



## **ESTIMACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA DE SUELOS PARA PLAN DE MANEJO DEL CAMPO FORESTAL AGUAS FRÍAS, PATAGONIA ARGENTINA**

*Ana Cecilia Dufilho,*  
*María Cristina Frugoni,*  
*Pablo Macchi,*  
*Alan Toth<sup>1</sup>*

### **Resumen**

En la Patagonia Argentina existen grandes extensiones de tierras degradadas por sobrepastoreo lo cual favorece la erosión hídrica de los suelos. De éstas existen más de dos millones de hectáreas aptas para la forestación (Gallo et al. 2005), pero con limitaciones ambientales que requieren estudios tendientes a elaborar propuestas de desarrollo y sostenibilidad.

El área en estudio situada en la margen derecha del Río Litrán, a 25 km de su desembocadura al Lago Aluminé de la Provincia de Neuquén, es utilizada por comunidades mapuche para realizar su actividad agropecuaria de producción caprina bajo un sistema trashumante y presenta erosión hídrica y eólica muy severa.

Unos de los objetivos del plan de manejo del campo forestal es diseñar un conjunto de medidas de control de la erosión que incluyen cierre perimetral, forestación y medidas estructurales para el control de cárcavas.

Resulta así necesario, caracterizar la erosión actual y la potencial, que además permitirá realizar el seguimiento de las medidas de control y mitigación a implementar.

Con estos fines, para el campo forestal en estudio, se confeccionó un mapa geoedafológico a partir de la fotointerpretación y posterior georeferenciación utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG). La metodología de mapeo de suelos se basa en la Clasificación Jerárquica de Geofomas, que es la estructura del Enfoque Geoedafológico para el mapeo de suelos (Zinck, 1989). La clasificación de la erosión actual se realizó por el método del *Bureau of Land Management* (USDI) mediante inspección visual en el terreno de siete aspectos de erosión en superficie. La estimación de la erosión potencial de los suelos del campo forestal se realizó utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) y ArcGis 9.2

---

<sup>1</sup> Universidad Nacional del Comahue. Asentamiento Universitario San Martín de los Andes - Pasaje de la Paz 235 - (8370) San Martín de Los Andes - Neuquén - TE: 02972427618 - email: [ceciliadufilho@gmail.com](mailto:ceciliadufilho@gmail.com)

(ESRI, 2006) para realizar el análisis espacial, obteniendo un mapa de pérdida anual de suelos en tn/ha/año con una resolución espacial de 30 m.

La aplicación de herramientas de análisis espacial al estudio de la erosión hídrica de los suelos de la Patagonia Argentina contribuye al objetivo de definir un programa de desarrollo y manejo adecuado, en función del estado y grado de erosión potencial de los mismos.

**Palabras clave:** suelo, erosión, análisis espacial, Sistema de Información Geográfica.

### **Abstract**

In Argentine Patagonia there exist large extensions of lands degraded by overgrazing, this favours soil water erosion. Two million hectares are eligible for forestation (Gallo et al. 2005), with some environmental limitations that require previous studies to prepare development and sustainability proposals. The study area is located in the right margin of the Litrán River, 25 kms of its estuary in Aluminé Lake (Province of Neuquén). In this area, some Mapuche (araucanian) communities carry out stock breeding (mainly goats) using a migrating system. This region presents very severe Aeolian and hydrological erosion.

The objective of the afforestation management plan of this land, is the design of control measures, to stop erosion, like perimeter close, afforestation and structural measures for controlling erosional gully.

It is then necessary, to characterize the actual and potential erosion, that would allow to carry out with measures monitoring to implement controls and mitigation.

Paper presents, pedology map by interpreting and georeferencing satellite images by a Geographical Information System. (GIS).

The mapping methodology was based in Hierarchical Classification of Landforms, which is the structure of the geopedology focus for mapping soil (Zinck, 1989). The classification of actual erosion was obtained from the method of the Bureau of Land Management (USDI) by visual inspection of seven aspects of erosion in surface. The estimation of the potential erosion of the floors of the forest field was carried out utilizing the Universal Soil Lost Equation (USLE) and ArcGis 9,2 (ESRI, 2006) to carry out the spatial analysis, obtaining a map of annual soil loss ( tn/has/year) with a spatial resolution of 30 m.

The application of spatial analysis tools in the study of soil water erosion in Patagonia, Argentina contributes to the objective of defining define a program of development and adequate management, as a function of the state and degree of potential soil erosion.

