiento con otra fuente de agua artificial o natural dentro de la distancia indicada (Fig. 1).

### Datos de NDVI

Para obtener los patrones de respuesta de la vegetación al gradiente de pastoreo se utilizó la media del NDVI de un período de cinco años (abril de 2013 a abril de 2018) como un estimador de la productividad primaria promedio de dicho período. La media de NDVI de cada sitio se obtuvo de un promedio de 36.6 ± 14.82 imágenes. Los datos de NDVI se obtuvieron del producto USGS Landsat 8 Collection 1 Tier 1 TOA Reflectance (LANDSAT/LC08/C01/T1\_SR en Google Earth Engine), que cuentan con un pixel de 30x30 m, obtenidos mediante la plataforma Google© Earth Engine (GEE).



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio, de los sitios de muestreo y eco-regiones. Ejemplo de fuente de agua artificial seleccionada para la toma de datos. Imagen tomada con la aplicación Google© Earth. Año de la imagen: 2021.

**Figure 1.** Location of the study area, sampling sites and eco-regions. Example of artificial water source selected for data collection. Image taken with the Google© Earth application. Picture date: 2021.

Para cada punto de agua se obtuvo una curva de variación del NDVI con la distancia hasta los 1500 metros en tramos de 30 metros (50 distancias). Para esto se procedió de la siguiente manera: se calculó la media del NDVI en píxeles ubicados en cuadrados con el centro en el punto de agua; cada cuadrado contuvo al anterior y agregó 30 metros a los lados. Para obtener el valor de cada nueva distancia, se restó el promedio del NDVI del cuadrado anterior. Por lo tanto, la media del NDVI de la distancia  $n$  se obtiene de la media del NDVI de los píxeles contenidos en un cuadrado de  $2n$  de lado menos la media del NDVI de los píxeles contenidos en el cuadrado de  $2(n-30m)$  de lado.

Mediante pruebas  $t$  de Student se compararon los valores de pendiente de las curvas de NDVI de cada piósfera en secciones cada 150 m (0-150; 150-300; 300-450; 450-600; 600-750; 750-900; 900-1050; 1050-1200; 1200-1350; 1350-1500). Se tomó la distancia a la que ya no se observaron diferencias estadísticamente sig-

nificativas entre las pendientes de dos secciones consecutivas (sección  $n$  y sección  $n+1$ ) como el punto en el cual el NDVI permanece constante. Se consideraron niveles de significancia menores al 5%. Debido a que las pendientes de cada sección se diferenciaron se las pendientes de la sección consecutiva sólo hasta los 450 m de la fuente de agua artificial (Tabla 1), se consideró a ésta como la distancia límite a la que se manifestaban cambios en la respuesta de la vegetación y fueron los primeros 450 m de cada piósfera la distancia utilizada en los análisis realizados. Se usó el software de análisis estadístico Infostat versión 2020 (di Rienzo et al. 2014).

Con los datos de NDVI de cada fuente de agua, hasta los 450 metros de distancia, se realizó un análisis de conglomerados para agrupar los sitios según los principales patrones de respuesta de la vegetación ante el pastoreo. Los análisis se realizaron con el software de análisis estadístico multivariante PC-ORD (McCune y Mefford 2011).

**Tabla 1.** Prueba T para comparar medias de la pendiente del NDVI obtenida en secciones de 150 m dentro de un transecto de 1500 m desde el punto de agua, para 77 sitios (n=77) en ecosistemas áridos de Argentina. Se utilizó un nivel de significancia del 5%. Se resaltan en color gris los valores significativos.

**Table 1.** T-test to compare means of the NDVI slope variable obtained in sections of 150 m within a 1500 m transect, for 77 sites (n=77) in arid ecosystems of Argentina. Used a significance level of 5%. Significant values are highlighted in gray.

Sección n	Sección n+1	media(1)-media(2)	LI(95)	LS(95)	pHomVar	T	p-valor
0-150	150-300	0.01	0.01	0.01	<0.0001	4.79	<0.0001
150-300	300-450	-1.60E-03	-2.70E-03	-5.70E-04	<0.0001	-3.06	0.0028
300-450	450-600	-4.70E-04	-9.00E-04	-3.10E-05	0.0002	-2.12	0.0359
450-600	600-750	-4.00E-05	-4.70E-04	3.90E-04	0.114	-0.18	0.8561
600-750	750-900	-3.30E-04	-7.20E-04	5.00E-05	0.6653	-1.72	0.0879
750-900	900-1050	4.40E-04	7.80E-05	8.00E-04	0.505	2.4	0.0175
900-1050	1050-1200	-3.10E-04	-6.10E-04	7.70E-07	0.0131	-1.97	0.0506
1050-1200	1200-1350	1.70E-04	-9.80E-05	4.30E-04	0.743	1.25	0.2143
1200-1350	1350-1500	-8.80E-05	-5.70E-04	3.90E-04	<0.0001	-0.36	0.7169

### VARIABLES CLIMÁTICAS

Para cada sitio se obtuvo la precipitación media anual (PMA) y la temperatura media anual (TMA) de la base de datos WorldClim, versión 2.0 (Fick y Hijmans 2017). Los datos de PMA y TMA de esta base de datos son consistentes con datos locales medidos en estaciones meteorológicas de la región de estudio (datos no publicados).

### ANÁLISIS DE LOS DATOS

Se obtuvo una medida del efecto del pastoreo en cada sitio, calculada como la pendiente de la relación lineal entre el NDVI y la distancia a la fuente de agua. Pendientes positivas indicarían un incremento de la ANPP con la distancia a la fuente de agua conforme disminuye la presión de pastoreo. Pendientes negativas, por el contrario, indicarían mayor ANPP en las áreas más cercanas a la fuente de agua con mayor intensidad de pastoreo. Para analizar la contribución de las variables climáticas como moduladoras del efecto del pastoreo se realizaron regresiones lineales simples de las relaciones entre PMA y TMA con el efecto del pastoreo, respectivamente.

