

NOTA

EFFECTOS DEL PASTOREO SOBRE EL SUELO Y LA VEGETACIÓN EN LA ESTEPA PATAGÓNICA

JUAN JOSÉ GAITÁN*; CARLOS RODOLFO LÓPEZ & DONALDO EDUARDO BRAN

INTA, EEA Bariloche, Área de Investigación de Recursos Naturales. C.C. 277 - S.C. de Bariloche (8400) Río Negro – Argentina.

*jgaitan@bariloche.inta.gov.ar

Recibido: 28-12-08

Aceptado: 13-10-09

RESUMEN

La ganadería ovina durante más de 100 años produjo grandes cambios en los ecosistemas y es una de las principales causas de la desertificación en la estepa patagónica. Este trabajo tiene por objetivo evaluar los efectos del pastoreo sobre el suelo y la vegetación mediante la aplicación de una versión modificada de la metodología «Landscape Function Analysis» desarrollada en Australia. El estudio se realizó en siete sitios con distintos niveles de degradación por pastoreo en Pilcaniyeu (noroeste de Río Negro): tres clausurados al pastoreo (CLA), tres bajo pastoreo moderado (PM) y uno bajo pastoreo intenso (PI). Se evaluaron indicadores de la composición florística y estructura espacial de la vegetación, del estado de la superficie del suelo en los interparches, los cuales fueron integrados en tres Índices de Función (Estabilidad -EST-, Infiltración -INF- y Reciclaje de nutrientes -NUT-) y el stock de carbono orgánico (CO). Al incrementarse la intensidad de pastoreo se observó una disminución en la cobertura basal de la vegetación (47,4; 23,2 y 17,4% en CLA, PM y PI, respectivamente), parches vegetados más distanciados entre sí (61,9; 117,9 y 181,7 cm), menor cobertura de gramíneas palatables (26,3; 3,4 y 2,1%) y mayor de no palatables (4,4; 15,8 y 17,6%). También se observó una tendencia a disminuir en los Índices de Función del suelo (EST: 43,0; 42,3 y 36,2; INF: 48,3; 41,7 y 36,2; NUT: 33,1; 23,5 y 18,1) y del CO (33,8; 26,5 y 7,9 t/ha) al incrementarse la intensidad de pastoreo. Se requieren más estudios para adaptar esta metodología a las condiciones de Patagonia y testear con datos experimentales de que manera los índices reflejan adecuadamente los procesos y funciones de estos ecosistemas.

Palabras clave. Salud edáfica, sobrepastoreo, zonas áridas y semiáridas.

GRAZING EFFECTS ON SOIL AND VEGETATION IN THE PATAGONIAN STEPPE

ABSTRACT

More than 100 years of sheep breeding has caused profound changes to ecosystems and is one of the main causes of desertification in the Patagonian steppe. The aim of this study was to evaluate sheep grazing effects on soils and vegetation, applying a modified version of the «Landscape Function Analysis» methodology developed in Australia. The study was carried out in seven sites with different levels of degradation caused by overgrazing in the Pilcaniyeu area (northwest of Río Negro province): three of the sites are closed to grazing (CLA), three are under moderate grazing (PM) and one is under heavy grazing (PI). We evaluated indicators of floristic composition and vegetation spatial structure, soil surface status on interpatches, integrated into three Indices of Function (Stability-EST-Infiltration-INF-and Nutrient cycling-NUT-), and soil organic carbon stock (CO). With increasing grazing intensity, a reduction in vegetation basal cover was observed (47.4, 23.2 and 17.4% in CLA, PM and PI, respectively), vegetated patches were more distant from one another (61.9, 117.9 and 181.7 cm), coverage of palatable grasses dropped (26.3, 3.4 and 2.1%) and that of non-palatable grasses increased (4.4, 15.8 and 17.6%). The Soil Function Indices (EST: 43.0; 42.3 and 36.2; INF: 48.3, 41.7 and 36.2; NUT: 33.1, 23.5 and 18.1) and CO (33.8, 26.5 and 7.9 t/ha) showed a downward trend with increasing grazing intensity. Further studies and more experimental data are required to be able to adapt this methodology to Patagonian conditions and to test whether the indices adequately reflect the processes and functions of these ecosystems.

Key words. Soil health, overgrazing, arid and semiarid zones.

INTRODUCCIÓN

El avance de la desertificación es uno de los mayores problemas ambientales que afectan a la región Patagónica extrandina semiárida (del Valle *et al.*, 1997). En esta región la principal actividad agropecuaria es el uso ganadero extensivo, donde los pastizales naturales son utilizados como fuente de forraje para el ganado doméstico. La excesiva presión de pastoreo es una de las principales causas de la desertificación de estas tierras (León & Aguiar, 1985; Golluscio *et al.*, 1998).

La introducción de animales domésticos en la Patagonia, principalmente ovinos con fines productivos, se produjo a principios del siglo pasado. Los primeros colonos realizaron un manejo de los pastizales naturales basado en experiencias que habían sido generadas en ecosistemas muy diferentes a los cuales pretendieron aplicarse (Paruelo *et al.*, 1993). Este manejo produjo profundos cambios en los suelos y en la estructura y composición florística de la vegetación (León & Aguiar, 1985; Perelman *et al.*, 1997; García Martínez, 2005).