**Key words:** soil, erosion, spatial analysis, Geographical Information System

## **Introducción**

En la Patagonia neuquina las zonas potencialmente aptas para la forestación corresponden a la Región Cordillerana, montañosas y de considerables precipitaciones, siendo por tanto la erosión hídrica un riesgo importante en el aprovechamiento de estas áreas.

La alteración de la vegetación natural y la compactación del suelo por sobrepastoreo, modifican el proceso de infiltración del agua evitando la incorporación de humedad al suelo y la percolación hacia los acuíferos, y favoreciendo la escorrentía superficial. El agua que no se infiltra, circula rápidamente por la superficie del terreno constituyéndose en erosión laminar, que encauzada en regueros y cárcavas, van aumentando el potencial erosivo del agua en función del incremento de gradientes y de la carga de sedimentos.

El área de estudio ubicada sobre la margen derecha del Río Litrán, presenta erosión hídrica en diversos estados de avance, desde erosión laminar con surcos y pedestales hasta cárcavas activas, profundas, en cauces intermitentes con erosión retrogradante, sobre distintos tipos de suelos. Los arroyos permanentes que bordean el área forestal han alcanzado su nivel de base local en las rocas consolidadas del fondo del valle. Estos procesos erosivos están favorecidos por la disminución de la cobertura vegetal debido a la intensidad del pastoreo.

La producción forestal, como actividad económica combinada o sustitutiva del pastoreo, favorecería los procesos de abstracción e infiltración, aumentando la cobertura del suelo lo cual disminuiría los procesos erosivos. Por tanto se pueden preservar y mejorar las condiciones de escorrentía laminar en la cuenca a través de prácticas de manejo y en ciertos casos avanzadas con obras en los cauces a efecto de evitar la erosión hídrica encauzada.

En el presente trabajo se caracteriza la erosión hídrica actual y potencial de suelos a partir de la combinación de métodos tradicionales de mapeo de suelos y análisis espacial del riesgo con SIG. Este estudio ha sido la base para definir un programa de manejo y medidas de mitigación del campo forestal.

## **Materiales y Metodología**

### *Caracterización del área de estudio*

El campo Forestal en estudio se localiza en la provincia de Neuquén, a los 38° 45' S y 70° 53' O, a orillas del Río Litrán, inserto en la Región Andina, Subregión Subhúmeda Montañosa (Ferrer et al. 1991). En la zona, la altura media de las cumbres supera los 2.000 m s.n.m, las precipitaciones varían entre 750 mm al este y 2000 mm al oeste (Arroyo 1980, citado en Ferrer et al., 1991). La geología de base corresponde a basaltos, andesitas, brechas y aglomerados volcánicos (Ferrer, 1991) los que poseen una cobertura espesa de lapilli, arenas y cenizas volcánicas Holocénicas.

Geomorfológicamente, el área de estudio está inserta en un paisaje de montañas modeladas por la acción glacial. Se observan conspicuos rasgos que han

dejado la acción de los hielos, como lagos glaciarios, circos, valles colgantes, bloques erráticos y valles en forma de U.

Toda el área está surcada por cauces temporarios que están activos únicamente durante las precipitaciones o el deshielo y se van secando a lo largo del verano según la cantidad de aporte de agua subterránea que reciban.

El campo Forestal Aguas Frías posee una superficie total de 455 ha, con cota mínima de 1.490 m s.n.m. y la máxima en el cerro ubicado al norte con 1.720 m s.n.m. La precipitación media anual en el campo, de acuerdo a datos de la Estación Meteorológica Litrán es de 1.185 mm.

#### *Realización del mapa geoedafológico*

Se establecieron 13 puntos de muestreo a fin de caracterizar cada una de las unidades de mapeo identificadas mediante fotointerpretación de pares estereoscópicos de fotografías aéreas a escala 1:50.000 aprox., del Plan Vuelo Cordillerano. En cada uno de los puntos de muestreo, se abrió una calicata en la que se realizó la descripción del sitio y del suelo, de acuerdo a las normas establecidas (Schoeneberger *et al.*, 1998), toma de muestras y la clasificación. Asimismo, se realizaron sondeos con barreno, a fin de corroborar la homogeneidad en ciertas unidades o para detectar variaciones significativas en los cuerpos de suelo.

