

Zonificación de áreas susceptibles a procesos erosivos en laderas desencadenados por la ganadería extensiva, Tierra del Fuego, Argentina^o

Diego R. A. Quiroga*
Andrea Coronato**
Guillermo R. Ángeles***
Héctor F. del Valle****

Resumen

Se presenta el primer mapa de zonificación de susceptibilidad a procesos erosivos según exposición de laderas, considerando valores de pendiente, orientación y estado de cobertura del suelo para un sector de la estepa fueguina localizado en el norte de la provincia de Tierra del Fuego. Se identificaron dos sitios de observación de procesos de remoción en masa y deflación en laderas con distintas características físicas (pendiente mayor a 6,59 % y orientación de ladera N-NE) cuyos valores de referencia se aplicarán en el análisis a escala regional. A su vez se realizó un análisis fotogramétrico de los sitios de observación. Se aplicaron técnicas de sensores remotos en un entorno de Sistema de Información Geográfica (SIG). Se usó el Modelo Digital de Elevaciones MDEar 45 m de resolución espacial para extraer los principales factores condicionantes para la ocurrencia de los movimientos de laderas. La identificación y mapeo de los procesos de erosión se obtuvo a partir de una clasificación supervisada (algoritmo de máxima verosimilitud) de una imagen SPOT-4 de 10 m de resolución espacial (observación de la microescala). El mapa inventario combinado con el de topografía digital constituye una línea de base para el área de estudio. Esta información, hasta el momento inexistente, podrá ser utilizada como una herramienta de planeamiento y para la implementación de estrategias de mitigación y reducción de procesos erosivos.

Palabras clave: Erosión en laderas, Ganadería extensiva, Zonificación de procesos, Clasificación de imágenes.

^o DOI: <https://doi.org/10.52292/j.rug.2020.29.2.0009>

* Centro Austral de Investigaciones Científicas (CADIC-CONICET), Ushuaia, Argentina. Universidad Nacional de Tierra del Fuego, Instituto de Ciencias Polares, Ambiente y Recursos Naturales, Ushuaia. diegoquir@gmail.com

** Centro Austral de Investigaciones Científicas (CADIC-CONICET), Ushuaia. Universidad Nacional de Tierra del Fuego, Instituto de Ciencias Polares, Ambiente y Recursos Naturales, Ushuaia.

*** Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo, Bahía Blanca.

**** Centro Austral de Investigaciones Científicas (CADIC-CONICET), Ushuaia. Centro Nacional Patagónico (CENPAT-CONICET), Puerto Madryn.

Zoning of areas susceptible to erosive processes on slopes triggered by extensive livestock, Tierra del Fuego, Argentina

Abstract

The first zoning map of susceptibility to erosive processes according to slope exposure is presented considering values of slope, orientation and state of soil for a sector of the Fuegian steppe located in the north of the province of Tierra del Fuego. Two sites were identified for the observation of mass removal and deflation processes on slopes with different physical characteristics (slopes greater than 6.59 % and N-NE-slope orientation) whose reference values will be applied in the analysis on a regional level. In turn, a photogrammetric analysis of the observation sites was also carried out. Remote sensing techniques were applied using a Geographic Information System (GIS). The DEMar 45 m spatial resolution Digital Elevation Model was used to extract the main conditioning factors for the occurrence of slope movements. The identification and mapping of the erosion processes were obtained from a supervised classification (maximum likelihood algorithm) of 10 m spatial resolution SPOT-4 image (micro-scale observation). The inventory map combined with the digital topography map constitutes a baseline for the study area. This information, which was inexistent so far, may be used as a planning tool to implement mitigation strategies and reduce erosive processes.

Keywords: Slope erosion, Extensive livestock farming, Process zoning, Image classification.

Introducción

Los suelos de ladera se caracterizan por una fragilidad intrínseca y baja resiliencia. Es decir, baja capacidad para recuperarse después de una perturbación natural grave y/o impacto humano. Esto produce que la erosión de los suelos sea casi irreversible ante procesos de excavación animal, remoción en masa y/o deflación. Además, en ambientes semiáridos, el riesgo de erosión del suelo está determinado por las condiciones climáticas y topográficas (Ochoa et al., 2016). En los movimientos de ladera se diferencian dos etapas: la primera de ellas corresponde a la deformación de la ladera, la cual es difícilmente perceptible y con una dinámica lenta. La segunda es considerada la fase de rotura o cizallamiento a partir de la cual se desencadenan los mecanismos de deslizamiento/flujo/levantamiento y/o caída libre, los cuales pueden tener diferente velocidad supeditada a las características litológicas, de sustrato (Corominas y Alonso, 1984) y contenido de humedad en los materiales afectados.

La remoción en masa incluye un conjunto de mecanismos por los cuales el material constituido por roca meteorizada, sedimentos y suelo está dispuesto sobre una superficie inclinada la cual se moviliza en respuesta a un desequilibrio entre la fuerza de corte y la atracción gravitacional. La distribución geográfica de este proceso se encuentra determinada por factores geométricos, geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos y de cobertura vegetal (Fell, Ho, Lacasse y Leroi, 2005; Malamud, Turcotte, Guzzetti y Riechenbach, 2004).

Los procesos de remoción en masa que ocurren en la región serrana del norte de Tierra del Fuego no han sido aún descritos en estudios geomorfológicos. Oría (2012) reconoció modificaciones en las laderas con orientación general norte ocasionados por procesos de erosión generados por el ganado. Coronato y Villarreal (2014) y Oría, Salemme, Santiago y Montes (2010) identifican el viento como agente modelador predominante en el paisaje del norte de Tierra del Fuego. Los ambientes lagunares con fondo expuesto por evaporación y los acantilados costeros se convierten en fuentes de material para la deflación, provocando la depositación de material limo arenoso formando dunas “perched” o montadas sobre acantilados (Coronato et al., 2011) y mantos eólicos (Villarreal, Coronato, Mazzoni y López, 2014). La observación directa y testimonios de informantes clave permiten reconocer la ocurrencia de procesos de este tipo a microescala en los ambientes serranos.

Considerando las interrelaciones entre el medio físico y las actividades socioproductivas, la ganadería extensiva en terrenos irregulares constituye uno de los principales agentes desencadenantes de procesos erosivos y de degradación ambiental que afectan la vegetación autóctona y el suelo. La práctica ganadera se basa en un manejo extensivo organizado a partir de una rotación en cuadros alambrados con una superficie que varía entre 2000 y 4000 ha (Cingolani, Anchorena y Collantes, 1998) y con una carga ovina promedio que varía entre 0,6 y 1,2 ovino/ha, estableciendo

un promedio de 1 ovino/ha (Anchorena, Cingolani, Livraghi, Collantes y Stofella, 2001). El sobrepastoreo se considera como uno de los principales factores de desertificación en los ecosistemas semiáridos (Cerdà, Brazier, Nearing y de Vente, 2013).