## RESULTADOS

### Identificación de patrones de respuesta de NDVI

A partir del análisis de conglomerados se detectaron dos grupos de sitios que presentan diferentes patrones de respuesta del NDVI a la presión de pastoreo (Fig. 2). El Patrón 1 se caracteriza por el aumento gradual del NDVI con la distancia a la aguada y valor de la pendiente positivo; mientras que el Patrón 2 se caracteriza por la disminución gradual del NDVI con la distancia y valor de la pendiente negativo (Fig. 3).

Se observó una relación entre los patrones de respuesta de la vegetación al pastoreo y la ubicación espacial de los sitios (Figs. 4a y 4b). Los sitios que presentaron una respuesta creciente a lo largo del gradiente de pastoreo (Patrón 1) se encuentran ubicados hacia el noreste del área de estudio, mientras que aquellos sitios que presentaron una respuesta contraria (Patrón 2), se ubican hacia el suroeste.

### Relación entre el efecto del pastoreo y las variables climáticas

Se observaron relaciones positivas del efecto del pastoreo tanto con la precipitación media anual como con la temperatura media anual (Figs. 5a y 5b). Estos resultados sugieren la existencia de valores umbrales de las variables climáticas a partir de los

cuales se producen cambios en el tipo de respuesta de la vegetación frente al pastoreo. Por encima de 280 mm de precipitación anual y de 14.5 °C de temperatura media predominan respuestas del NDVI frente al pastoreo de tipo creciente con la distancia a la fuente de agua (Patrón 1). Por debajo de dichos umbrales de precipitación y temperatura se observaron respuestas del NDVI decrecientes con la distancia a la fuente de agua (Patrón 2).

Así mismo, existe una relación positiva entre la TMA y la PMA (Fig. 5c).