Posteriormente al trabajo de campo, se realizó una corrección de las delineaciones y se elaboró la leyenda definitiva del mapa de suelos. Cabe destacar que el mapa realizado abarca una superficie mayor a la del campo -igual a las subcuencas de los dos arroyos que atraviesan el campo-, a fin de favorecer una mejor comprensión de los componentes del paisaje. Aplicando el Enfoque Geoedafológico (Zinck, 1989) quedaron definidas 21 Unidades de Mapeo (Formas del terreno) integradas en 2 Litologías, 3 Tipos de Relieve y 1 Paisaje.

Con la información de las descripciones morfológicas y datos analíticos, se caracterizaron cada una de las unidades de mapeo y se definieron los suelos integrantes de las mismas, a excepción de las que se encontraban en su totalidad fuera de la propiedad. Los suelos se clasificaron a nivel de Subgrupo (Soil Survey Staff, 1992). En laboratorio se realizó el análisis textural de 5 muestras a efectos de separar las fracciones de suelo según su comportamiento frente a la erosión hídrica.

#### *Determinación de la erosión actual*

El inventario de la erosión actual, tiene por objeto evaluar la presencia y grado de intensidad de las distintas formas de la erosión. Estos grados de erosión tienen diferente significación según los suelos y las regiones, dependiendo de los objetivos, de la escala del mapa, de la cobertura, etc.

Se utilizó el método de clasificación del Bureau of Land Management (MMA, 2000), que caracteriza la erosión mediante la inspección visual en terreno de 7 aspectos de la superficie: 1) Movimiento de la capa superficial de suelo, 2) Presencia de acumulaciones de capas finas; 3) Pedregosidad; 4) Formación de regueros; 5) Formación de pedestal de erosión; 6) Formación de una incipiente red de drenaje (flow patterns) y 7) Formación de cárcavas y barrancos.

### *Determinación de la erosión potencial*

La estimación de la erosión de suelos en el campo Aguas Frías se realizó utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) y las capacidades de análisis espacial de ArcGis 9.2 obteniendo un mapa de pérdida anual de suelos en tn/ha/año con una resolución de 30m.

La USLE formulada por Wischmeier y Smith (MMA, 2000), es el modelo de estimación de la erosión en parcelas más utilizado; es un método cuantitativo paramétrico y multiplicativo. Evalúa la pérdida de suelos producida por erosión hídrica debido a escorrentía superficial que se produce en regueros y entre regueros, sin considerar las formas de erosión en cárcavas y barrancos. Tampoco estima el transporte de sedimentos a través de la red fluvial ni la erosión producida en ésta. La ecuación tiene la siguiente expresión:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

donde: A pérdida media anual de suelo ( $M/L^2 \cdot T$ )

R factor de lluvia ( $L.F.L/L^2T.T.$ ), índice de erosión pluvial (Wischmeier y Smith)

K factor de erosionabilidad del suelo ( $M.L^2.T/L^2.L.F.L.$ )

L factor longitud de la pendiente (adimensional)

S factor de inclinación de pendiente (adimensional)

C factor de ordenación de cultivo (adimensional)

y P factor de control de la erosión mediante prácticas de cultivo (adimensional)

El **factor R** mide el efecto de la precipitación sobre la erosión y está definido por:

$$R = \frac{EI_{30}}{100} \text{ julios-cm/ m}^2\text{-hora} \quad (2)$$

donde E: energía cinética del aguacero ( $j/m^2$ )

$I_{30}$ : máxima intensidad de lluvia en 30 minutos ( $cm/h$ )

En el área de estudio no se dispone de registros continuos para obtener  $I_{30}$ , por lo que se buscaron métodos más sencillos como los que se indican a continuación.

Índice de agresividad climática de Fournier (1960)(Almorox *et al.*, 1994):

$$F = \frac{p^2}{P} \quad (3)$$

donde  $p$  es precipitación mensual del mes más lluvioso y  $P$  precipitación anual

Índice de Arnoldus (1977):

$$A = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P} \quad (4)$$

donde  $p_i$  es precipitación del mes  $i$  y  $P$  precipitación anual

El **factor K** mide la resistencia del suelo a ser arrancado por la lluvia y transportado por la escorrentía; depende de las propiedades del suelo.  $K$  se determina empíricamente, se expresa en t/ha por unidad de pluviosidad  $EI_{30}$  en condiciones estándar de pendiente del 9%, longitud 22.13m y en barbecho continuo;

se puede calcular mediante la ecuación correspondiente o a través del nomograma de Wischmeier para cada horizonte de suelo expuesto a la erosión (MMA, 2000). Las unidades definidas en el mapa de suelos para el campo Litrán, permite corregir los valores de K para considerar las áreas con pedregosidad, ponderando K por la superficie presente de cada tipo: suelos y piedras, para obtener un K representativo de la unidad de suelos.