En ecosistemas de zonas áridas y semiáridas, debido a la escasez de agua, la vegetación se presenta en forma discontinua siguiendo un patrón de dos fases compuesto por parches vegetados e interparches de suelo desnudo (Noy Meir, 1973). Ambas fases están relacionadas funcionalmente en sistemas de fuente-destino donde los interparches actúan como fuente de agua, sedimentos y nutrientes para los parches vegetados (Aguilar & Sala, 1999). Por lo tanto, para mantener las funciones de estos ecosistemas es muy importante la conservación de atributos de los parches vegetados tales como número, tamaño y distribución espacial (Ludwig & Tongway, 1995). El estado de la superficie en los interparches también es relevante para el funcionamiento de los ecosistemas ya que su degradación puede alterar la dinámica de las relaciones fuente-destino. Una excesiva presión de pastoreo puede ir en detrimento de la capacidad de los parches vegetados para actuar como sumideros de recursos, de manera que el paisaje en su conjunto tendría más pérdidas. A ello puede contribuir tanto un aporte excesivamente rápido o cuantioso, procedente de los interparches, como la incapacidad de los parches vegetados para retenerlo.

En la década del '90 en el marco del Proyecto de Cooperación Técnica entre la Argentina y Alemania se realizaron considerables esfuerzos en el análisis y evaluación del estado actual de la desertificación en la Patagonia (INTA-GTZ, 1995). Sin embargo, actualmente no se dispone de un sistema regional de monitoreo a largo plazo que permita detectar la tendencia del proceso de desertificación. El cambio de un ecosistema funcional a uno degradado puede ser irreversible cuando se ha atravesado un determinado umbral (Friedel, 1991; Laycock, 1991). El sistema de monitoreo debe permitir identificar tales umbrales y proporcionar alertas tempranas que permitan tomar decisiones de manejo para frenar y revertir el problema.

La metodología propuesta para el monitoreo de la desertificación en Patagonia se basa en una adaptación de la metodología «Landscape Function Analysis» desarrollada en Australia por Tongway & Hindley (2004). Esta metodología parte de la hipótesis de que las unidades de un paisaje interactúan entre ellas, siendo funcionales a varias escalas. Un paisaje sería funcional cuando las pérdidas totales fueran bajas, independientemente de las redistribuciones internas (Ludwig & Tongway, 1997; Tongway *et al.*, 2004). Esta metodología se basa en la evaluación de la capacidad de los parches e interparches de regular el flujo de recursos.

Los objetivos de este trabajo fueron:

Evaluar los efectos del pastoreo sobre el suelo y la vegetación mediante la aplicación de una metodología basada en indicadores edáficos y de la vegetación.

Evaluar la potencialidad de la metodología propuesta para integrar un sistema de monitoreo de la desertificación en la estepa patagónica.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue realizado en el campo experimental de INTA EEA S.C. de Bariloche, ubicado en las proximidades de la localidad de Pilcaniyeu (70° 35' 21'' O; 41° 01' 42'' S), provincia de Río Negro. El área se encuentra dentro del Distrito Occidental de la Provincia Fitogeográfica Patagónica (León *et al.*, 1998). El clima se caracteriza por un exceso de humedad en los meses de invierno y un moderado a fuerte déficit hídrico en la época estival. La precipitación media anual es de 280 mm. La temperatura media del mes más cálido es de 15 °C (enero) y la del mes más frío es de 2,1 °C (julio) (Bustos & Rocchi, 1993).

Se seleccionaron tres áreas ubicadas sobre la unidad de plano alto en paisajes de mesetas sedimentarias disectadas por cañadones. Los sitios de muestreo en cada área fueron los siguientes:

- Área 1. Clausura de 12 años (CLA1); pastoreo moderado (PM1); pastoreo intenso (PI1) (Fig. 1).
- Área 2. Clausura de 30 años (CLA2); pastoreo moderado (PM2).
- Área 3. Clausura de 28 años (CLA3); pastoreo moderado (PM3).

En cada sitio se dispusieron tres transectas paralelas de 50 metros (distanciadas a 5 metros entre sí) orientadas en la dirección dominante del flujo de recursos (dirección del viento). Sobre estas transectas se realizan evaluaciones de indicadores de la vegetación y del suelo:

Composición florística de la vegetación

Sobre dos de las transectas se realizaron censos de vegetación de acuerdo al método de intercepción de puntos (Mueller-Dombois & Ellenberg, 1974). En cada transecta se bajó una aguja cada 50 cm y se registró el tipo de cobertura interceptada (especie vegetal, suelo desnudo o mantillo). En total se tomaron 200 registros por sitio con los cuales se calculó el porcentaje de cobertura de cada especie, las cuales fueron agrupadas en tres grupos funcionales:

- 1- ARB: cobertura de arbustos.
- 2- GP: cobertura de gramíneas palatables para el ganado.
- 3- GNP: cobertura de gramíneas no palatables para el ganado.

Estructura espacial de la vegetación

En la transecta restante se registró la longitud de los interparches de suelo desnudo y la longitud y ancho de los parches vegetados. A partir de estos datos se derivaron seis índices de la estructura espacial de la vegetación:



Figura a.



Figura b.



Figura c.

Figura 1. CLA1: Clausura de 12 años (a); PM1: pastoreo moderado (b); PI1: pastoreo intenso (c).

Figure 1. CLA1: 12 years enclosure (a); PM1: moderate grazing (b); PI1: intense grazing (c).

1- COB: cobertura basal de vegetación perenne (sumatoria de las longitudes de los parches vegetados dividido la longitud total de la transecta)

2- LMI: longitud media de los interparches

3- LMP: longitud media de los parches

4- AMP: ancho medio de los parches

5- NP10: número de parches cada 10 m

6- ISD: índice de suelo desnudo: $LMI \times [(100 - COB)/100]$

Estado de la superficie del suelo en los interparches

Los primeros 10 interparches de suelo desnudo mayores a 40 cm de longitud de la transecta fueron caracterizados a partir de 11 indicadores de la superficie del suelo. 10 de estos indicadores se evaluaron en forma visual, mientras que el restante surgió del cálculo de la COB. En la Tabla 1 se resume la metodología de evaluación de cada uno de estos indicadores.

Los 11 indicadores se combinaron luego, de acuerdo a la función del suelo a la que están asociados, en tres índices:

1- EST: Índice de Estabilidad o resistencia a la erosión.