Las causas de las variaciones espacio-temporales de la erosión puede deberse tanto a condiciones meteorológicas como a causas socioproductivas relacionadas con el uso de la tierra, como por ejemplo, sobrepastoreo (Gaitán, López y Bran, 2009). Esta práctica agropecuaria incide fuertemente en la pérdida de la cobertura vegetal y en el desarrollo de los procesos erosivos del suelo, más aún cuando el relieve se conforma por sistemas serranos o colinas aisladas con laderas de pendiente media a fuerte. Es en este contexto productivo en el cual el sobrepastoreo interviene como uno de los principales agentes modificadores del paisaje al activar los procesos erosivos de remoción en masa y erosión eólica.

Los patrones espaciales que se presentan a escala regional, tales como procesos erosivos, cobertura vegetal o tipos de uso del suelo, entre otros, pueden analizarse mediante imágenes provistas por sensores remotos. La identificación de procesos de remoción en masa en áreas de difícil acceso puede ser observada a través de patrones espaciales plasmados en las imágenes SPOT 4 sometidas a la aplicación de un algoritmo de máxima verosimilitud (Mantovani, Soeters y van Western, 1996). La conformación de diferentes algoritmos de combinación de bandas espectrales, permite estimar y evaluar, por ejemplo, la ubicación de los distintos tipos de vegetación en relación con la cobertura del suelo y la existencia de terrenos con suelo desnudo (Eckert, Hüsler, Liniger y Hodel, 2015; Higginbottom y Symeonakis, 2014; Li, Lewis, Rowland, Tappan y Tieszen, 2004).

El objetivo de este trabajo es determinar, identificar, mapear y cuantificar la extensión y localización de las áreas afectadas y potencialmente afectadas por procesos erosivos de tipo remoción en masa en campos de ganadería extensiva en ambientes serranos. Para alcanzar dicho objetivo se analizarán las características del medio físico, presencia de suelo desnudo y se vincularán con la actividad económica dominante en la región. El cumplimiento de este objetivo permitirá ofrecer herramientas para la planificación territorial e implementación de estrategias de mitigación y reducción de riesgo de erosión por remoción en masa en ciertos sectores de los campos ganaderos.

Área de estudio

El área de estudio se localiza en el norte de la provincia de Tierra del Fuego, Argentina ($53^{\circ} 42' S / 68^{\circ} 33' O$ y $53^{\circ} 33' S / 68^{\circ} 15' O$, Fig. 1). La base geológica del área de estudio corresponde a depósitos de sedimentitas marinas deltaicas de edad Mioceno Medio, Formación Carmen Silva, compuesta por estratos marinos horizontales, subdivididos en dos niveles: el inferior compuesto por arcillitas y

limos areniscosos de coloración variable entre gris verdoso y amarillo rojizo en muestras meteorizadas y el nivel superior compuesto por conglomerados con frecuentes rodados de vulcanitas y andesitas con contenido fosilífero de gasterópodos *Struthiolarella densestriata*, *Turritella ambulacrum silva*, *Polinices* spp., “*Nassa*” *fueguina*; y bivalvos *Pleuromeris elegantoides* y *Eurhomalea* cf. *Fuenzalidai* (Codignotto y Malumian, 1981; Nordenskjöld, 1898). La Formación Castillo está compuesta por sedimentitas marinas proximales a continentales, de edad Mioceno Superior, suprayace a la anteriormente descrita, aunque su distribución es más limitada. Está compuesta por areniscas conglomerádicas con estratificación diagonal, aflorantes en un espesor mínimo de 6 m, de color pardo amarillento. Las sedimentitas marinas conforman un sistema de serranías de escasa altura (100-350 m s. n. m.) fuertemente disectadas por escorrentía superficial (De Ferrariis, 1938). Depósitos glaciares y glaciafluviales de edad Pleistoceno Medio (Bujalesky, Coronato e Isla, 2001) se localizan en el norte del área de estudio conformando abanicos glaciafluviales.

El clima de esta región es frío subhúmedo oceánico, la temperatura media de todo el período de estudio (2012-2016) es de 5,7 °C. La temperatura media diaria de los meses más cálidos (diciembre a febrero) oscila entre 9 y 10 °C, en cambio para los meses más fríos (junio-agosto) varía entre 0 y 4 °C. En invierno el gradiente térmico se incrementa hacia el oeste. Las precipitaciones se distribuyen regularmente durante el año, oscilando entre los 300 y 430 mm anuales; no obstante, se destaca el período entre noviembre y febrero como el menos lluvioso. La nubosidad es un elemento climático característico para la región, la misma alcanza el 70 % de cielo cubierto en verano, en cambio un 60 % en invierno (Tuhkanen, 1992). Los vientos predominantes provienen del cuadrante oeste-sudoeste, con una velocidad media anual aproximada de 40 km/h y ráfagas que superan los 100 km/h.

La vegetación autóctona dominante, que sirve de base y sustento de la actividad ganadera, se compone de tres especies: *Festuca gracillima* (Coirón dulce o fueguino); *Chiliodactylus diffusum* (Mata verde) y *Empetrum rubrum* (Brecillo o Murtilla de Magallanes). Tales especies son características de la estepa fueguina y constituyen un soporte vital para numerosas especies nativas como el *Lama guanicoe* (guanaco), y exóticas como *Pseudalopex griseus* (zorro gris) (Roig, Anchorena, Dollenz, Faggi y Méndez, 1985).

Se identificaron diferentes tipos de suelos en el área (Panigatti, 2010). La clasificación de la taxonómica (2006), los suelos en el área de estudio son Haplocript Xérico (Inceptisol) y Haplocriol Páquico (Molisol) desarrollados en valles y colinas glaciafluviales con valores de pendiente entre 1 y 3 %, con permeabilidad moderada y, a veces, con depresiones inundadas. Estos tipos de suelo tienen un riesgo de degradación debido al sobrepastoreo y la erosión potencial del viento. En el pie de la pendiente, Cricuept Fluvacuéntico (Inceptisol) también se desarrolla con una permeabilidad moderada (Panigatti, 2010).