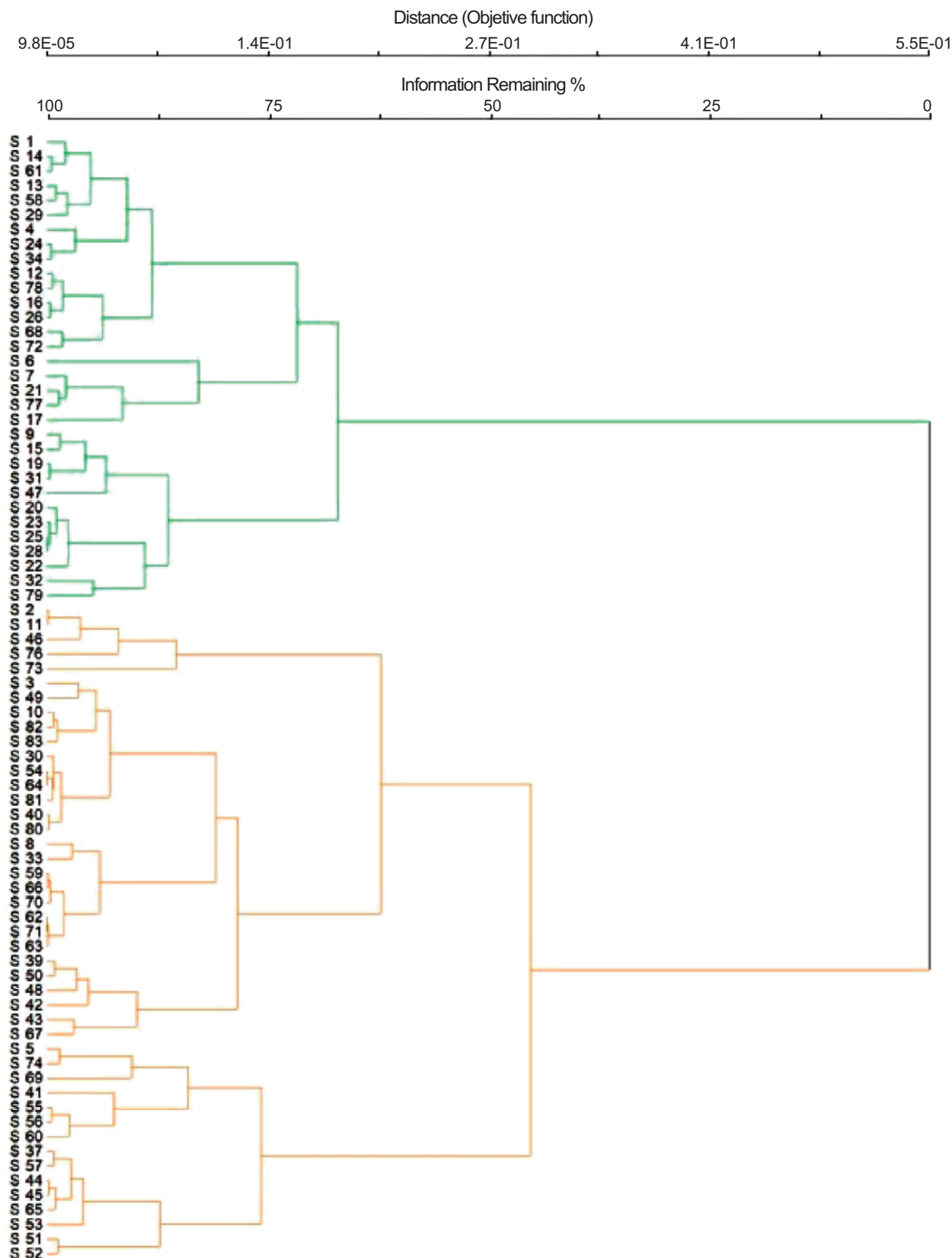
## DISCUSIÓN

A diferencia de trabajos previos en la región en los que se ha evaluado el efecto del pastoreo a nivel local (Bertiller et al. 2002; Rostagno et al. 2006; Pazos et al. 2007; Kröpfl et al. 2007; Bisigato et al. 2009; Gaitán et al. 2009; Torres Robles et al. 2015; Funk et al. 2018; Funk et al. 2019), nuestro estudio incluye la evaluación del efecto del pastoreo sobre la vegetación a lo largo de un amplio gradiente ambiental en zonas áridas y semiáridas de Argentina. Por lo tanto, esto proporciona conocimiento sobre la respuesta de la vegetación y sobre cómo el clima controla esa respuesta, a una escala regional. Hemos encontrado dos tipos de respuesta de la vegetación al pastoreo, y éstas están mediadas por la PMA y la TMA de cada uno de los sitios. Nuestros resultados sugieren que los sitios más húmedos y cálidos muestran en la mayoría de los casos la respuesta del NDVI al pastoreo típica de las piósferas, mientras que los sitios más secos y fríos se comportan en forma contraria al caso típico, presentando un aumento del NDVI en la cercanía del punto de agua.

### Identificación de patrones de respuesta de NDVI

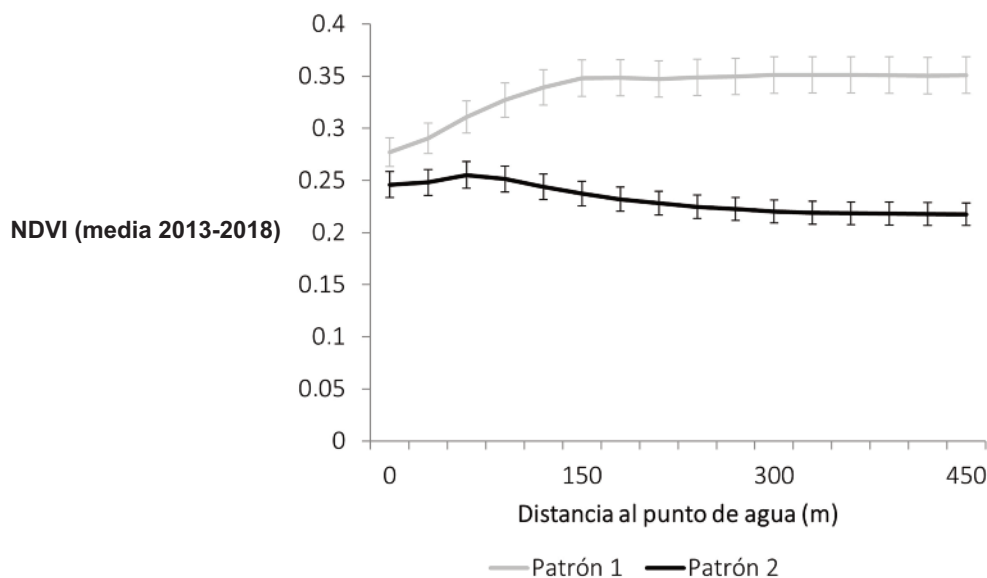
La existencia de dos patrones de respuesta del NDVI a la distancia al punto de agua indica un comportamiento diferencial de la vegetación frente al pastoreo. En el patrón 1 se observa un aumento gradual de la productividad de la vegetación con la distancia a la fuente de agua. Este tipo de respuesta se corresponde con lo generalmente reportado en estudios previos en piósferas de la región Patagónica argentina, en los que se observó una disminución de la cobertura y de la complejidad de la estructura vertical de la vegetación en la cercanía a la fuente de agua (Lange 1969; Bisigato y Bertiller 1997; Peter et al. 2012; Bär Lamas et al. 2013; Cheli et al. 2016).

En cambio, en el patrón 2 se observa una respuesta inversa de la vegetación, con una disminución gradual de la productividad con la distancia a la fuente de agua. Si bien, para la región en estudio,