2- INF: Índice de Infiltración.

3- NUT: Índice de Reciclaje de nutrientes.

En la Tabla 2 se muestran los indicadores que contribuyen a cada índice. Para el cálculo de los índices se sumaron los valores de clase de cada indicador y se expresó como porcentaje del valor máximo posible.

Complementariamente en cada sitio se tomaron muestras de suelo cada 10 cm de profundidad hasta el contacto con la roca que fue de 10 cm en un sitio y entre 40 y 50 cm en el resto. Se tomaron 4 repeticiones por profundidad en cada sitio, las muestras fueron secadas al aire y se determinó la concentración de carbono orgánico (CO) por el método de combustión húmeda de Walkey y Black (Sparks, 1996). Además, en cada sitio se determinó la densidad aparente de los primeros 5 cm del suelo por el método del cilindro (5 repeticiones por sitio), dato que se utilizó para calcular el contenido de CO por unidad de superficie (Stock de CO).

Se analizó la relación entre los índices e indicadores mediante análisis de correlación. Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para ordenar los sitios en los ejes que explican la mayor variación de los datos. Este análisis permitió identificar los índices e indicadores más asociados a los principales ejes de variación y determinar si los sitios con diferente estado de degradación se diferenciaron a lo largo de tales ejes.

Para analizar las diferencias en el estado de degradación entre los sitios clausurados al pastoreo (CLA) y los sitios bajo pastoreo moderado (PM) se realizó Análisis de Varianza (ANVA) utilizando como variables de respuesta los indicadores e índices de suelo y vegetación: ARB, GP, GNP, COB, LMI, LMP, AMP, NP10, ISD, EST, INF, NUT, Stock de CO. El sitio bajo pastoreo intenso (PI) no fue incluido en el ANVA dado que se contó con una sola repetición, pero se evaluó si los valores de los índices e indicadores estaban o no incluidos dentro de los intervalos de confianza de la media de los sitios CLA y PM.

Tabla 1. Indicadores utilizados para evaluar el estado de la superficie del suelo.
Table 1. Indicators used to assess soil surface status.

INDICADOR	DESCRIPCIÓN Y MODO DE EVALUACIÓN	CLASES
Cobertura del suelo	<p>Evalúa en qué grado la superficie del interparche resiste el impacto de las gotas de lluvia. Tiene en cuenta la proyección vertical de la cobertura vegetal perenne que se encuentra a una altura no mayor a 50 cm, incluye también a las rocas por su rol en la protección de la superficie del suelo.</p> <p>Se excluye:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.- La cobertura de especies anuales. 2.- La cobertura de perennes a una altura mayor a 50 cm, debido a que las gotas que caen desde el follaje desde alturas superiores poseen alta erodabilidad. 3.- El mantillo (que se tiene en cuenta en un indicador individual). 	<p>Cobertura:</p> <p>1 = <1%, 2 = 1-15%, 3 = 15-30%, 4 = 30-50%, 5 = >50%</p>
Cobertura basal de los parches	<p>Evalúa la contribución de los parches para retardar los escurrimientos superficiales. Se utiliza el dato de cobertura basal (COB) obtenido de la «lectura» de la transecta de Estructura espacial de la vegetación.</p>	<p>Cobertura:</p> <p>1 = < 5%, 2 = 5 – 10%, 3 = 10 – 20%, 4 = 20 – 30%, 5 = 30 – 40%, 6 = 40 – 50%, 7 = > 50%.</p>
Cobertura de mantillo	<p>Evalúa la disponibilidad de restos vegetales para su descomposición y reciclaje de nutrientes. Incluye las heces. Se evalúan 3 propiedades del mantillo en el siguiente orden:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Cobertura 2) Origen <p>-Local (L): el mantillo se acumula y descompone donde cae.</p> <p>-Transportado (T): el mantillo ha sido transportado por el agua o viento.</p> <ol style="list-style-type: none"> 3) Grado de incorporación <p>-Baja (B): el mantillo se encuentra esparcido sobre la superficie con pocos signos de incorporación y descomposición.</p> <p>-Moderada (M): el mantillo se encuentra en íntimo contacto con el suelo, algunos fragmentos pueden estar parcialmente enterrados.</p> <p>-Alta (A): la mayor parte del mantillo se encuentra incorporada al suelo.</p>	<p>Cobertura:</p> <p>1 = <1%, 2 = 1-10%, 3 = 10-25%, 4 = 25-50%, 5 = >50%</p> <p>Origen:</p> <p>Local (L), Transportado (T).</p> <p>Incorporación: Baja (B), Moderada (M), Alta (A).</p>
Cobertura de criptógamas	<p>Incluye hongos, algas, líquenes, los cuales estabilizan y ayudan a proteger la superficie del suelo y contribuyen al reciclaje de nutrientes.</p>	<p>Cobertura:</p> <p>0 = No hay, 1 = < 1%, 2 = 1-5%, 3 = 5-10%, 4 = >10%</p>
Presencia y rotura de costras	<p>Evalúa en qué grado las costras del suelo están rotas dejando material de suelo suelto disponible para ser erosionado.</p>	<p>0= No hay o cubren < 25%, 1 = presentes, muy rotas, 2= presentes, moderadamente rotas, 3 = presentes, levemente rotas, 4 = presentes e intactas.</p>
Pérdida de suelo por erosión	<p>Este indicador se refiere a los signos visibles de pérdida de suelo por erosión eólica, hídrica o combinada a pequeña escala.</p> <p>-Surcos y canalículos: son canales formados por el escurrimiento lineal de agua. Los surcos tienen menos de 30 cm de profundidad y las cárcavas más de 30 cm. Su presencia indica que el agua escurre rápidamente fuera del paisaje, transportando partículas de suelo, materia orgánica, nutrientes, mantillo.</p> <p>-Pavimentos: capa residual de piedras pequeñas, producida por la pérdida de las partículas más finas del suelo, debido a la acción del viento y/o agua.</p> <p>-Pedestales: se forman como resultado de la pérdida de suelo dejando columnas de suelo remanentes asociadas a la vegetación.</p>	<p>1= surcos > 10 cm ancho y/o pavimentos + 50% y/o pedestales > 10 cm alto, 2= surcos 2-10 cm ancho y/o pavimentos 10 – 50 % y/o pedestales 5-10 cm alto, 3= canalículos < 2 cm ancho y/o pavimentos < 10% y/o pedestales < 5 cm de alto, 4= no se observan surcos, canalículos, pavimentos ni pedestales.</p>
Materiales depositados	<p>Evalúa en qué grado los materiales transportados son depositados en los interparches. Estos materiales no están consolidados, por lo tanto, pueden ser fácilmente retransportados.</p>	<p>Cobertura:</p> <p>1= > 50%, 2 = 20 – 50%, 3= 5 – 20%, 4= 0 - 5 %</p>