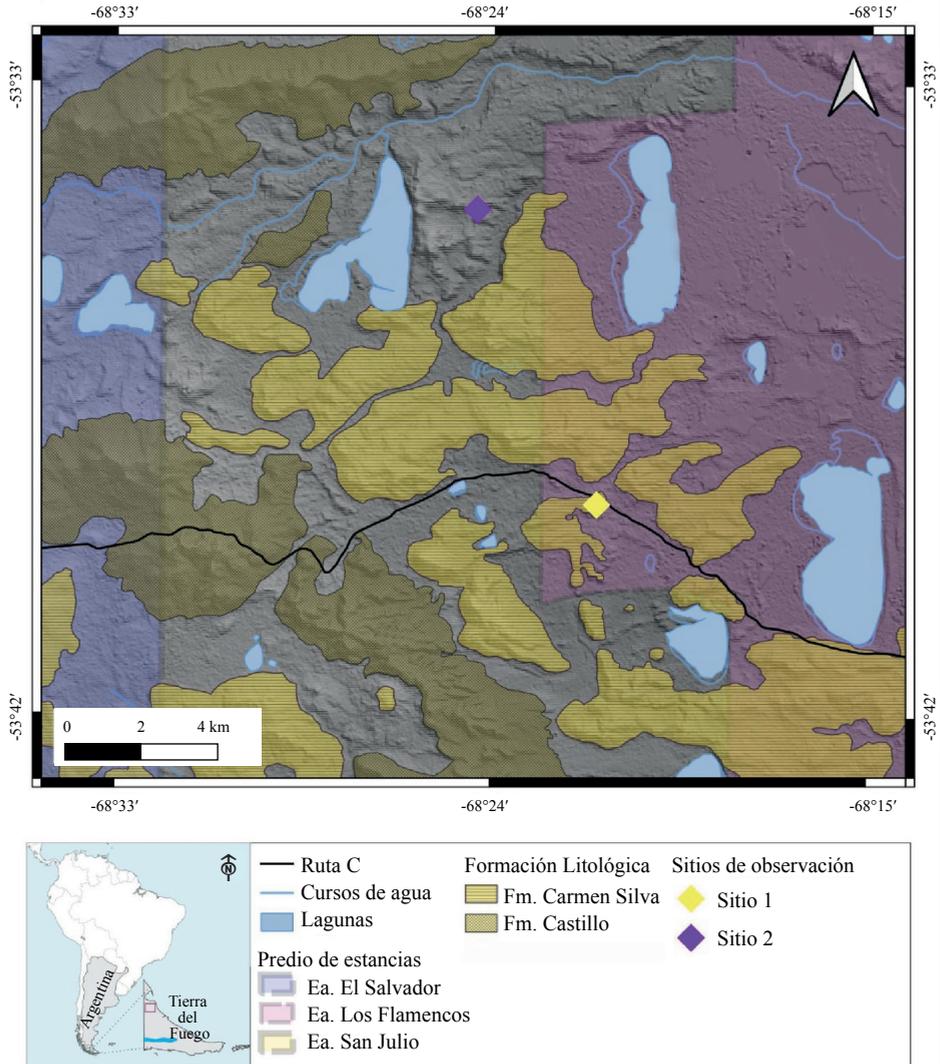


Figura 1. Localización y geología del área de estudio. Fuente: elaborado por Quiroga et al. (2020) sobre la base del MDEar, relevamiento de campo y Panigatti (2010).

Materiales y métodos

El trabajo contempló dos escalas de análisis. La escala local incluye la selección de dos sitios de observación y descripción directa de procesos erosivos en laderas con distintas características físicas (Fig. 2) cuyos valores de referencia se aplicarán en el análisis a escala regional. En las laderas con orientación NNE (ladera de solana), existe un gran número de hoyadas probablemente promovidas por procesos erosivos por pisoteo: remoción de cubierta vegetal, deflación y remoción en masa (Fig. 3).



Figura 2. Fotografía de los sitios de observación: A) Sitio 1; B) Sitio 2.
Fuente: fotografía tomada por Quiroga (diciembre de 2012).



Figura 3. A) Ladera de solana utilizada por el ganado como zona de resguardo y descanso. Nótese la escasa cobertura de matas de *Festuca gracillima* por efectos del pastoreo; B) Hoyada provocada por efectos del ganado, en la escarpa de erosión se observa el escaso espesor de suelo desarrollado sobre la roca de base meteorizada y la presencia de derrubios dispersos; C) Hoyada desde una vista superior. Fuente: fotografía tomada por Quiroga (diciembre de 2012).

En las temporadas estivales 2012-2013 y 2013-2014, se realizó el trabajo de campo para localizar, medir y monitorear las formas de erosión producidas por el ganado —hoyadas— utilizando GPS diferencial y cinta métrica. Se obtuvo el valor de longitud del eje mayor en sentido horizontal (x) y el del eje menor (y) en el sentido de la pendiente, y el valor de profundidad (z) en cada hoyada. A su vez, con esta información se posibilitó la creación de un modelo digital de elevaciones de la ladera, en el cual se observan las rugosidades en el terreno.

Para el análisis fotogramétrico de los sitios de observación, se utilizaron capturas fotográficas realizadas en septiembre 2012 y mayo 2016. Se utilizó el programa de código abierto Confocal Uniovi 151 con el siguiente procedimiento: (i) selección de fotos; (ii) definición de escala en la fotografía; (iii) obtención de fotografías con una regla de 1 metro plantada en el centro de la imagen; (iv) aplicación de correcciones de ajuste de imagen, color y contrastes hasta tener resaltados en un 100 % los píxeles de interés; (v) aplicación de la herramienta de analizador de partículas, posibilitando la identificación de áreas con una superficie mayor a 50 cm².

Para el trabajo a escala regional se organizó la información mediante el entorno GIS OSGeo – Quantum GIS 3.10 Coruña®. Se obtuvieron productos cartográficos bajo un sistema de referencia Universal Transversal Mercator (UTM) faja 19 Sur con Datum WGS1984. Los valores de altitud y relieve fueron extraídos de un modelo digital de elevación MDEar de 45 m de resolución espacial. El mapa de pendientes incluye cinco clases: Clase 1: sin pendiente (0-2,53 %); Clase 2: escasa pendiente (2,54-6,58 %); Clase 3: media pendiente (6,59-12,16 %); Clase 4: moderada pendiente (12,17-20,26 %); y Clase 5: elevada pendiente (mayores a 20,27 %). Esta clasificación permitió descartar el terreno correspondiente a las clases 1 y 2 priorizando la observación, cuantificación y delimitación de las potenciales áreas a ser afectadas por los procesos de remoción en masa, según el valor de pendiente. El mapa de orientación de laderas, posibilitó la identificación y extensión espacial de laderas con exposición NNE y sus valores de pendiente. El análisis de curvatura se realizó para la clasificación de las formas de las laderas según valores de referencia (0 = plana, valor : convexa, valor +: cóncava). Se definió un criterio de susceptibilidad a la erosión, a través del método heurístico desde el punto de vista geomorfológico considerando como criterio de base la simultaneidad de las variables: pendiente superior a 6,59 %, exposición de ladera NNE y curvatura convexa. Estas condiciones se utilizaron para segmentar la imagen SPOT 4, correspondiente al 17 de marzo de 2012. Se realizó una clasificación supervisada de una imagen SPOT segmentada, lo que permitió obtener de manera cuantitativa la superficie de laderas afectadas por procesos erosivos. Para su procesamiento se utilizó el complemento Semi-Automatic Classification en el entorno de QGIS. Se definió a través de la utilización de pixel semillas las áreas que se identificaron como suelos sin cobertura vegetal y con cobertura vegetal.

Resultados

Características del medio físico. Rasgos erosivos en laderas

Las hoyadas son depresiones en forma de medialuna, con desarrollo de un escarpe 20 a 45 cm que disminuye progresivamente del centro hacia las puntas (Fig. 3), en la que se descubre roca meteorizada, el suelo desarrollado en 20 cm sobre la roca aflorante, de color pardo rojizo. La disposición de las hoyadas a lo largo de la ladera se mapeó en detalle en el sitio de observación n.º 2. El modelo resultante (Fig. 4A) muestra la notable diferencia en rugosidad debido al desarrollo de hoyas sobre la ladera expuesta al NNE respecto de la ladera opuesta. En este sitio de observación se midieron las dimensiones de las hoyadas o formas de erosión generadas por el ganado (Tabla I). Estas depresiones tienen un tamaño comprendido entre 1,04 y 17,62 m² y profundidades entre los 15 y 40 cm. La suma de las superficies totalizó 77,64 m², representando un 2,5 % de la superficie total de la ladera. La misma tiene una pendiente comprendida entre 2,55 a 6,83 % y una altura de 106 m s. n. m.