El **factor L** mide el efecto del largo de la pendiente en la erosión tomando como base una longitud de las parcelas normalizadas en 22.13m y se estima con la ecuación (5).

$$L = \left[ \frac{\lambda}{22.1} \right]^m \quad (5)$$

donde  $\lambda$ : longitud del declive en metros. Distancia desde el origen de la escorrentía superficial hasta el inicio de depósito o hasta cauce.

$m$ : exponente influenciado por la interacción entre la longitud del declive y la pendiente. En la práctica varía entre 0.5 (pendiente >10%) a 0.6 (<10%).

El **factor S** mide el efecto de la inclinación del terreno en la erosión y se calcula con la siguiente expresión (6):

$$S = \frac{0,43 + 0,30s + 0,043s^2}{6,613} \quad (6)$$

donde: S: factor pendiente, s: inclinación en porcentaje

Wischmeier (1982) (MMA, 2000) define un factor topográfico L.S que es válido para pendientes uniformes con un mismo tipo de suelo y vegetación, proponiendo la ecuación (7) para pendientes del terreno menor a 9 % y la ecuación (8) para pendientes mayores a 9 %.

$$L.S = \left[ \frac{\lambda}{22.1} \right]^{0,3} \cdot \left[ \frac{0,43 + 0,30s + 0,043s^2}{6,613} \right] \quad (7)$$

$$L.S = \left[ \frac{\lambda}{22.1} \right]^{0,3} \cdot \left[ \frac{s}{9} \right]^{1,3} \quad (8)$$

Moore and Burch (1986) proponen la ecuación siguiente para determinar LS con ArcGis:

$$LS = (\text{flujo acumulado} \cdot \text{tamaño celda} / 22.13)^{0.4} \cdot \text{sen pendiente} / (0.0896)^{1.3} \quad (9)$$

donde 22,13 es el largo y 0,0896 = 5,16 grados es la pendiente de la parcela estándar del USLE.

El **factor C** expresa la relación entre las pérdidas de suelo en una parcela con una determinada cobertura vegetal y las pérdidas que tiene lugar en una parcela con barbecho continuado, a igualdad de las demás condiciones. Se estimó mediante tabla que estiman este valor en función del tipo, porcentaje y secuencia de la cobertura y cantidad de aguaceros (MMA, 2000).

El **factor P** mide el efecto de las prácticas de conservación, define la influencia de las prácticas y cultivos para conservar. En caso de no existir prácticas su valor es 1.

La utilización del SIG permite aplicar las ecuaciones del modelo USLE a toda campo forestal estudiado y obtener resultados para toda el área de manera rápida y eficiente.

Las etapas para la aplicación del SIG son:

- 1.- definir unidades homogéneas (polígonos) de los factores R, K, L, S, C y P
- 2.- transformar estos polígonos a unidades geométricas: grilla
- 3.- obtener los mapas aplicando la ecuación USLE
- 4.- agrupar los valores obtenidos en clases de grado de erosión.

Se considera tolerable la pérdida de suelo en cultivo entre 2 y 12.5 t/ha/año (MMA, 2000)

## **Resultados y discusión**

### *El mapa de erosión actual*

El mapa de la Figura 1 muestra la erosión actual calculada por el método indicado utilizando ArcGis 9.2 a partir de la información obtenida en el estudio de suelos y en el hidrológico. Se ha incluido una clase de afloramientos rocosos (en cimas y cañadones) ya que en estas áreas predominan las rocas cuya degradación y erosión se realiza por otros procesos y es mucho más lenta. Se observa que las áreas estables son pequeñas zonas de baja pendiente y suelos profundos. En el resto del área todas las superficies presentan algún grado de erosión de ligera a severa.

### *Erosión potencial con ArcGis*

Como se indicó en la metodología, la primera etapa para modelar la erosión con SIG consiste en representar cada factor en capas de información, en nuestro caso, polígonos. El Factor R se obtuvo a través del índice de Fournier y de Arnoldus (tabla 1). Los valores obtenidos con el primero se consideran muy bajos (de acuerdo a lo que se expresa en la bibliografía consultada), por lo que para la modelación se tomaron los datos de la estación Litrán Abajo con el método de Arnoldus.