Tabla 1. *Continuación.*
Table 1. *Continue.*

INDICADOR	DESCRIPCIÓN Y MODO DE EVALUACIÓN	CLASES
Microtopografía	Evalúa la rugosidad de la superficie dada su capacidad de capturar y retener recursos móviles tales como agua, propagulos y mantillo.	1= < 3mm, 2= 3 – 8 mm, 3= 8 – 25 mm, 4= 25 – 100 mm, 5= > 100 mm
Resistencia de la superficie	Evalúa cuan fácilmente el suelo puede ser disturbado mecánicamente produciendo sedimentos sueltos disponibles para ser erosionados. Esta evaluación debe realizarse sobre suelo seco. Un suelo muy duro posee alta resistencia mecánica pero muy baja capacidad de infiltración, esto es tenido en cuenta en la ponderación de los índices.	1= suelto no coherente, 2= costra débil que se rompe fácilmente con un dedo, 3= costra moderadamente dura, 4= costra muy dura, se necesita un implemento de metal para romperla.
Slake test	Evalúa la estabilidad de la superficie frente a un humedecimiento rápido. Se toma un agregado de la zona central del interparque, se sumerge en agua y se observa su evolución.	0= no se forman agregados, 1= fragmentos colapsan < 5 segundos, 2= 5-20 segundos, 3= 20-60 segundos, 4 = +60 segundos.
Textura	Se clasifica la textura de la superficie del suelo para ello se toma una pequeña muestra de suelo del sector central del interparque y se determina la textura al tacto, para lo cual se debe humedecer la muestra.	1= Arcillosa, 2= Franco arcillosa, 3= Franco limosa a franco arenosa, 4= Franco arenosa a arenosa.

Tabla 2. Indicadores utilizados para el cálculo de los 3 índices de función del suelo: índice de Estabilidad (EST), índice de Infiltración (INF) e índice de Reciclaje de Nutrientes (NUT). Entre paréntesis figura el rango de clases posibles de cada indicador.

Table 2. Indicators used to calculate 3 soil function indices: Stability index (EST), Infiltration index (INF) and Recycling Nutrients index (NUT). The range of possible classes for each indicator is in parenthesis.

Índice de Estabilidad (EST)	Índice de Infiltración (INF)	Índice de Reciclaje de Nutrientes (NUT)
Cobertura del suelo (1-5)	Cobertura basal de los parches (1-7)	Cobertura basal de los parches (1-7)
Cobertura de mantillo (1-5)	Cobertura, origen y descomposición del mantillo ¹ (0-20)	Cobertura, origen y descomposición del mantillo ¹ (0-20)
Cobertura de criptogamas (0-4)	Microtopografía (1-5)	Cobertura de criptogamas (0-4)
Presencia y rotura de costras (0-4)	Resistencia de la superficie ² (1-10)	Microtopografía (1-5)
Pérdida de suelo por erosión (1-4)	Slake test (0-4)	
Materiales depositados (1-4)	Textura (1-4)	
Resistencia de la superficie (1-4)		
Slake test (0-4)		
Valor máximo: 34	Valor máximo: 50	Valor máximo: 36

¹ La contribución del mantillo a este índice se calcula multiplicando el valor de clase de cobertura por los siguientes factores:

- a. Para mantillo transportado (T) o con incorporación baja (B) al suelo: Factor 1,0; b. Mantillo de origen local (L): Factor 1,5
c. Mantillo con incorporación moderada (M): Factor 1,7; d. Mantillo con incorporación alta (A): Factor 2,0

² La capacidad de infiltración es reducida en superficies compactas. Por lo tanto para el cálculo del índice de infiltración los valores de clase de este indicador son reasignados de la siguiente manera: Clase 4 = 1; Clase 3 = 3,3; Clase 2 = 6,6; Clase 1 = 10

RESULTADOS

De los 77 pares posibles de combinaciones entre los índices e indicadores, 22 (28,6%) se correlacionaron significativamente con $p < 0,05$ y 11 (14,3%) con $p < 0,01$ (Tabla 3).

De los índices de función del suelo, INF y NUT se asociaron positivamente con GP, COB y LMP y negativamente con GNP, LMI e ISD, mientras que EST no se asoció con ningún otro índice o indicador. El stock de CO se asoció negativamente con LMI e ISD. De los indicadores de la composición florística de la vegetación,

ARB no mostró ninguna asociación con otros índices o indicadores, GP se asoció positivamente con COB, LMP, AMP, INF y NUT, mientras que GNP se asoció con las mismas variables pero en forma inversa. De los indicadores de la estructura de la vegetación, NP10 no presentó ninguna asociación con otros índices o indicadores, COB se asoció en forma positiva con LMP y en forma negativa con LMI e ISD.