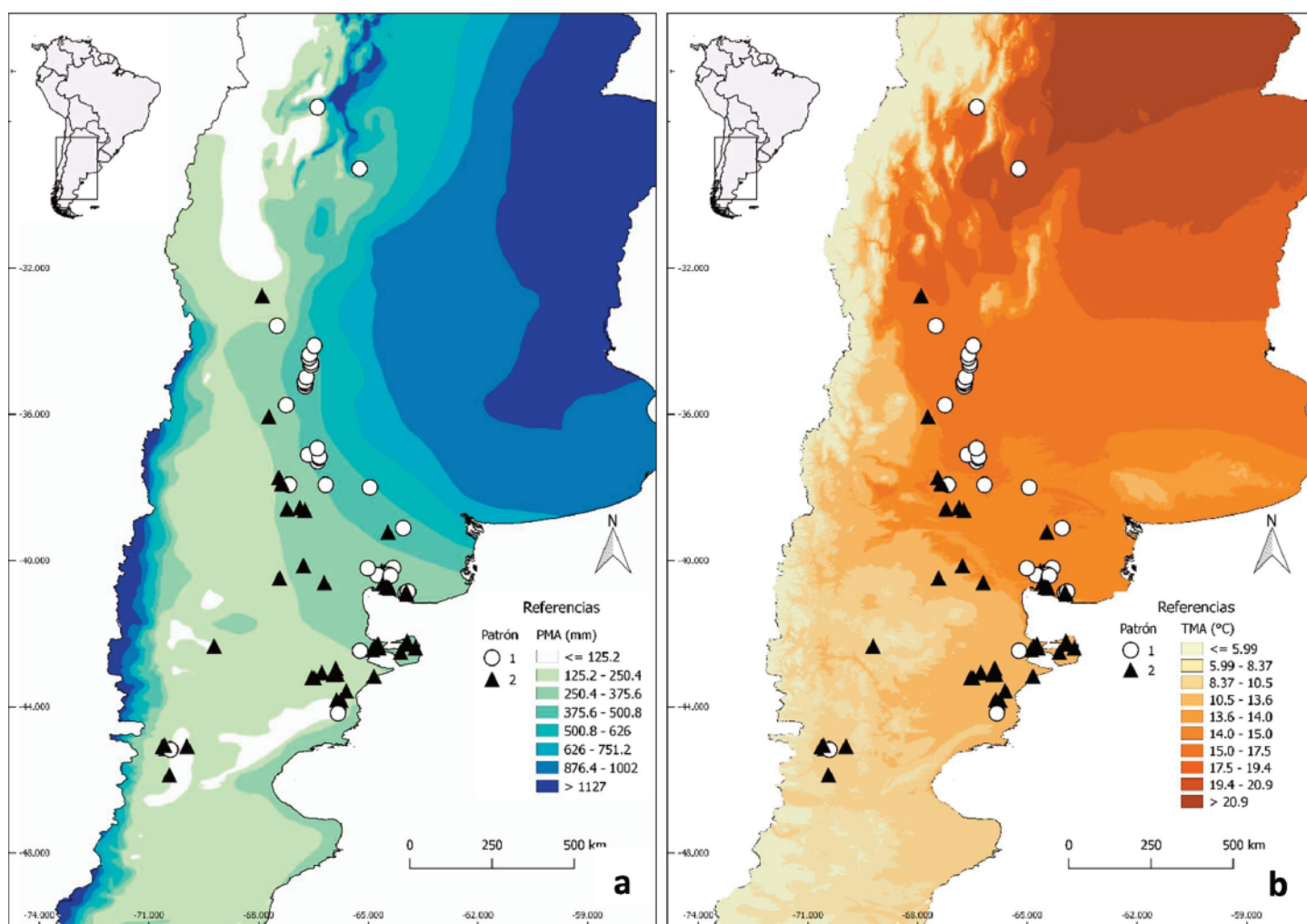
**Figura 2.** Análisis de conglomerados de los sitios con los datos de NDVI obtenido en los puntos de agua de sistemas de pastoreo en ecosistemas áridos de Argentina. Con color verde se muestran los sitios correspondientes al Patrón 1 ( $n = 32$ ) y con naranja se indica el grupo correspondiente al Patrón 2 ( $n = 45$ ).

**Figure 2.** Cluster analysis of the NDVI obtained in the water points of grazing systems in arid ecosystems of Argentina. Green shows sites corresponding to Pattern 1 ( $n = 32$ ) and orange indicates the sites corresponding to Pattern 2 ( $n = 45$ ).



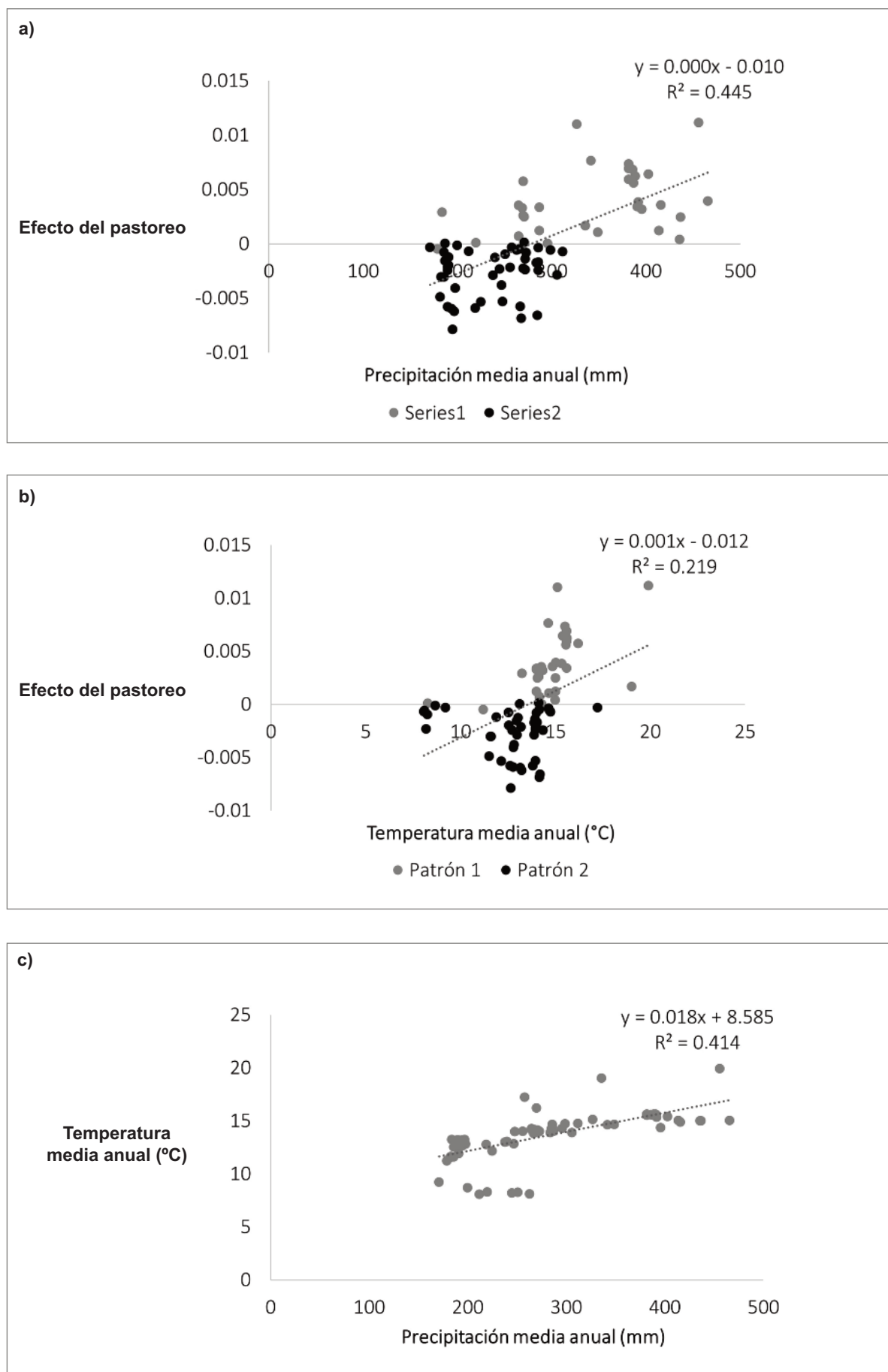
**Figura 3.** Respuesta del NDVI a la intensidad de pastoreo. Patrón 1 ( $n = 32$ ) y patrón 2 ( $n = 45$ ) identificados mediante análisis de conglomerados para los primeros 450 m desde la fuente de agua. Para graficar las curvas se utilizaron los valores medios del NDVI del período 2013-2018 para cada sitio. Las barras representan un intervalo de confianza del 95%.