**Tabla 1:** Factor R obtenido por índice de Fournier y Arnoldus.

<b>Estación</b>	<b>Índice de Fournier</b>	<b>Índice Arnoldus</b>
Litrán Abajo	28,07	128,90
Batea Mahuida Abajo	58,32	199,85
salida Lago Aluminé	42,40	118,95

El factor K se obtuvo con la ecuación de Wischmeier tomando como unidad homogénea a cada unidad de mapeo generada en el estudio de suelos. La infiltración base medida es superior a 13 cm/h lo cual indica suelos muy permeables. Además se corrigió por pedregosidad obteniendo el Mapa de la Figura 2.

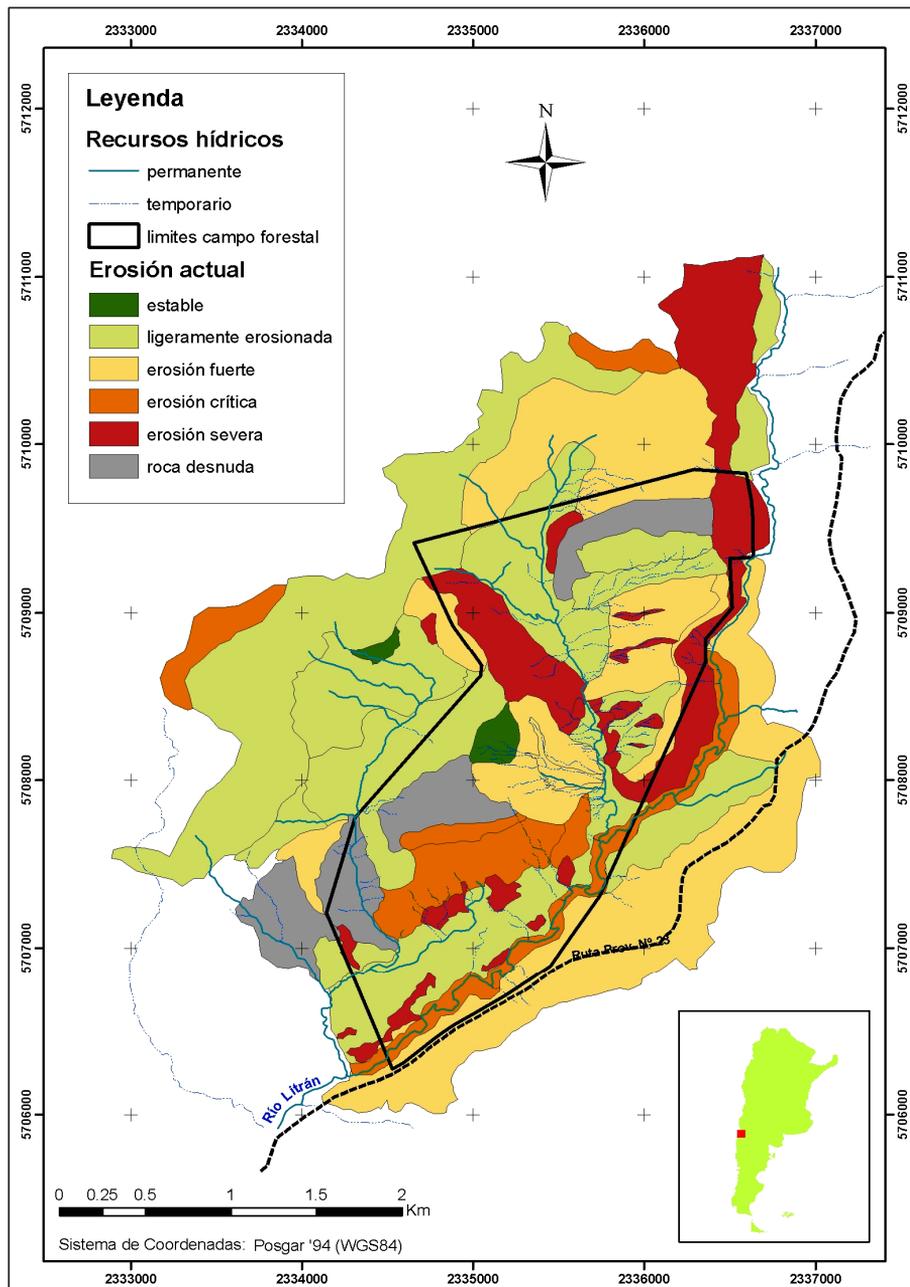


Figura 1: erosión actual (año relevamiento 2007)