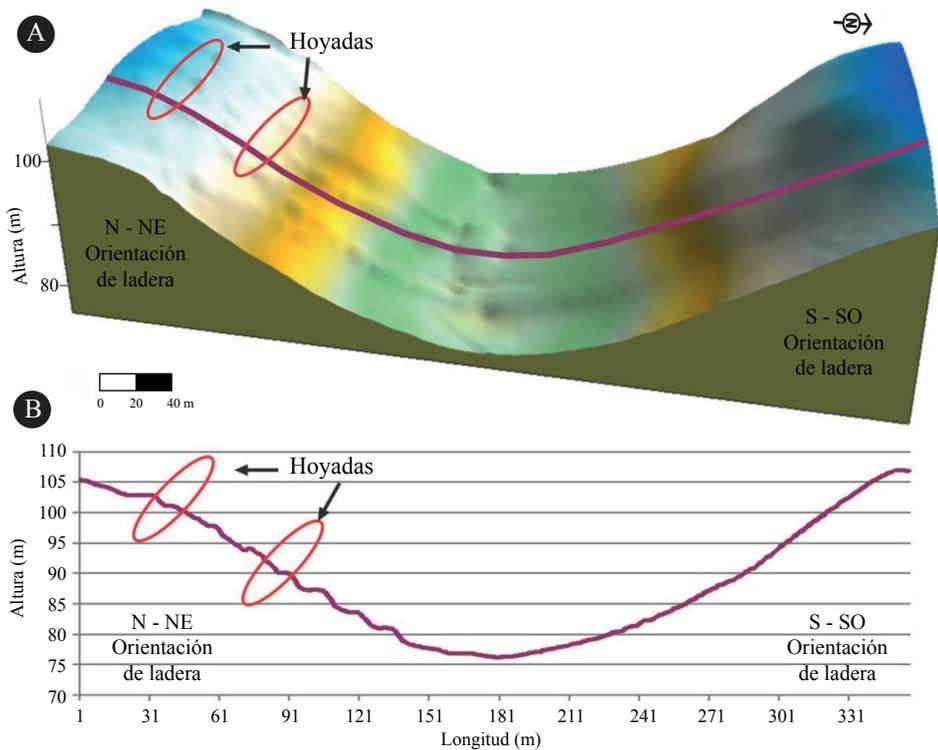


Figura 4. A). Modelo digital de elevaciones creado en base a puntos obtenidos por GPS de medición diferencial; B) Perfil transversal del modelo digital del terreno. Fuente: elaborado por Quiroga et al. (2020).

| Número de hoyada | Eje X (cm) | Eje Y (cm) | Eje Z (cm) | Superficie en m ² |
|------------------|------------|------------|------------|------------------------------|
| 1 | 92 | 155 | 15 | 1,426 |
| 2 | 165 | 168 | 22 | 2,772 |
| 3 | 146 | 280 | 20 | 4,088 |
| 4 | 172 | 157 | 17 | 2,700 |
| 5 | 140 | 186 | 20 | 2,604 |
| 6 | 112 | 280 | 32 | 3,136 |
| 7 | 154 | 201 | 35 | 3,696 |
| 8 | 139 | 123 | 22 | 1,709 |
| 9 | 154 | 240 | 35 | 3,696 |
| 10 | 148 | 520 | 40 | 7,696 |
| 11 | 133 | 254 | 27 | 3,378 |
| 12 | 307 | 571 | 40 | 17,529 |
| 13 | 335 | 526 | 39 | 17,621 |
| 14 | 96 | 109 | 28 | 1,046 |
| 15 | 143 | 360 | 36 | 5,148 |
| TOTAL | | | | 77,646 |

Tabla I. Dimensiones de las hoyadas del sitio de observación 2, el total de superficie de hoyadas relevada representan el 2,5 % de la superficie total de la ladera afectada. Eje X: distancia longitudinal paralelo a la pendiente, Eje Y: distancia longitudinal perpendicular a la pendiente. Fuente: elaborado por Quiroga et al. (2020).

Condiciones físicas a nivel regional

La superficie total del área de estudio es de 859,9 km². Un 21,7 % (186,9 km²) del total del área de estudio corresponde a laderas (Fig. 5). Considerando el total de la superficie ocupada por laderas se pudo establecer que el 30 % (56,8 km²) posee orientación NNE. Estas condiciones físicas las determinan como un lugar de abrigo de los vientos predominantes potencializado por la disposición de solana.

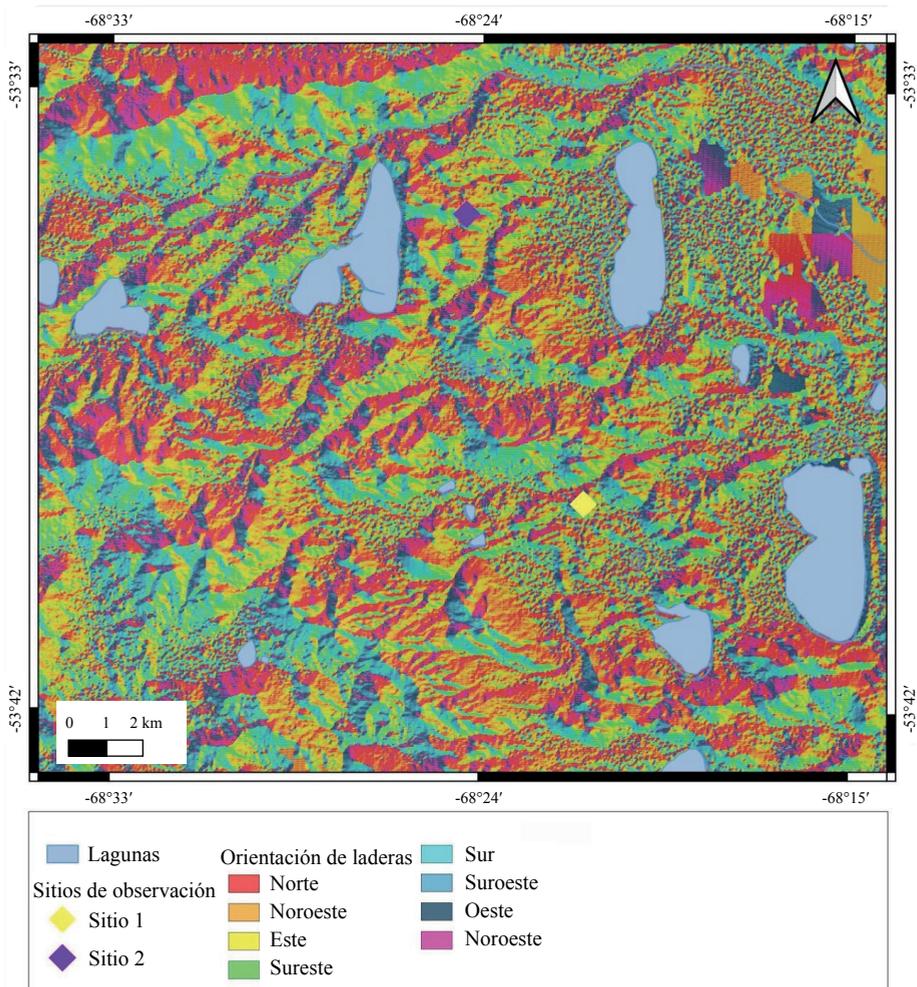


Figura 5. Orientación de laderas y sitios de observación. Fuente: elaborado por Quiroga et al. (2020) sobre la base de MDEar.