**Figure 3.** NDVI response to grazing intensity. Pattern 1 ( $n = 32$ ) and pattern 2 ( $n = 45$ ) identified by analysis for the first 450 m from the water point. To graph the curves, the NDVI media values for the 2013-2018 period were used for each site. Bars represent the 95% confidence intervals.



**Figura 4. a)** Precipitación media anual (PMA) en mm. **b)** temperatura media anual (TMA) en °C, y ubicación de los sitios de muestreo de cada tipo de respuesta de la vegetación al pastoreo en ecosistemas áridos de Argentina.

**Figure 4. a)** Mean annual precipitation (PMA) in mm. **b)**, mean annual temperature (TMA) in °C, and location of sampling sites for each type of vegetation grazing response in Argentina arid ecosystems.



**Figura 5. a)** Relación entre la precipitación media anual y **b)** la temperatura media anual, con la pendiente del efecto del pastoreo sobre el NDVI, con una significancia de p-valor  $<0.0001$  (en ambos casos), en ecosistemas áridos de Argentina y **c)** relación entre la precipitación media anual y la temperatura media anual para cada sitio (Figura 5c).

**Figure 5. a)** Relationship between mean annual precipitation and **b)** mean annual temperature, with slope of grazing effect about NDVI, with a significance of p-value  $<0.0001$  (in both cases), in Argentina arid ecosystems and **c)** relationship between mean annual precipitation and mean annual temperature for each site.

existen evidencias contradictorias que señalan un aumento (Beeskow et al. 1995) o no (Peter et al. 2013) de arbustos en cercanías de la fuente de agua, este patrón de respuesta de NDVI podría indicar un proceso de arbustización. Procesos de reemplazo de especies herbáceas por leñosas han sido observados en diversas zonas áridas y semiáridas del mundo (van Auken 2000; Gibbens et al. 2005; Maestre et al. 2009) y, en muchos casos, se asocian con el incremento en la presión de pastoreo (Asner y Martin 2004; Archer et al. 2017).

### Relación entre el efecto del pastoreo y las variables climáticas

La diferencia de patrones observada en los resultados se manifiesta a partir de los 280 mm de precipitación anual. En estudios previos se menciona la existencia de un umbral cercano a 300 mm a partir del cual se ven afectados diferentes atributos de los ecosistemas áridos y semiáridos. Por ejemplo, la productividad de los suelos según sus propiedades físicas (Sala et al. 1988), la disponibilidad del nitrógeno como limitante de la PPNA (Yahdjian et al. 2011) y la sensibilidad del ecosistema a la variabilidad de la precipitación (Gherardi y Sala 2019), cambian su respuesta en ese valor de PMA. En este trabajo observamos variaciones en la respuesta de la productividad de la vegetación a la intensidad de pastoreo según la PMA de cada sitio. Esto sugiere que el pastoreo tiene efectos diferenciales sobre la vegetación a partir del mismo umbral de precipitación, es decir, alrededor de los 300 mm.

En sitios con precipitaciones mayores a 280 mm anuales, el pastoreo provoca cambios sobre el NDVI, principalmente en las áreas más cercanas a las fuentes de agua. Estos cambios podrían deberse a cambios en la estructura, como una disminución de la biomasa verde a causa del pisoteo y pastoreo por parte del ganado, observándose una respuesta similar a la hallada en otros estudios (Bisigato y Bertiller 1997; Peter et al. 2012; Bär Lamas et al. 2013; Cheli et al. 2016).

Por el contrario, aquellos sitios que se encuentran en zonas con precipitaciones menores a 280 mm anuales presentan un aumento de los valores de NDVI en cercanía de los puntos de agua. Esto podría deberse a: i) un mayor crecimiento de la vegetación en cercanía a la fuente de agua debido al incremento en la fertilidad del suelo inducida por la deposición de heces y orina del ganado (Cheli et al. 2016); ii) la ocurrencia de un reemplazo de pastos por arbustos en la zona con mayor intensidad de pastoreo, debido a que la combinación de aridez y pastoreo favorece más a las especies arbustivas, que generalmente tienen raíces más profundas, lo cual les permite acceder al agua acumulada en las capas más profundas del suelo (Schenk y Jackson 2002; Gaitán 2017) y son menos palatables que los pastos.