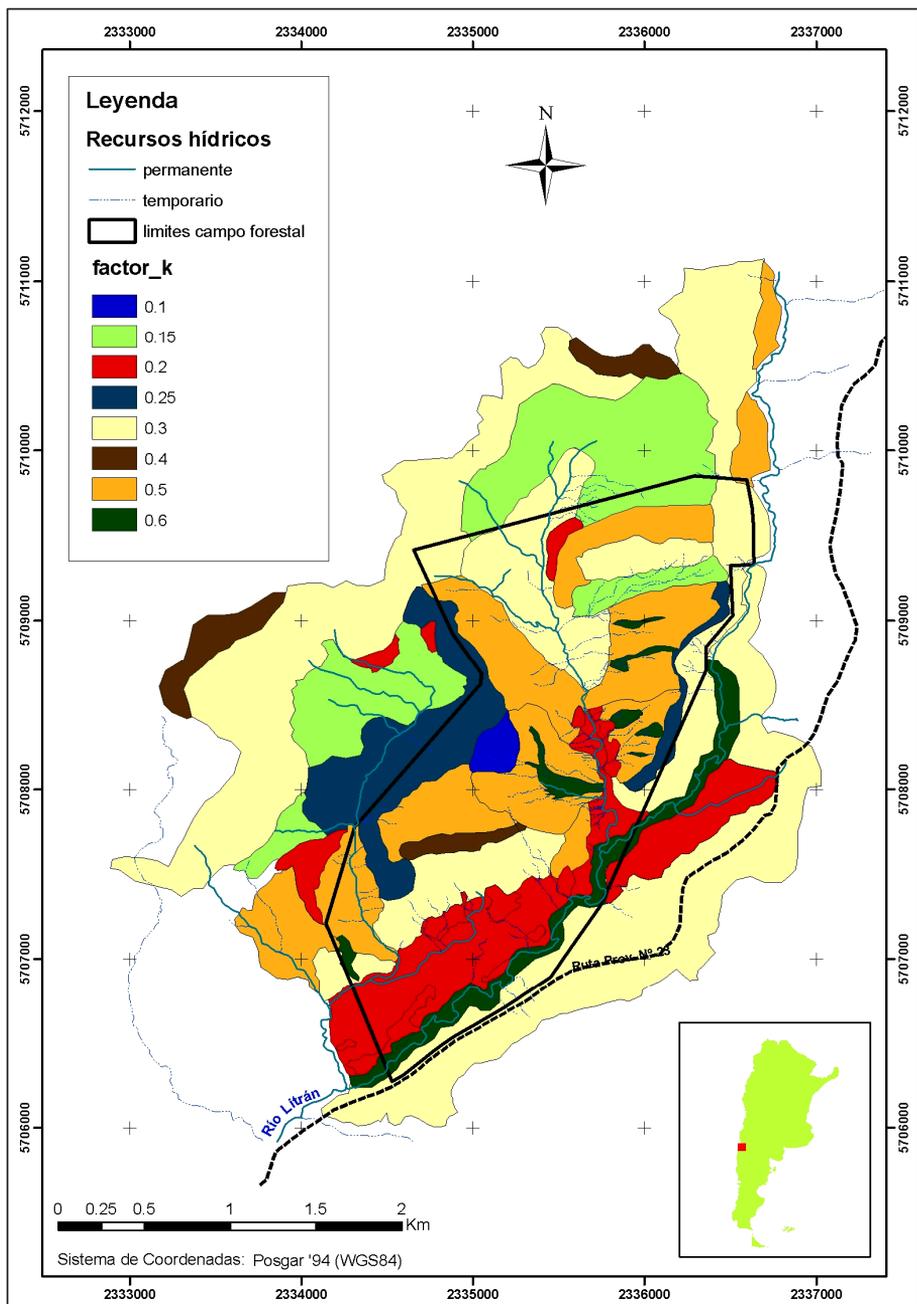


Figura 2: factor K erosionabilidad del suelo ( $t/haxm^2 \cdot h/h.J.cm$ )

Para obtener el factor LS según la ecuación (9), es necesario conocer la longitud del flujo acumulado y la pendiente del terreno. Para ello se utilizó el Modelo Digital de Elevación del STRM 90m, mejorado en su definición espacial mediante interpolación lineal incorporando información de campo. Se obtuvo un tamaño de celda de 30mx30m. El resultado se muestra en la Figura 3 donde se observan en tonos claros los valores pequeños de LS y en oscuro los valores altos correspondientes a superficies continuas en pendiente.