El eje 1 del Análisis de Componentes Principales explicó una proporción alta (66,9%) de la variación total y permitió diferenciar los sitios clausurados al pastoreo, que se ubicaron del lado positivo, de los sitios bajo pastoreo, que se ubicaron hacia el lado negativo (Fig. 1). El eje 2 explicó una proporción menor (16,4%) de la variación total y su Eigenvalue fue menor al Broken stick Eigenvalue (Tabla 3). Esto sugiere que existe un gradiente principal, dado por el eje 1, que podría interpretarse como un gradiente de degradación por pastoreo dado que GP, COB, LMP, AMP, INF, NUT y Stock CO se asociaron positivamente y GNP, LMI e ISD se asociaron en forma negativa con este eje.

Al incrementarse la intensidad de pastoreo se observó una disminución en la cobertura basal de la vegetación, parches vegetados más pequeños y más distanciados entre sí, disminuyó la cobertura de gramíneas palatables y aumentó la de gramíneas no palatables, la cobertura de ar-

bustos fue similar entre CLA y PM y disminuyó en PI. También se observó una tendencia de los índices de función del suelo a disminuir con el incremento de la intensidad de pastoreo, aunque las diferencias no fueron estadísticamente significativas entre CLA y PM para los índices EST e INF. Se halló una tendencia similar en el stock de CO que fue levemente menor en PM respecto a CLA, aunque esta diferencia no fue estadísticamente significativa, y disminuyó en forma marcada en PI.

DISCUSIÓN

Las relaciones halladas entre los indicadores de la estructura espacial de la vegetación y los índices de función del suelo ajustan con consideraciones teóricas y evidencias empíricas que muestran la importancia de la estructura de parches en el funcionamiento de los ecosistemas áridos y semiáridos (Ludwig & Tongway, 1995; Maestre & Cortina, 2004). En estos ecosistemas los parches vegetados actúan como «islas de fertilidad» dado que poseen mayor capacidad de infiltración, concentración de nutrientes y actividad biológica respecto a los interparches de suelo desnudo (Mazzarino *et al.*, 1991; Smith *et al.*, 1994; Hook

Tabla 3. Matriz de correlación de Pearson entre los índices e indicadores del suelo y la vegetación. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$. ARB: cobertura de arbustos. GP: cobertura de gramíneas palatables. GNP: cobertura de gramíneas no palatables. COB: cobertura basal de la vegetación. LMI: longitud media de los interparches. LMP: longitud media de los parches. AMP: ancho medio de los parches. NP10: número de parches cada 10 metros. ISD: índice de suelo desnudo. EST: índice de estabilidad. INF: índice de infiltración. NUT: índice de reciclaje de nutrientes. Stock CO: contenido de carbono orgánico por unidad de superficie.

Table 3. Pearson's correlation matrix between soil and vegetation indices and indicators. * $P < 0.05$, ** $p < 0.01$. ARB: shrub cover. GP: palatable grasses cover. GNP: non-palatable grass cover. COB: vegetation basal cover. LMI: average interpatch length. LMP: average patch length. AMP: average patch width. NP10: patch number every 10 meters. ISD: bare soil index. EST: stability index. INF: infiltration index. NUT: nutrient recycling index. Stock CO: soil organic carbon content per unit area.

	ARB	GP	GNP	COB	LMI	LMP	AMP	NP10	ISD	EST	INF	NUT	Stock CO
ARB	1,00												
GP	-0,14	1,00											
GNP	0,03	-0,96**	1,00										
COB	-0,02	0,89**	-0,87*	1,00									
LMI	-0,32	-0,80*	0,83*	-0,88**	1,00								
LMP	-0,25	0,84*	-0,79*	0,83*	-0,52	1,00							
AMP	-0,06	0,83*	-0,77*	0,66	-0,49	0,87*	1,00						
NP10	0,36	0,55	-0,65	0,44	-0,46	0,56	0,80*	1,00					
ISD	-0,32	-0,84*	0,86*	-0,90**	0,99**	-0,59	-0,57	-0,52	1,00				
EST	0,65	0,35	-0,32	0,23	-0,59	-0,03	0,30	0,39	-0,58	1,00			
INF	0,18	0,84*	-0,91**	0,79*	-0,77*	0,76*	0,68	0,60	-0,81*	0,29	1,00		
NUT	0,10	0,92**	-0,92**	0,94**	-0,87*	0,84*	0,73	0,53	-0,91**	0,34	0,93**	1,00	
Stock CO	0,40	0,68	-0,60	0,69	-0,79*	0,50	0,52	0,31	-0,81*	0,70	0,70	0,80*	1,00