Los valores de pendiente dominantes son los inferiores a 6,59 % (Fig. 6), esto se establece debido a las dimensiones del abanico glacifluvial y la presencia de superficies aterrazadas en la periferia de las lagunas. En cuanto al sistema de serranías, las áreas con valores altos de pendiente o mayores a 12,17 % corresponden al sistema serrano del Co. Mesa, de 300 m de altitud y al conjunto de serranías sin denominación, localizado al norte de la laguna Amalia.

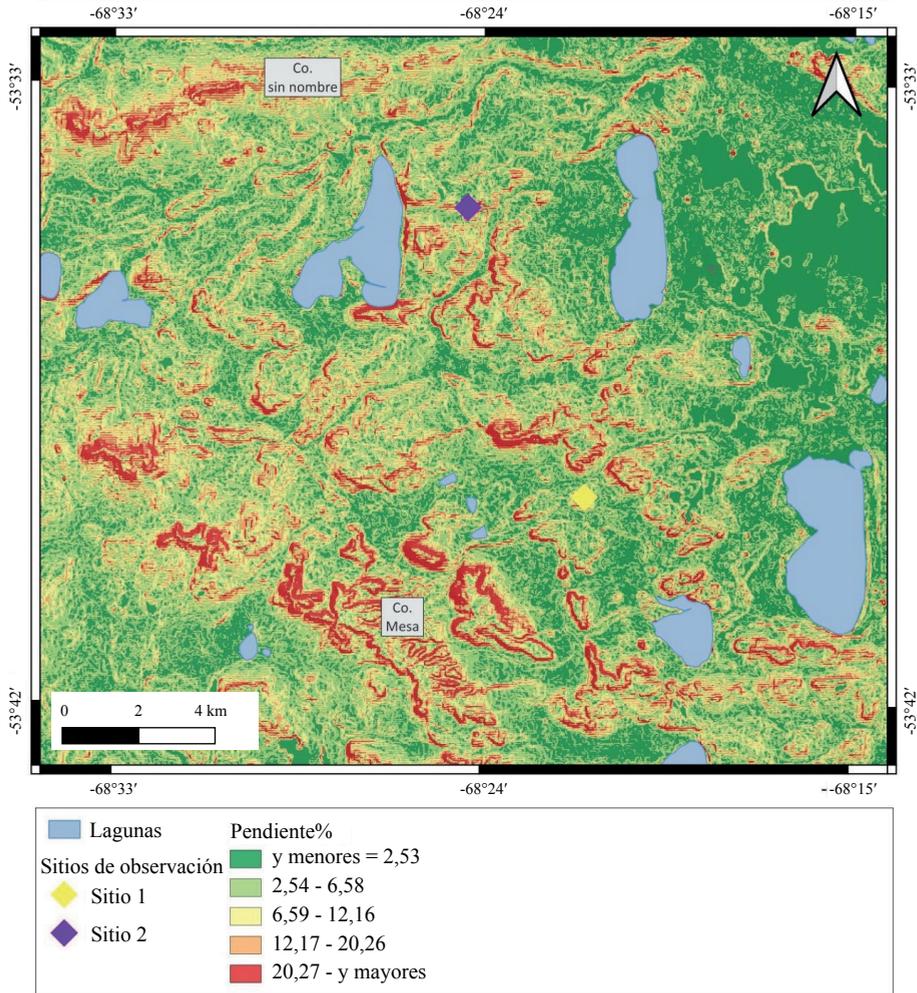


Figura 6. Mapa de valores de pendientes en porcentaje y localización de sitios de observación. Fuente: elaborado por Quiroga et al. (2020) sobre la base de MDEar.

Análisis de Curvatura

La curvatura representa la forma de la ladera. Valores de curvatura positivos representan terrenos con laderas cóncavas, los valores negativos representan la curvatura convexa y la curvatura con valor cero representan superficies planas. Los valores positivos, correspondientes a laderas cóncavas, suman un total de 27,5 km² (50 %). Los correspondientes a la ladera convexa, 15,9 km² (27 %). Las laderas con pendiente plana suman un total de 13,4 km² (23 %). Considerando que los procesos de remoción en masa tienen mayor ocurrencia en laderas convexas (Felicísimo, 1994), es posible definir que el 27 % de la superficie de las laderas

tienen mayor probabilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa por agentes naturales. En cambio, el resto de la superficie de laderas se encuentra supeditada al afecto erosivo producido por el ganado (Fig. 7).

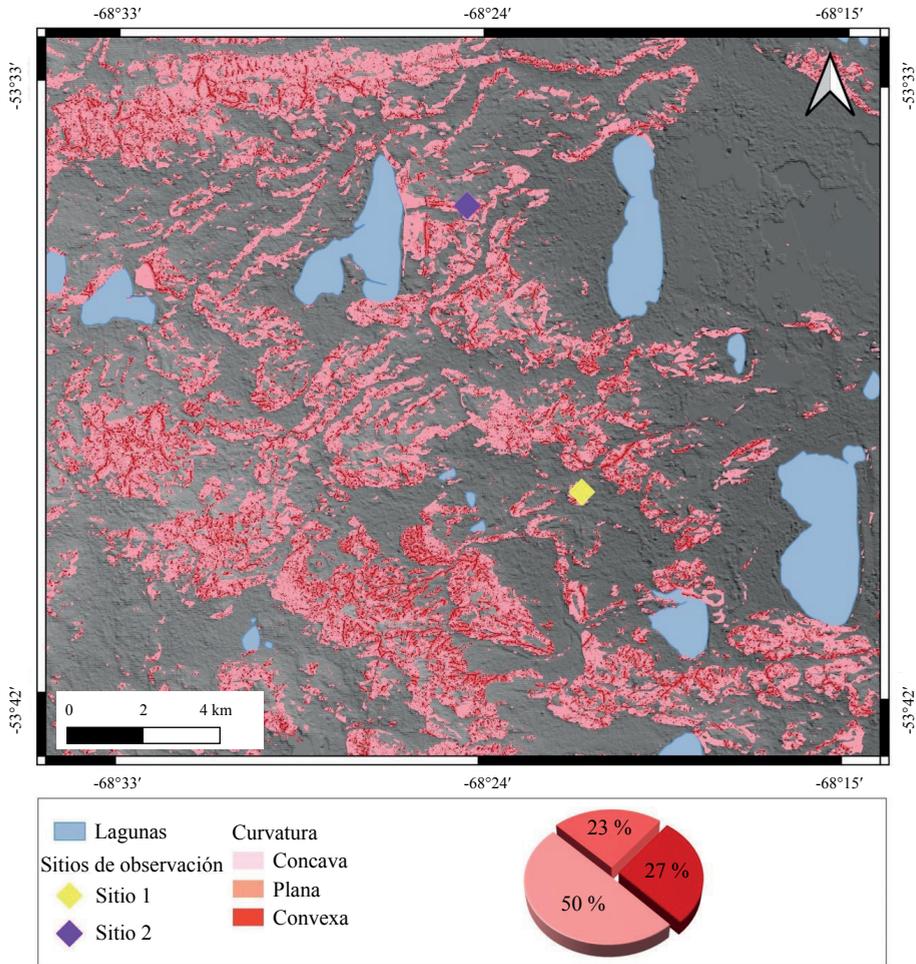


Figura 7. Distribución de las laderas con orientación N-NE con pendiente mayor a 6,59 %, según curvatura. Fuente: elaborado por Quiroga et al. (2020) sobre la base de MDEar.