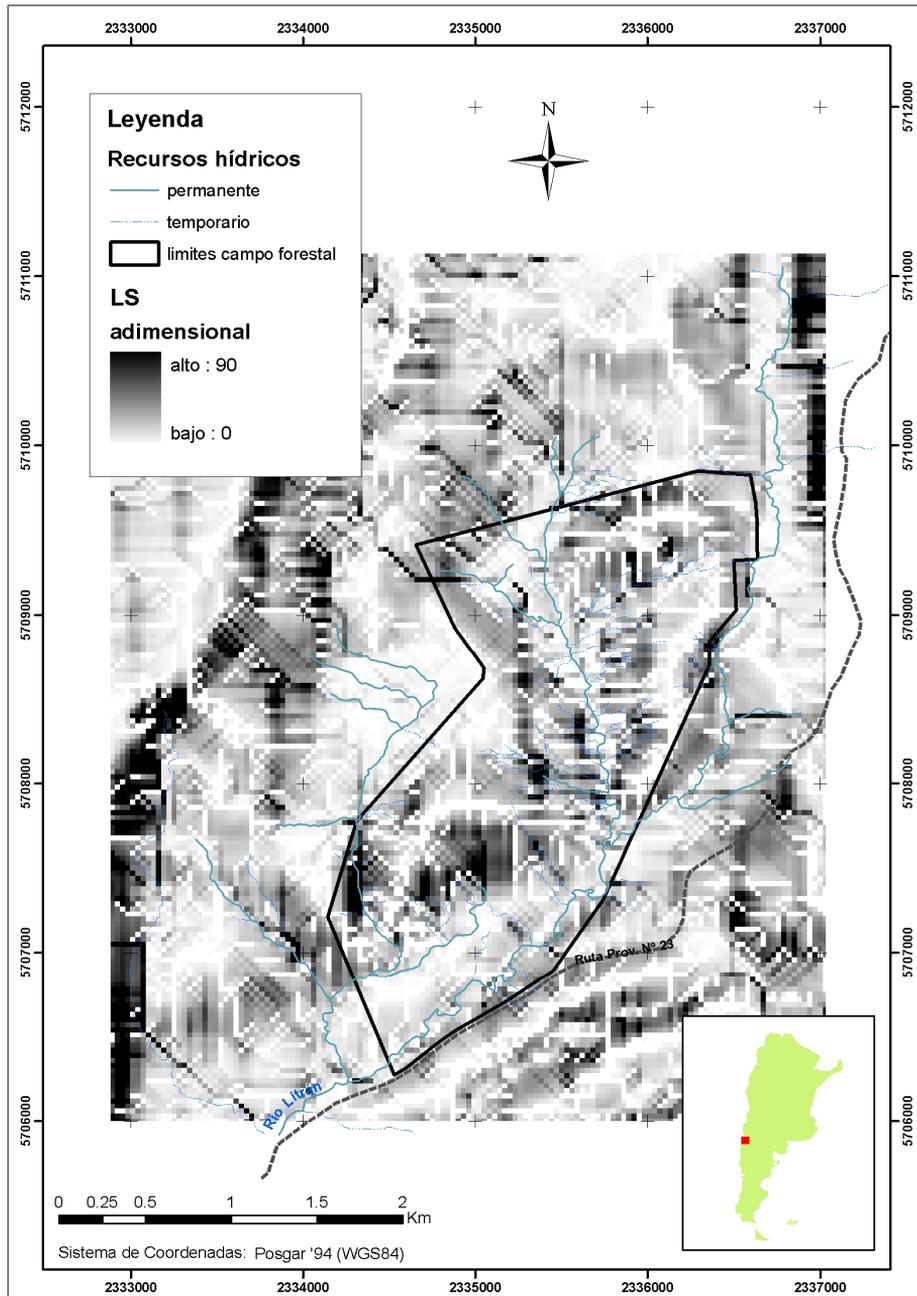


Figura 3: factor LS de longitud y pendiente del terreno (adimensional)

El factor C se estableció sobre la base de relevamientos a campo del tipo y porcentaje de cobertura vegetal y se generaron unidades homogéneas basadas en el estudio de vegetación. En la Figura 4, los valores altos indican áreas con un tipo de vegetación que por el tipo o por la cobertura, favorecen la erosión hídrica.