En cuanto a la TMA, se observa un umbral de temperatura (14 °C) que afectaría al sistema de manera similar, o complementaria, al umbral de precipitación. Según Gaitán et al. (2014), la temperatura es un factor de control importante de la estructura de la vegetación, y el incremento de dicha variable y de la severidad de las sequías tendrían un efecto negativo sobre la productividad primaria de estos ecosistemas, ya que provoca un aumento de la evapotranspiración, proporcionando mayor ventaja a aquellas especies que soportan mejor la falta de agua.

Si bien el aumento de temperatura induce mayor aridez y esto debería reflejarse en una relación negativa entre temperatura y efecto de pastoreo, nuestros resultados no muestran ese efecto. Por lo tanto, creemos que la correlación existente entre TMA y PMA indicaría que es la precipitación la variable que más impacta sobre la respuesta de la vegetación y que la temperatura por sí sola no posee tal influencia.

### Conclusión

Nuestros resultados sugieren la existencia de un umbral de precipitación (correlacionado también con un umbral de temperatura) que induce dos tipos de respuesta de la productividad de la vegetación en relación con la distancia a la fuente de agua para el ga-

nado. El análisis e identificación de estos dos patrones de respuesta de la vegetación frente al pastoreo, y cómo éstos se asocian con el clima, es clave para poder predecir en qué forma afectarían a estos ecosistemas los cambios en el manejo del pastoreo en diferentes escenarios climáticos.

El presente es un estudio observacional y fue realizado en una escala geográfica amplia. Esto nos ha permitido identificar los principales patrones de respuesta de la vegetación frente a la intensidad de pastoreo y analizar el control que ejerce el clima sobre estos patrones. A partir de estos resultados surgen nuevos interrogantes que serán abordados en futuros estudios. Por ejemplo, mediante evaluaciones en terreno se buscará responder si la mayor abundancia de vegetación en la cercanía a la fuente de agua en las zonas más áridas se debe a un mayor crecimiento de la vegetación por un aumento de la fertilidad edáfica o a la mayor presencia de arbustos ocasionada por un reemplazo de las especies de pastos. Otros aspectos que deben ser evaluados son los efectos de posibles diferencias en la carga animal o en la especie del herbívoro dominante entre las piósferas.

### Contribución de los autores

Diana Calvo: Análisis formal, Conceptualización, Investigación, Redacción - borrador original, Visualización. Guadalupe Peter: Administración del proyecto, Adquisición de fondos, Redacción - revisión y edición, Supervisión. Juan José Gaitán: Análisis formal, Metodología, Redacción - revisión y edición, Validación.

### Financiación / agradecimientos

El trabajo fue financiado por la Universidad Nacional de Río Negro (PI 40-C-654). DAC, GP y JJG son miembros de CONICET.

### Referencias

- Aguiar, M.R., Sala, O.E. 1999. Patch structure, dynamics and implications for the functioning of arid ecosystems. *Tree* 14(7):273-277
- Asner, G.P., Martin, R.E. 2004. Biogeochemistry of desertification and woody encroachment in grazing systems. *Ecosystems and Land Use Change* 153:99-116.
- Archer, S.R., Andersen, E.M., Predick, K.I., Schwinning, S., Steidl, R.J., Woods, S.R. 2017. Woody plant encroachment: causes and consequences. En: Briske D. (eds) *Rangeland Systems*, pp. 25-84. Springer Series on Environmental Management. Springer, Cham, Alemania.
- Augustine, D.J., McNaughton S.J. 1998. Ungulate effects on the functional species composition of plant communities: herbivore selectivity and plant tolerance. *Journal of Wildlife Management* 62:1165-83
- Bär Lamas, M., Larreguy, C., Carrera, A.L., Bertiller, M.B. 2013. Changes in plant cover and function traits induced by grazing disturbance in arid rangelands. *Acta ecológica* 51:66-73.
- Beeskow, A.M., Elissalde, N.O., Rostagno, C.M. 1995. Ecosystem changes associated with grazing intensity on the Punta Ninfas rangelands of Patagonia, Argentina. *Journal of Range Management* 48:517-522
- Bertiller, M.B., Ares, J.O. 2008. Sheep Spatial Grazing Strategies at the Arid Patagonian Monte, Argentina. *Rangeland Ecology, Management* 61(1):38-47.
- Bertiller, M.B., Ares, J.O. 2011. Does sheep selectivity along grazing paths negatively affect biological crusts and soil seed banks in arid shrublands? A case study in the Patagonian Monte, Argentina. *Journal of Environmental Management* 92(8):2091-2096.
- Bertiller, M.B., Ares, J.O., Bisigato, A.J. 2002. Multiscale indicators of land degradation in the Patagonian Monte, Argentina. *Environmental Management* 30(5):704-15.
- Bertiller, M.B., Bisigato, A.J., Carrera, A.L., Del Valle, H. 2004. Estructura de la vegetación y funcionamiento de los ecosistemas del Monte chubutense. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 39(3/4):139-158.
- Bisigato, A.J., Bertiller, M.B. 1997. Grazing effects on patchy dryland vegetation in northern Patagonia. *Journal of Arid Environments* (1997) 36: 639-65.