Zonificación de áreas susceptibles a la erosión

Por medio de la combinación de los mapas de pendiente, orientación, curvatura del terreno se determinaron áreas potencialmente susceptibles a ser utilizadas por el ganado como zonas de resguardo, extrayendo progresivamente la cobertura vegetal por pisoteo y pastoreo, y dando inicio así a procesos erosivos de remoción en masa. En la figura 8 se representan la superficie de laderas con orientación NNE, el

valor de pendiente agrupado en tres clases (mayor a 6,59 %) y curvatura convexa. Se contabilizó una superficie de 56,8 km², de las cuales el 61 % (34,6 km²) posee una pendiente entre 6,59 y 12,16 %, seguido por el 30 % de la superficie (17 km²) correspondiente a laderas con pendiente entre 12,17 y 20,26 %. Por último, solo un 9 % (5,2 km²) de la superficie tiene una pendiente mayor a 20,27 %.

Análisis fotogramétrico

El análisis fotogramétrico multitemporal sobre la base de fotografía digital permitió evaluar el desarrollo de la superficie vertical de las escarpes de las hoyas. Se determinó un desarrollo de 155 m², representando el 2,76 % del total de superficie de ladera para la situación inicial de monitoreo, el 12/09/2012 (Fig. 9.A).

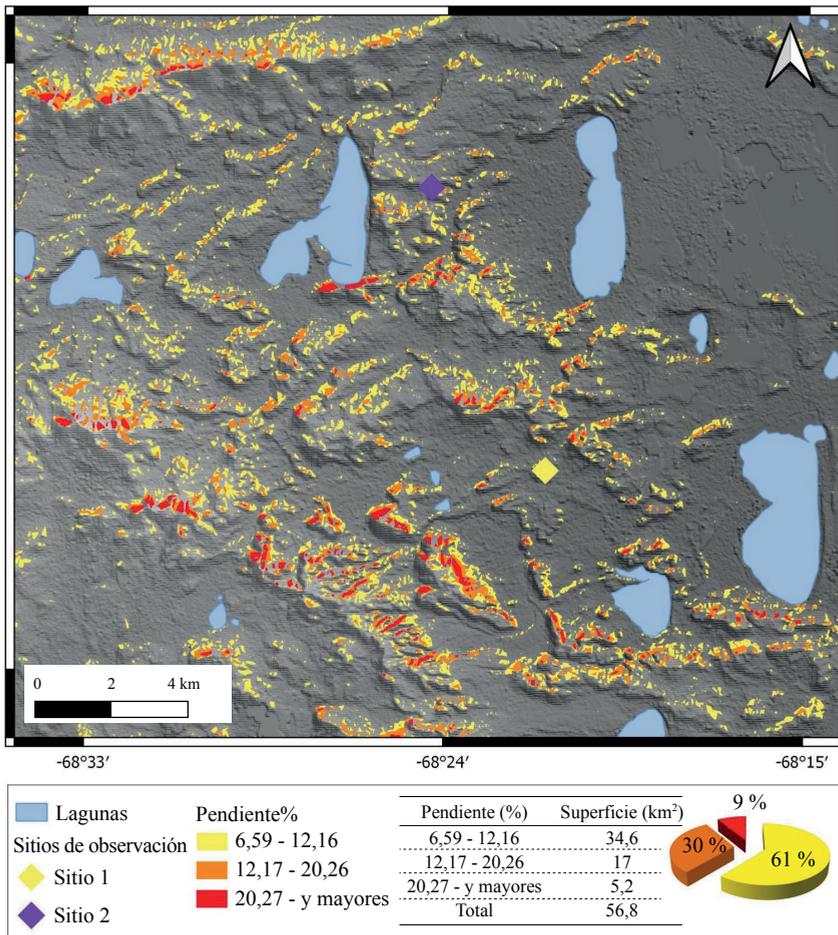


Figura 8. Mapa de zonificación de áreas susceptibles a procesos erosivos. Fuente: elaborado por Quiroga et al. (2020).

En cambio, se contabilizaron 186 m² de desarrollo de escarpa, o el 3,54 % del total de la ladera en el último monitoreo, realizado el 3/05/2016 (Fig. 9B). Este análisis permitió establecer un aumento en la superficie de escarpa de 31 m² en 4 años de análisis considerando una situación de erosión constante en el tiempo. La figura 8C corresponde al SO 2, el análisis de la fotografía del 23/10/2013, permitió establecer una superficie de 60 m² de escarpa, representando el 2,91 % del total de la ladera. En cambio, el monitoreo realizado en la fotografía del 03/05/2016 (Figura 9D), contabilizó una superficie de 176 m², representando un 6,74 % del total de la superficie de la ladera. Se identificó un aumento de 116 m² de superficie de escarpa en tres años. Esta variación está posiblemente relacionada con el aumento de la carga animal en el SO 2.

A través de la clasificación supervisada de una imagen SPOT 4 (Fig. 10), por medio del algoritmo de máxima verosimilitud, se utilizó una máscara en las laderas con exposición NNE con pendiente superior a 6,59 % y curvatura convexa para segmentar la imagen. De esta combinación de variables se cuantificó una superficie de 14,7 km² de laderas que presentan condiciones de erosión, ello permite establecer que el 25 % del total de las laderas del área se encuentran afectadas por formación de hoyadas. El resto de la superficie (42,53 km², el 75 %) no presenta rasgos erosivos según la clasificación de la imagen SPOT.