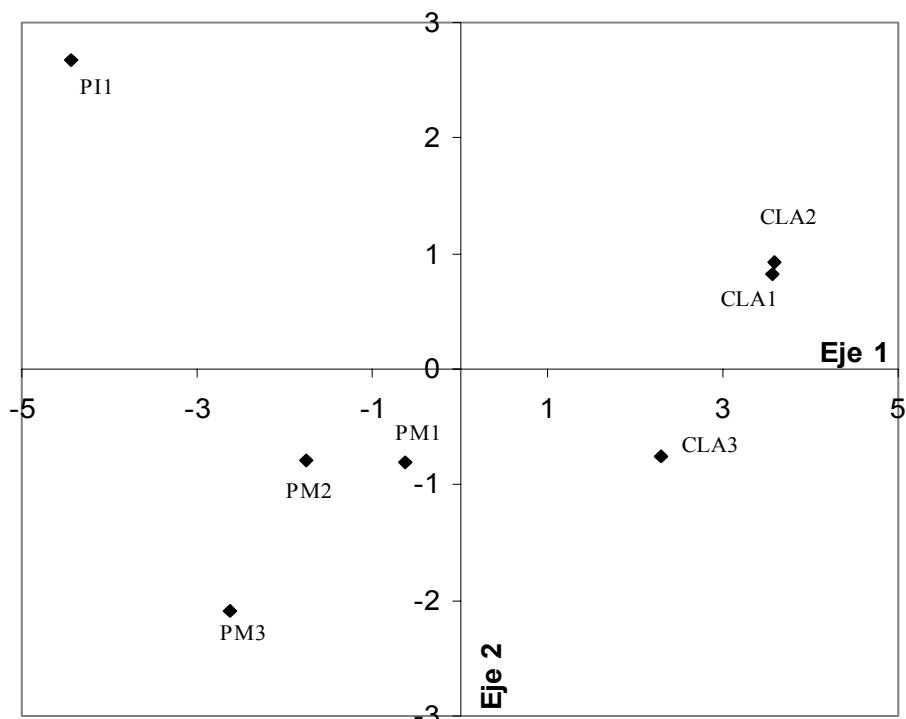


Figura 2. Ubicación de los sitios en los primeros dos ejes del Análisis de Componentes Principales.
Figure 2. Sites location in the first two ACP axes.

Tabla 4. Eigenvectors, eigenvalues y varianza explicada por los primeros dos ejes del PCA. Los asteriscos indican la significancia estadística de la relación de los índices e indicadores con los ejes. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$. Las siglas de los índices e indicadores son las mismas que en la Tabla 3.

Table 4. Eigenvectors, eigenvalues and variance explained by the first two ACP axes. Asterisks indicate statistical significance of relationship between indices and indicators with axes. * $P < 0.05$, ** $p < 0.01$. Index and indicator acronyms are the same as in Table 3.

	Eje 1	Eje 2
ARB	0,057	-0,612 **
GP	0,321 **	0,157
GNP	-0,320 **	-0,124
COB	0,310 **	0,120
LMI	-0,304 **	0,179
LMP	0,274 *	0,350
AMP	0,272 *	0,183
NP10	0,223	-0,048
ISD	-0,317 **	0,156
EST	0,161	-0,532 *
INF	0,308 **	0,042
NUT	0,331 **	0,057
Stock CO	0,270 *	-0,260
Eigenvalue	8,70	2,13
Broken stick Eigenvalue	3,18	2,18
Varianza (%)	66,9	16,4

et al., 1991; Vinton & Burke, 1995; Halvorson *et al.*, 1995; Schlesinger *et al.*, 1996; Thompson *et al.*, 2005; Gaitán, 2009). Los interparques actúan como fuente de sedimentos, agua y nutrientes hacia los parches (Coppinger *et al.*, 1991; Parsons *et al.*, 1992; Dunkerley & Brown, 1995). Al aumentar la presión de pastoreo se reduce la cobertura basal de la vegetación (COB), el tamaño de los parches vegetados (LMP y AMP), resultando en un incremento en la distancia entre ellos (LMI). Estos cambios pueden incrementar el flujo de recursos desde los interparques mientras que, paralelamente, se reduce la capacidad de los parches para retenerlos (Ludwig & Tongway, 1995). Como consecuencia una mayor proporción de recursos son exportados fuera del paisaje, con lo cual se reduce la calidad edáfica y el sistema se vuelve más susceptible a la degradación.

La ausencia de relación entre los indicadores de estructura de la vegetación y el índice de estabilidad (EST)

sugiere que la estabilidad del suelo está dada no solo por la cobertura vegetal y su configuración espacial. Según Tongway & Hindley (2004) EST está asociado a la cobertura de vegetación, mantillo, criptógamas y fragmentos gruesos. En el área del presente estudio, la cobertura de criptógamas fue muy baja, por lo tanto EST estaría relacionado a la vegetación y la presencia de fragmentos gruesos sobre la superficie del suelo. El mayor valor de EST observado en el sitio pastoreado PM2 respecto al sitio clausurado CLA2 se debería a que al aumentar la pérdida de suelo por erosión la superficie queda cubierta por una mayor proporción de rocas y gravas que forman pavimentos de erosión y protegen al suelo. Por lo tanto, este índice no es un buen indicador del estado del pastizal ya que un pastizal en estado degradado puede presentar un alto valor de EST.

Una de las consecuencias ambientales de la desertificación es la pérdida de carbono orgánico de los suelos,

Tabla 5. Índices e indicadores de suelo y vegetación en áreas con distinta intensidad de pastoreo. Los asteriscos indican la significancia estadística del ANVA entre clausura (CLA) y pastoreo moderado (PM): ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns $p > 0,05$. Los símbolos en sitio de pastoreo intenso (PI1) indican si los valores se hallan dentro o fuera del intervalo de confianza de la media de CLA y/o PM: sin símbolo: el valor se halla dentro del intervalo de confianza de la media tanto de CLA como de PM; †: el valor se halla fuera del intervalo de confianza de la media de CLA; ‡: el valor se halla fuera del intervalo de confianza de la media de PM; §: el valor se halla fuera del intervalo de confianza de la media tanto de CLA como de PM. Las siglas de los índices e indicadores son las mismas que en la Tabla 3.

Table 5. Indices and indicators of soil and vegetation in sites with different grazing intensity. Asterisks indicate statistical significance of variance analysis between exclosure (CLA) and moderate grazing (PM): ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$, ns $p > 0.05$. The symbols in the intense grazing site (PI1) indicate whether values fall within or outside the mean confidence interval in CLA and / or PM; without symbol: value is within the mean confidence interval of both CLA and PM; †: value is outside the mean confidence interval of CLA; ‡: value is outside the mean confidence interval of PM; §: value is outside the mean confidence interval of both CLA and PM. Indices and indicators acronyms are the same as in Table 3.