- Bisigato, A.J., Bertiller, M.B., Ares, J.O., Pazos, G.E. 2005. Effect of grazing on plant patterns in arid ecosystems of Patagonian Monte. *Ecography* 285:561-572.
- Bisigato, A.J., Villagra, P.E., Ares, J.O., Rossi, B.E. 2009. Vegetation heterogeneity in Monte Desert ecosystems: A multi-scale approach linking patterns and processes. *Journal of Arid Environments* 73(2):182-191.
- Castillo, A., Del P., Maestre, F.T., García, P., Martínez, I., Escudero, A. 2008. Evaluando el papel funcional de la biodiversidad y el patrón espacial: Una aproximación experimental utilizando la costra biológica como modelo. En: Bonet, A. (ed.) *Introducción al Análisis Espacial de Datos en Ecología y Ciencias Ambientales: Métodos y Aplicaciones*. Cap.17. Editorial Dykingson, S.L., Madrid, España. ISBN: 978-84-9849-308-5
- Cheli, G.H., Pazos, G.E., Flores, G.E., Corley, J.C. 2016. Efecto de los gradientes de pastoreo ovino sobre la vegetación y el suelo en Península Valdés, Patagonia, Argentina. *Ecología Austral* 26(2):200-211.
- Coronato, F.R., Bertiller, M.B. 1997. Climatic controls of soil moisture in an arid steppe of northern Patagonia (Argentina). *Arid Soil Research and Rehabilitation* 11(3): 277-288.
- di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, M., Tablada, L., Robledo, C. 2014. *InfoStat*. Versión 2014. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- D'Odorico, P., He, Y., Collins, S., De Wekker, S.F.J., Engel, V., Fuentes, J.D. 2013. Vegetation microclimate feedbacks in woodland-grassland ecotones. *Global Ecology and Biogeography* 22:364-379.
- European Commission's Joint Research Centre, 2016. *World Atlas of Desertification: Mapping land degradation and sustainable land management opportunities*. Tercera edición. Publications Office of the European Union. Luxemburgo.
- Facelli, J.M., Springbett, H. 2009. Why do some species in arid lands increase under grazing? Mechanisms that favour increased abundance of *Maireana pyramidata* in overgrazed chenopod shrublands of South Australia. *Austral Ecology* 34(4):588-597.
- Fick, S.E., R.J. Hijmans, 2017. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302-4315.
- Funk, F.A., Peter, G., Leder, C.V., Loydi, A., Kröpfl, A.I., Distel, R.A. 2018. The impact of livestock grazing on the spatial pattern of vegetation in north-eastern Patagonia, Argentina. *Plant Ecology and Diversity* 11(2):219-227.
- Funk, F.A., Loydi, A., Peter, G., Distel, R.A. 2019. Effect of Grazing and Drought on Seed Bank in Semiarid Patchy Rangelands of Northern Patagonia, Argentina. *International Journal of Plant Sciences* 180(4):337-344.
- Gaitán, J.J. 2017. Atributos estructurales y funcionales de los ecosistemas áridos y semiáridos de la Patagonia y su relación con factores abióticos y el uso antrópico. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Buenos Aires, Argentina.
- Gaitán, J.J., López, C., Bran, D. 2009. Efectos del pastoreo sobre el suelo y la vegetación en la estepa patagónica. *Ciencia del Suelo* 27(2):261-270.
- Gaitán, J.J., Bran, D., Oliva, G., Ciari, G., Nakamatsu, V., Salomone, J., et al. 2013. Evaluating the performance of multiple remote sensing indices to predict the spatial variability of ecosystem structure and functioning in Patagonian steppes. *Ecological indicators* 34:181-191.
- Gaitán, J.J., Bran, D., Oliva, G., Maestre, F., Aguiar, M.R., Jobbágy, E.G., et al. 2014. Vegetation structure is as important as climate for explaining ecosystem function across Patagonian rangelands. *Journal of Ecology* 102:1419-1428.
- Gherardi, L.A., Sala O.E. 2019. Effect of inter-annual precipitation variability on dryland productivity: A global synthesis. *Global Change Biology* 25(1):269-276.
- Gibbens, R.P., McNeely, R.P., Havstad, K.M., Beck, R.F., Nolen, B. 2005. Vegetation changes in the Jornada Basin from 1858 to 1998. *Journal of Arid Environment* 61(4):651-668.
- Godagnone, R.E., Bran, D.E. 2009. Inventario integrado de los recursos naturales de la provincia de Río Negro. Geología, hidrogeología, geomorfología, suelos, vegetación y fauna. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.
- James, C.D., Landsberg, J., Morton, S.R. 1999. Provision of watering points in the Australian arid zone: a review of effects on biota. *Journal of Arid Environment* 41(1):87-121.
- Jobbágy, E.G., Sala, O.E. 2000. Controls of grass and shrub aboveground production in the Patagonian steppe. *Ecological Applications* 10(2):541-549. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0541:COGASA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0541:COGASA]2.0.CO;2)
- Kröpfl, A.I., Deregius, V.A., Cecchi, G.A. 2007. Disturbios en una estepa arbustiva del Monte: cambios en la vegetación. *Ecología Austral* 17(2):257-268.
- Labraga, J.C., Villalba, R. 2009. Climate in Monte Desert: Past Trends, present conditions, and future projections. *Journal of Arid Environments* 73(2):154-163.
- Lange, R.T. 1969. The piosphere: sheep track and dung patterns. *Journal of Range Management* 22(6):396-400.
- Leder, C.V., Peter, G., Funk, F.A. 2015. Seed rain alteration related to fire and grazing history in a semiarid shrubland. *Journal of Arid Environments* 121:32-39.
- Leder, C.V., Peter, G., Funk, F.A., Peláez, D.V. 2017. Consequences of anthropogenic disturbances on soil seed bank diversity and nurse shrub effect in a semiarid rangeland. *Biodiversity and Conservation* 26:1-20. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1358-0>
- León, R., Aguiar, M. 1985. El deterioro por uso pastoril en estepas herbáceas patagónicas. *Phytocoenología* 13(2):181-196.
- Maestre, F.T., Puche, M.D., Bowker, M.A., Hinojosa, M.B., Martínez, I., García-Palacios, P., et al. 2009. Shrub encroachment can reverse desertification in Mediterranean semiarid grasslands. *Ecology Letters* 12(9):930-941.
- McCune, B., Mefford, M.J. 2011. PC-ORD. Multivariate Analysis of Ecological Data. Version 6. MjM Software, Gleneden Beach, Oregon, Estados Unidos.
- McNaughton, S.J., Oesterheld, M., Frank, D.A., Williams, K.J. 1989. Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature* 341(6238):142-144.
- Milchunas, D.G., Lauenroth, W.K. 1993. Quantitative effects of grazing on vegetation and soils over a global range of environments. *Ecological Monographs* 63(4):327-66.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Desertification Synthesis*. World Resources Institute. Washington, DC. Estados Unidos.
- Morello, J., Matteucci, S., Rodríguez, A.F., Silva, M. 2012. *Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos*. Orientación Gráfica Editora. Buenos Aires, Argentina.
- Nabte, M.J., Marino, A.I., Rodríguez, M.V., Monjeau, A., Saba, S.L. 2013. Range Management Affects Native Ungulate Populations in Península Valdés, a World Natural Heritage. *PLoS ONE* 8(2):1-7.
- Oesterheld, M., Sala, O.E., McNaughton, S.J. 1992. Effect of animal husbandry on herbivore carrying capacity at the regional scale. *Nature* 356:234-236.
- Oesterheld, M., Loreti, J., Semmartin, M., Paruelo, J.M. 1999. Grazing, fire, and climate effects on primary productivity of grasslands and savannas. *Ecosystems of Disturbed Ground* 11:287-305.
- Pazos, G.E., Bisigato, A.J., Bertiller, M.B. 2007. Abundance and spatial patterning of coexisting perennial grasses in grazed shrublands of the Patagonian Monte. *Journal of Arid Environments* 70(2):316-328.
- Peter, G., Funk, F.A., Loydi, A., Casalini, A.I., Leder, C.V. 2012. Variación de la composición y cobertura específicas del pastizal bajo diferentes presiones de pastoreo en el Monte Rionegrino. *Phyton* 81:233-237.
- Peter, G., Funk, F.A., Torres Robles, S.S. 2013. Responses of vegetation to different land-use histories involving grazing and fire in the North-east Patagonian Monte, Argentina. *The Rangeland Journal* 35(3):273-283.
- Pettorelli, N., Vik, J.O., Mysterud, A., Gaillard, J., Tucker, C.J., Stenseth, N.C. 2005. Using the satellite derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution* 20(9):503-510.
- Pickup, G. 1989. New land degradation survey techniques for arid Australia: problems and prospects. *Australian Rangeland Journal* 11(2):74-82.
- Pickup, G., Chewings, V.H. 1994. A grazing gradient approach to land degradation assessment in arid areas from remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing* 15(3): 597 - 617. <https://doi.org/10.1080/01431169408954099>
- Reynolds, J.F., Virginia, R.A., Kemp, P.R., De Soyza, A.G., Tremmel, D.C. 1999. Impact of drought on desert shrubs: effects of seasonality and degree of resource island development. *Ecology Monography* 69(1):69-106.