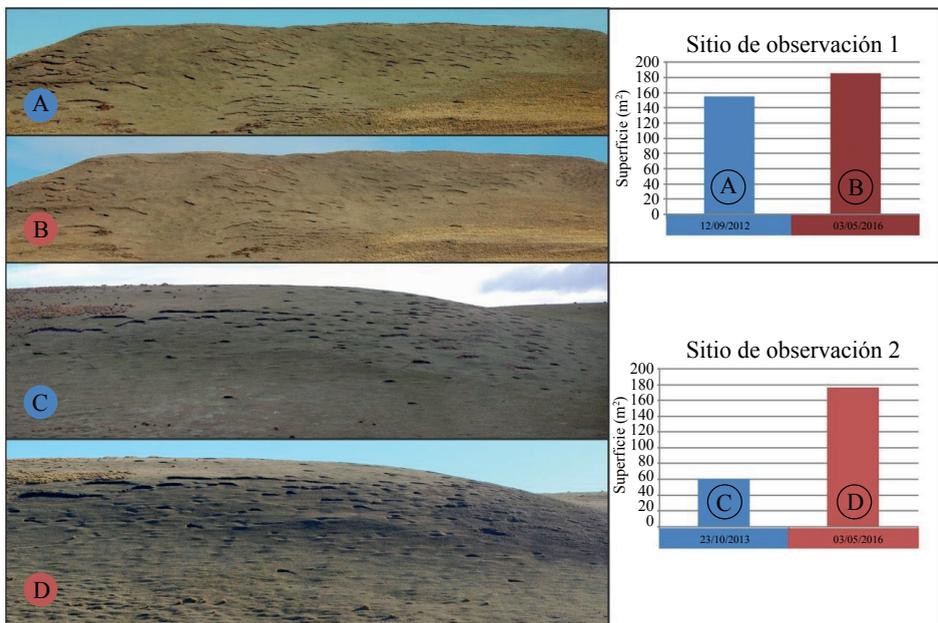


Figura 9. A) SO 1 Fotografía tomada por Quiroga el 12/09/2012; B) SO 1 Fotografía tomada por Quiroga el 03/05/2016; C) SO2 Fotografía tomada por Quiroga el 23/10/2013; D) SO 2 Fotografía tomada por Quiroga el 03/05/2016.

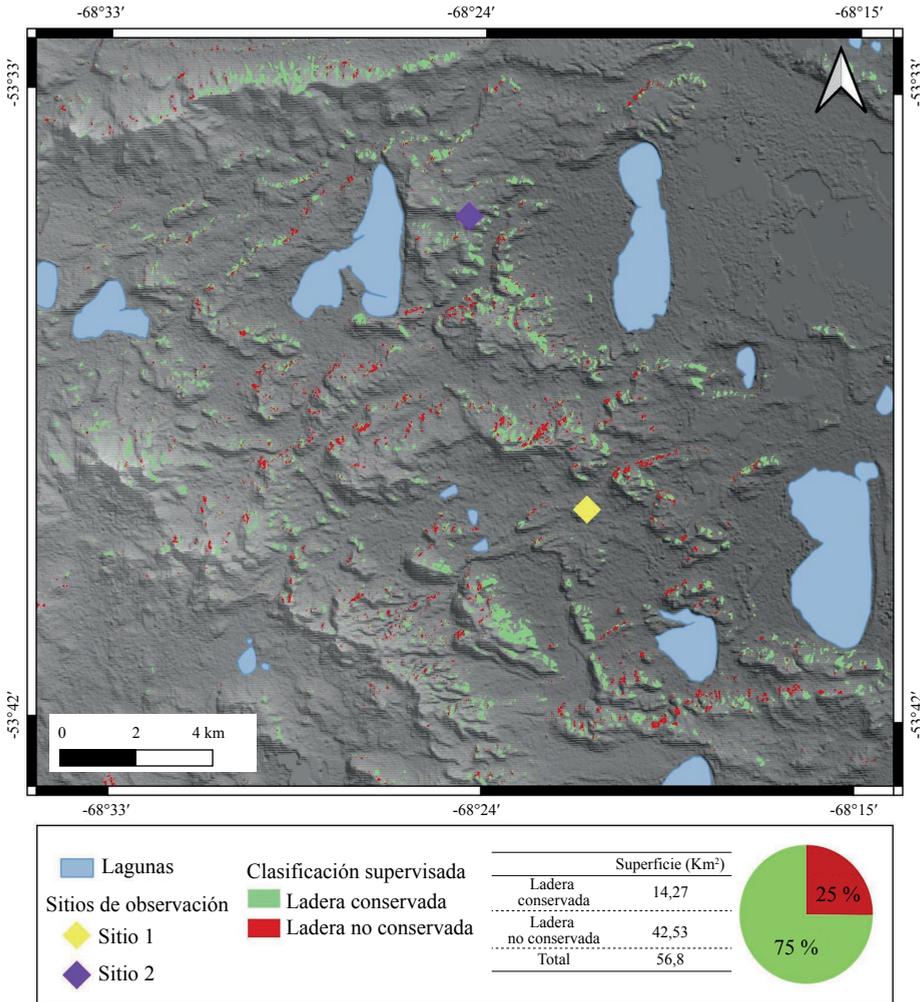


Figura 10. Clasificación supervisada de laderas con orientación NNE, pendiente mayor a 6,59 % y pendiente convexa. Fuente: elaborado por Quiroga et al. (2020)

Discusión: determinación de áreas de susceptibilidad de acontecimientos de procesos erosivos en laderas

Mediante la combinación de valores de pendiente, orientación y curvatura, se pudo identificar a escala regional áreas con una mayor susceptibilidad a la erosión. Estas áreas son las utilizadas por el ganado como refugio de los vientos predominantes y mayor exposición al sol. La eliminación progresiva de la cobertura vegetal es resultado de la presión que ejerce el ganado sobre el territorio y a pesar de ser ganadería extensiva, se limita la distribución del ganado a áreas benévolas en cuanto a la condición ambiental. De esta manera, se plantea la génesis de las

hoyadas en laderas orientadas NNE (solana), compuestas de rocas sedimentarias marinas con una cubierta de suelo muy delgada, determinando así una condición particular de erosión en ambientes semiáridos en el extremo sur de América. Las condiciones fisiográficas junto con el manejo del ganado determinan patrones de erosión que no se han descritos en regiones cercanas o similares. En la Patagonia extraandina la desertificación es considerada como el principal proceso erosivo desencadenado por el ganado (Mazzoni y Vázquez, 2010). Según estos autores, el 93 % de la Patagonia semiárida muestra signos de desertificación de un grado severo a moderado como consecuencia del sobrepastoreo, así como de la extracción de madera para calefacción y minería.

Los procesos erosivos desencadenados por la actividad ganadera se han descrito en otras partes del mundo como terrazas, pavimentos desérticos o deflación, pero no son comparables a las hoyadas presentadas en este trabajo. Según Greipsson (2012), para preservar las laderas afectadas se debe promover una recuperación de la cobertura vegetal y a su vez hacer un uso más esporádico de las áreas mayormente afectadas.

Conclusiones

Este trabajo muestra cuáles son las áreas de la estepa fueguina en los que la ganadería extensiva puede propiciar condiciones de erosión en laderas. Esta erosión consiste en la formación de hoyadas. Estas son depresiones en forma de media luna con escarpes de 20 a 45 cm de altura, disminuyendo progresivamente desde el centro hacia los extremos. Se desarrollan en laderas con orientación NNE, con un gradiente de pendiente mayor a 6,59 % y con una curvatura de tipo convexa. La superficie de laderas con orientación NNE con pendiente superior al 6,59 % es de 56,8 km², la misma se distribuye entre las estancias San Julio, Los Flamencos y El Salvador. Este valor de superficie representa el 30 % del total de las superficies de laderas.

A través del análisis fotogramétrico se demostró que en el sitio de observación 2 se incrementaron los valores de superficie de escarpes. Esto podría ser debido a un aumento en la carga animal de ese cuadro, que en consecuencia activa procesos erosivos.