	CLA1	PM1	PI1	CLA2	PM2	CLA3	PM3	Media CLA	Media PM
ARB (%)	10,0	15,9	4,6 §§§	10,0	13,3	13,8	14,6	11,25 ns	14,6 ns
GP (%)	30,4	5,1	2,1 †	27,1	3,3	21,3	1,7	26,3 **	3,4 **
GNP (%)	2,5	11,2	17,6 †	4,2	17,1	6,7	19,2	4,4 *	15,8 *
COB (%)	41,0	26,9	17,4 §§§	60,3	19,0	40,9	23,7	47,4*	23,2*
LMI (cm)	81,9	104,4	181,7 §§§	36,7	106,5	67,0	142,8	61,9*	117,9*
LMP (cm)	55,4	38,5	40,1 †	55,6	26,4	47,2	42,7	52,7*	35,9*
AMP (cm)	120,5	55,9	56,6 †	84,1	30,3	110,3	73,2	105,0*	53,1*
NP10	7,4	7,0	4,4 †	5,4	3,6	8,7	5,6	7,17 ns	5,40 ns
ISD	48,4	76,3	150,0 §§§	14,6	86,2	39,6	109,0	34,2 *	90,5 *
EST	43,2	40,6	36,2 §§§	40,76	44,54	45,0	41,8	43,0 ns	42,3 ns
INF	51,9	46,6	36,2 §§§	49,34	38,34	43,8	40,3	48,3 ns	41,7 ns
NUT	34,2	25,8	18,1 §§§	36,31	21,03	28,9	23,8	33,1 *	23,5 *
Stock CO (t/ha)	36,70	21,27	7,9 §§§	36,41	28,10	28,42	30,21	33,8 ns	26,5 ns

que resulta en una disminución de la funcionalidad de los ecosistemas e incrementa las emisiones de CO₂ a la atmósfera, contribuyendo al cambio climático global. Los principales factores que influyen sobre el CO son la estructura y la composición florística de la vegetación (Charley & West, 1975; Vinton & Burke, 1995; Rubio & Escudero, 2000; Hirobe *et al.*, 2001) y los disturbios producidos por el pastoreo (Johnston *et al.*, 1971; Smoliak *et al.*, 1972; Dormaar *et al.*, 1977; Dormaar *et al.*, 1984; Schlesinger & Pilmanis, 1998). Los resultados del presente estudio sugieren que el sobrepastoreo produce indirectamente una disminución del reservorio de CO al aumentar la superficie de suelo desnudo y el tamaño de los interparches (ISD y LMI).

Cuando un ecosistema pierde funcionalidad y se degrada se producen cambios fisómicos y florísticos en la vegetación observándose una disminución en la cobertura total y de gramíneas palatables (GP) y un incremento en la cobertura de gramíneas no palatables (GNP). Estos cambios en la vegetación, debido al sobrepastoreo, son similares a los reportados por otros autores para la región patagónica (León & Aguiar, 1985; Perelman *et al.*, 1997; Oliva *et al.*, 1998; García-Martínez, 2005). Los índices de función del suelo también pueden interpretarse como indicadores del potencial productivo del ecosistema (Tongway & Hindley, 2004). En tal sentido, Rezaei *et al.* (2006) hallaron relaciones positivas entre los índices de función del suelo y la productividad primaria en ecosistemas semiáridos de Irán, siendo NUT el índice más asociado con la productividad. Resultados similares se hallaron en el presente estudio donde las relaciones entre NUT e INF con la cobertura de GP y GNP sugieren que la productividad forrajera se reduce con la degradación y pérdida de funcionalidad de los ecosistemas.

CONCLUSIONES

El pastoreo produjo un deterioro en la estructura y funcionalidad de las estepas analizadas. La metodología «Landscape Function Analysis» propuesta por Tongway y Hindley (2004) es una herramienta de utilidad para la evaluación y monitoreo de ecosistemas áridos y semiáridos dado que refleja el estado de procesos ecosistémicos críticos y su aplicación a campo es rápida, sencilla y de bajo costo. Sin embargo, esta metodología fue desarrollada en Australia y su aplicación en la Región Patagónica extrandina requiere de validación. Algunos indicadores fueron poco sensibles ante los cambios de estado del ecosistema, por lo tanto se requieren más estudios para adaptar esta metodología a las condiciones locales y testear con datos experimentales de que manera los índices e indicadores

reflejan adecuadamente los procesos y funciones de estos ecosistemas.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguiar, MR & OE Sala. 1999. Patch structure, dynamics and implications for the functioning of arid ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution* 14: 273-277.
- Bustos, JC & VC Rocchi. 1993. Caracterización termoplumiométrica de veinte estaciones meteorológicas de Río Negro y Neuquén. Comunicación técnica. Recursos Naturales. Agro-meteorología N° 1. INTA EEA Bariloche.
- Charley JL & NE West. 1975. Plant-induced soil chemical patterns in some shrub dominated semi-desert ecosystems of Utah. *Journal of Ecology* 63: 945-963.
- Coppinger, KD; WA Reiners; IC Burke & RK Olson. 1991. Net erosion on a sagebrush steppe landscape as determined by cesium-137 distribution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 155: 254-258.
- del Valle, HF; NO Elissalde; DA Gagliardini & JM Milovich. 1997. Distribución y cartografía de la desertificación en la región de Patagonia. *RIA* 28: 1-24.
- Dormaar JF; A Johnston & S Smoliak. 1977. Seasonal variations in chemical characteristics of soil organic matter of grazed and ungrazed mixed prairie and fescue grassland. *J. Range Managem.* 30: 195-198.
- Dormaar JF; A Johnston & S Smoliak. 1984. Seasonal changes in carbon content, dehydrogenase, phosphatase, and urease activities in mixed prairie and fescue grassland Ah horizons. *J. Range Managem.* 37: 31-37.
- Dunkerley, DL & KJ Brown. 1995. Runoff and runon areas in a patterned chenopod shrubland, arid western New South Wales, Australia: characteristics and origin. *Journal of arid Environments* 30: 41-55.
- Friedel, MH. 1991. Range condition assessment and the concept of thresholds: A viewpoint. *Journal of Range Management* 44: 422-426.
- García Martínez, GC. 2005. Cambios edáficos asociados al pastoreo ovino en la estepa patagónica, Distrito Occidental. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires (UBA). 37 pp.
- Gaitán, JJ. 2009. Topografía, pastoreo y vegetación como factores de control de la concentración y patrón espacial del carbono edáfico en la estepa patagónica. Tesis de Magister Scientiae área de Recursos Naturales, Escuela para Graduados, Facultad de Agronomía – UBA, 120 pp.
- Golluscio, RA; VA Deregibus & JM Paruelo. 1998. Sustainability and range management in the Patagonian steppes. *Ecologia Austral* 8: 265-284.
- Halvorson, JJ; JL Smith; H Bolton & RE Rossi. 1995. Evaluating shrub-associated spatial patterns of soil properties in a shrub-steppe ecosystem using multiple-variable geostatistics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1476-1487.
- Hirobe M; N Ohte; N Karasawa; G Zhnag; L Wang & K Yoshikawa. 2001. Plant species effect on the spatial patterns of soil properties in the Mu-U desert ecosystem, Inner Mongolia, China. *Plant and Soil* 234: 195-205.