- Rostagno, C.M., del Valle, H.F., Videla, L. 1991. The influence of shrubs on some chemical and physical properties of an aridic soil in north-eastern Patagonia, Argentina. *Journal of Arid Environments* 20(2):179-188.
- Rostagno, C.M., Defossé, G.E., del Valle, H.F. 2006. Postfire Vegetation Dynamics in Three Rangelands of Northeastern Patagonia, Argentina. *Rangeland Ecology and Management* 59(2):163-170.
- Sala, O.E., Parton, W.J., Joyce, L.A., Lauenroth, W.K. 1988. Primary production of the central grassland region of the United States. *Ecology* 69(1):40-45.
- Saltz, D., Schmidt, H., Rowen, M., Karnieli, A., Ward, D., Schmidt, I. 1999. Assessing grazing impacts by remote sensing in hyper-arid environments. *Journal of Range Management* 52(5):500-507.
- Schenk, H.J., Jackson, R.B. 2002. Rooting depths, lateral root spreads and belowground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology* 90(3):480-494.
- Todd, S.W. 2006. Gradients in vegetation cover, structure and species richness of Nama-Karoo shrublands in relation to distance from livestock catering points. *Journal of Applied Ecology* 43(2):293-304.
- Torres Robles, S., Arturi, M., Contreras, C., Peter, G., Zeberio, J.M. 2015. Variaciones geográficas de la estructura y composición de la vegetación leñosa en el límite entre el espinal y el monte en el Noreste de la Patagonia Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 50(2):209-215.
- Van Auken, O.W. 2000. Shrub invasions of North American semiarid grasslands. *Annual Review of Ecology and Systematics* 31(1):197-215.
- Villagra, P.E., Alvarez, J.A. 2019. Determinantes ambientales y desafíos para el ordenamiento forestal sustentable en los algarrobales del Monte, Argentina. *Ecología Austral* 29(1):146-155.
- Vogel, C.H., Smith, J. 2002. Building social resilience in arid ecosystems. En: Reynolds, J.F., Stafford Smith, M. (eds.) *Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?*, pp. 149-166. Dahlem University Press, Berlin, Alemania.
- Washington-Allen, R., Van Niel, T., Ramsey, R., West, N.E. 2004. Remote sensing-based piosphere analysis. *GIS Science and Remote Sensing* 41(2):136-154. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.41.2.136>
- Yahdjian, L., Gherardi, L., Sala, O.E. 2011. Nitrogen limitation in arid-sub-humid ecosystems: A meta-analysis of fertilization studies. *Journal of Arid Environments* 75(8):675-680.