La clasificación supervisada de las imágenes SPOT permitió cuantificar la superficie de laderas que se encontraban afectadas por la actividad ganadera. La superficie de laderas afectadas por la actividad ganadera extensiva es de 14,27 km², lo cual representa aproximadamente un 25 % del total de la superficie de laderas susceptibles a la erosión por la actividad ganadera. Estableciendo así herramientas para la identificación de áreas de susceptibilidad a procesos erosivos. El 75 % restante de la superficie de las laderas se encuentra en un riesgo potencial de ser erosionado.

En consecuencia, la metodología aplicada ofrece herramientas para la adopción de pautas de manejo del ganado y pastoreo según condiciones del relieve y el estado de la vegetación. Entre dichas pautas se sugiere, por ejemplo, no usar los campos que presentan laderas con pendientes mayores a 12,17 % y con orientación NNE en los períodos de primavera y verano en tanto que, durante el invierno, estas laderas servirán como resguardo y fuente de alimentación del ganado.

Agradecimientos

A los propietarios y administradores de las estancias San Julio y Flamencos, quienes nos permitieron el acceso a los campos para realizar relevamientos. A la Estación Astronómica Río Grande (EARG), que facilitó la logística para las campañas. La imagen SPOT 4 fue provista por CONAE mediante convenio suscripto con CADICCONICET. A Enrique Livraghi (INTA Ushuaia), inspirador del tema de estudio.

Referencias

- Anchorena, J., Cingolani, B., Livraghi, E., Collantes, M. B. & Stofella, S. (2001). *Manejo del pastoreo de ovejas en Tierra del Fuego*. Buenos Aires: Edipubli.
- Bujalesky, B., Coronato, A. & Isla, F. (2001). Ambientes glacifluviales y litorales Cuaternarios de la región del Río Chico, Tierra del Fuego, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 56(1),73-90.
- Cerdà, A., Brazier, R., Nearing, M. & de Vente, J. (2013). Scales and erosion. *Catena*, 102, 12.
- Cingolani, A. M., Anchorena, J. & Collantes, M. B. (1998). Landscape heterogeneity and long-term animal production. *Journal of Range Management Archives*, 51(1), 79-87.
- Codignotto, J. & Malumian, N. (1981). Geología de la Región al N del paralelo 54° L.S. de la Isla Grande de Tierra del Fuego. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 36(1), 4488.
- Corominas, J. & Alonso, E. (1984). Inestabilidad de laderas en el Pirineo Catalán. Tipologías y causas. En *Actas Jornadas sobre Inestabilidad de Laderas en el Pirineo*. Universidad Politécnica de Barcelona.
- Coronato, A. & Villareal, M. L. (2014). Modelado eólico en ambientes lagunares de la estepa fueguina, Argentina. En *Actas XIX Congreso Geológico Argentino* (4647 pp).

- Coronato, A., Fanning, P., Salemme, M., Oría, J., Pickard, J. & Ponce, J. (2011). Aeolian sequence and the archaeological record in the Fuegian steppe, Argentina. *Quaternary International*, 245(1), 122-135. doi: 10.1016/qua.2011.02.042.
- De Ferrariis, C. (1938). Una reunión de geólogos de YPF y el problema de la terminología estratigráfica. *Boletín de Informaciones Petroleras*, 15(171), 167.
- Eckert, S., Hüsler, F., Liniger, H. & Hodel, E. (2015). Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia. *Journal of Arid Environments*, 113, 1628. doi: 10.1016/j.jaridenv.2014.09.001
- Felícísimo, A. M. (1994). *Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Oviedo: Ediciones Pentalfa. Recuperado de <http://www6.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf>
- Fell, R., Ho, K., Lacasse, D. & Leroi, E. (2005). A framework for landslide risk assessment and management. En Hungr, I., Fell, R., Couture, R. & Eberhardt, E. (Eds.). *Landslide risk management* (pp. 225). Taylor & Francis Group.
- Gaitán, J. J., López, C. R. & Bran, D. E. (2009). Efectos del pastoreo sobre el suelo y la vegetación en la estepa patagónica. *Ciencia del suelo*, 27(2), 261270.
- Greipsson, S. (2012). Catastrophic soil erosion in Iceland: Impact of long-term climate change, compounded natural disturbances and human driven land-use changes. *Catena*, 98, 4154. doi: 10.1016/j.catena.2012.05.015
- Higginbottom, T. P. & Symeonakis, E. (2014). Assessing Land Degradation and Desertification Using Vegetation Index Data: Current Frameworks and Future Directions. *Remote Sensing*, 6(10), 95529575. doi: 10.3390/rs6109552
- Li, J., Lewis, J., Rowland, J., Tappan G. & Tieszen, L. L. (2004). Evaluation of land performance in Senegal using multi-temporal NDVI and rainfall series. *Journal of Arid Environments*, 59, 463480.
- Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F. & Riechenbach, O. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687711.
- Mantovani, F., Soeters, R. & van Westen, C. J. (1996). Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology*, 15, 213225.
- Mazzoni, E. & Vázquez, M. (2010). Desertification in Patagonia. *Developments in Earth Surface Processes*, 13, 352377.

Nordenskjöld, O. (1898). Notes on Tierra del Fuego. An account of the Swedish Expedition of 1895-1897. *The Scottish Geographical Magazine*, (13)8, 393399. doi: 10.1080/00369229708732960

Ochoa, P.A., Fries, A., Mejía, D., Burneo, J. I., Ruíz-Sinoga, J. D. & Cerdà, A. (2016). Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk in a semiarid basin of the Andes. *Catena*, 140, 3142.

Oría, J. (2012). *Patrones de movilidad pre-europeos en el norte de tierra del fuego, una aproximación geoarqueológica* (Tesis doctoral inédita). Universidad Nacional de La Plata. Argentina.

Oría, J., Salemme, M., Santiago, F. & Montes, A. (2010). Localidad Tres Marías: un caso para evaluar la pérdida de información arqueológica por erosión eólica en la estepa fueguina. *Cazadores-recolectores del Cono Sur*, 4, 159173.

Panigatti, J. L. (2010). *Argentina 200 años, 200 suelos*. Buenos Aires: Ediciones INTA.

Roig, F. A., Anchorena, J., Dollenz, O., Faggi, A. M. & Méndez, E. (1985). Las comunidades vegetales de la Transecta Botánica de la Patagonia Austral. Primera parte: La vegetación del área continental. En Boelcke, O., Moore, D. M. & Roig, F. A. (Eds.). *Transecta Botánica de la Patagonia Austral* (pp. 350-456). Argentina: CONICET, Reino Unido: Royal Society, Chile: Instituto de la Patagonia Chile.

Tuhkanen, S. (1992). The climate of Tierra del Fuego from a vegetation geographical point of view and its ecoclimatic counterparts elsewhere. *Acta Botanica Fennica*, 145, 165.

Villarreal, M. L., Coronato, A., Mazzoni, E. & López, R. (2014). Mantos eólicos y lagunas semipermanentes de la Estepa Fueguina (53°S), Argentina. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 27(2), 8196.

Fecha de recepción: 25 de noviembre de 2019

Fecha de aceptación: 7 de mayo de 2020

© 2020 por los autores; licencia otorgada a la Revista Universitaria de Geografía. Este artículo es de acceso abierto y distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia Atribución-NoComercial 2.5 Argentina de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/ar/deed.es_AR