- Hook, PB; IC Burke & WK Lauenroth. 1991. Heterogeneity of soil and plant N and C associated with individual plants and openings in North American shortgrass steppe. *Plant and Soil* 138: 247-256.
- INTA-GTZ. 1995. Lucha contra la desertificación en la Patagonia a través de un sistema de monitoreo ecológico. LUDEPA-SME, 182 pp.
- Johnston, A; JF Dormaar & S Smoliak. 1971. Long-term grazing effects on fescue grassland soils. *J. Range Managem.* 24: 185-188.
- Laycock, WA. 1991. Stable states and thresholds of range condition on North American rangelands: A viewpoint. *Journal of Range Management* 44: 427-433.
- León, RJC; D Bran; M Collantes; JM Paruelo & A Soriano. 1998. Grandes unidades de vegetación de la Patagonia extra andina. *Ecología Austral* 8: 125-144.
- León, RJC & MR Aguiar. 1985. El deterioro por uso pasturil en estepas herbáceas patagónicas. *Phytocoenología* 13: 181-196.
- Ludwig, JA & DJ Tongway. 1995. Spatial organization of landscapes and its function in semi-arid woodlands, Australia. *Landscape Ecology* 10: 51-63.
- Maestre, FT & J Cortina. 2004. Insights into ecosystem composition and function in a sequence of degraded semiarid steppes. *Restoration Ecology* 12: 494-502.
- Mazzarino, MJ; L Oliva; A Nuñez; G Nuñez & E Buffa. 1991. Nitrogen mineralization and soil fertility in the Dry Chaco ecosystem (Argentina). *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 515-522.
- Muller-Dombois, DD & H Ellenberg. 1974. Aims and Methods of Vegetation Ecology. Wiley, New York. 547 pp.
- Noy-Meir, I. 1973. Desert ecosystems: environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4: 25- 51.
- Oliva, G; A Cibils; P Borrelli & G Humano. 1998. Stable states in relation to grazing in Patagonia: a 10-year experimental trial. *Journal of Arid Environments* 40: 113-131.
- Parsons, AJ; AD Abrahams & JR Simanton. 1992. Microtopography and soil-surface materials on semi-arid piedmont hillslopes, southern Arizona. *Journal of Arid Environments* 22: 107-155.
- Paruelo, JM; MB Bertiller; TM Schlichter & FR Coronato. 1993. Secuencias de deterioro en distintos ambientes patagónicos. Su caracterización mediante el modelo de estados y transiciones. Convenio Argentino Alemán. Cooperación Técnica INTA-GTZ. 110 pp.
- Perelman, SB; RJC León & JP Bussacca. 1997. Floristic changes related to grazing intensity in a Patagonian shrub steppe. *Ecography* 20: 400-406.
- Rezaei, SA; H Arzani & D Tongway. 2006. Assessing rangeland capability in Iran using landscape function indices based on soil surface attributes. *Journal of Arid Environments* 65: 460-473.
- Rubio, A & A Escudero. 2000. Small-scale spatial soil-plant relationship in semi-arid gypsum environment. *Plant and Soil* 220: 139-150.
- Schlesinger, WH; AJ Raikes; AE Hartley & AF Cross. 1996. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology* 77: 364- 374.
- Schlesinger, WH & AM Pilmanis. 1998. Plant-soil interactions in desert. *Biogeochemistry* 42: 169-187.
- Smith, JL; JJ Halvorson & H Bolton. 1994. Spatial relationship of soil microbial biomass and C and N mineralization in a semiarid shrub-steppe ecosystem. *Soil Biol. Biochem.* 26: 1151-1159.
- Smoliak, S; JF Dormaar & A Johnston. 1972. Long-term grazing effects on *SriDa-Boureloua* prairie soils. *J. Range Manage.* 25: 246-250.
- Sparks, DL. (ed). 1996. Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. SSSA Book Series Nr.5. Madison, Wis. 1390p.
- Thompson, DB; LR Walker; FH Landau & LR Stark. 2005. The influence of elevation, shrub species, and biological soil crust on fertile islands in the Mojave Desert, USA. *Journal of Arid Environments* 61: 609-629.
- Tongway, DJ & NL Hindley. 2004. Landscape Function Analysis: procedures for monitoring and assessing landscapes with special reference to Minesite and Rangelands. CSIRO Australia, 80 pp.
- Vinton, MA & IC Burke. 1995. Interactions between individual plant species and soil nutrient status in short grass steppe. *Ecology* 76: 1116-1133.