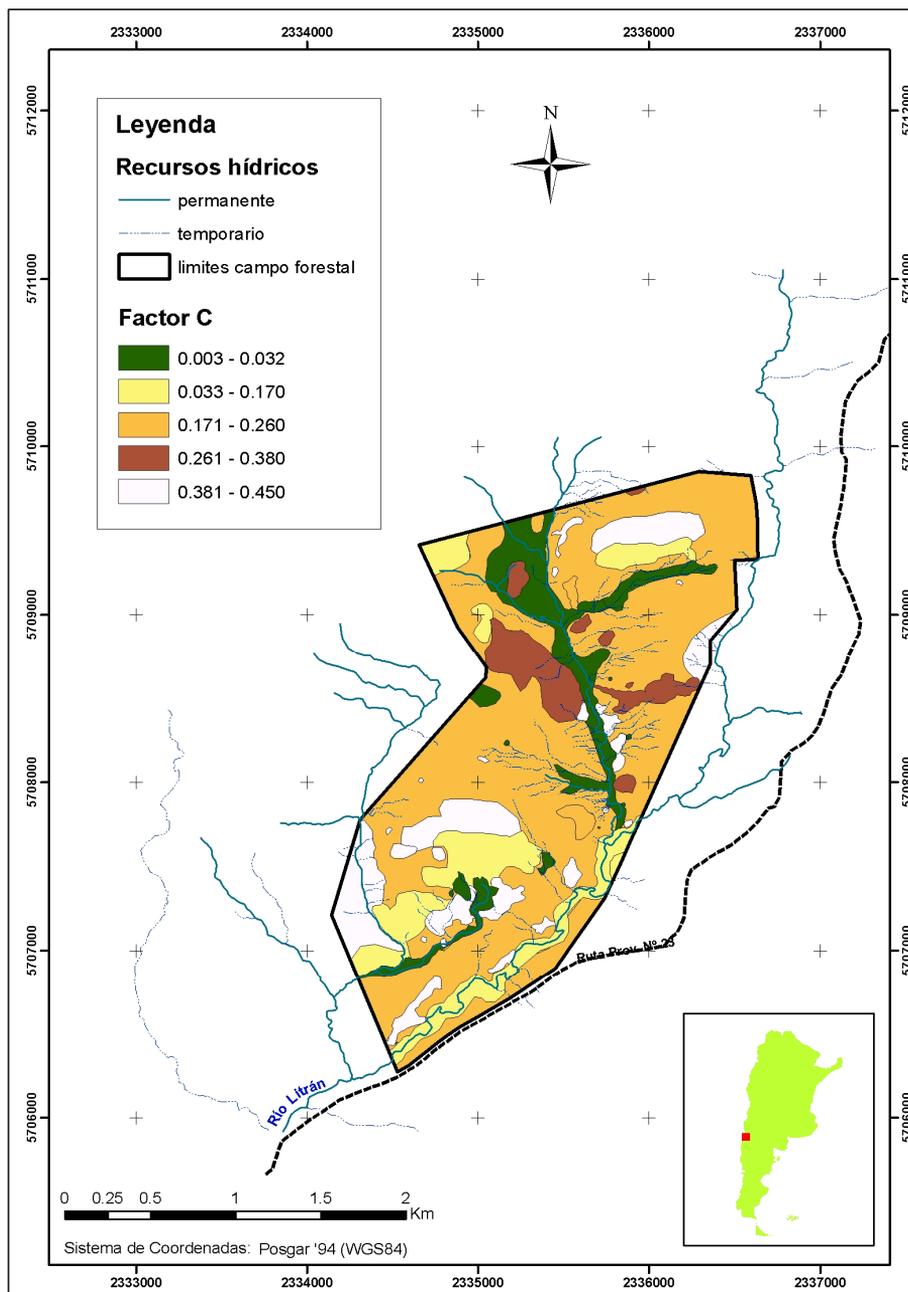


Figura 4: factor C de ordenación de cultivo (adimensional).

No se mapeó el factor P ya que su valor se tomó igual a 1 para todo el campo dado que en el momento de la modelación no existían prácticas de control de la erosión.

Para resolver la ecuación USLE con ArcGis es necesario transformar esta información en formato grilla, cuyo tamaño de celda se definió en 30mx30m. La ecuación se resolvió en cada celda obteniendo un mapa que se reclasifica en las clases significativas de erosión. Se obtuvo de esta manera el mapa de áreas de riesgo potencial (Figura 5). Se puede observar que las áreas más estables corresponden a praderas hidrófilas mientras que laderas con baja cobertura y suelos arenosos presentan los más altos valores de pérdida potencial de suelos.

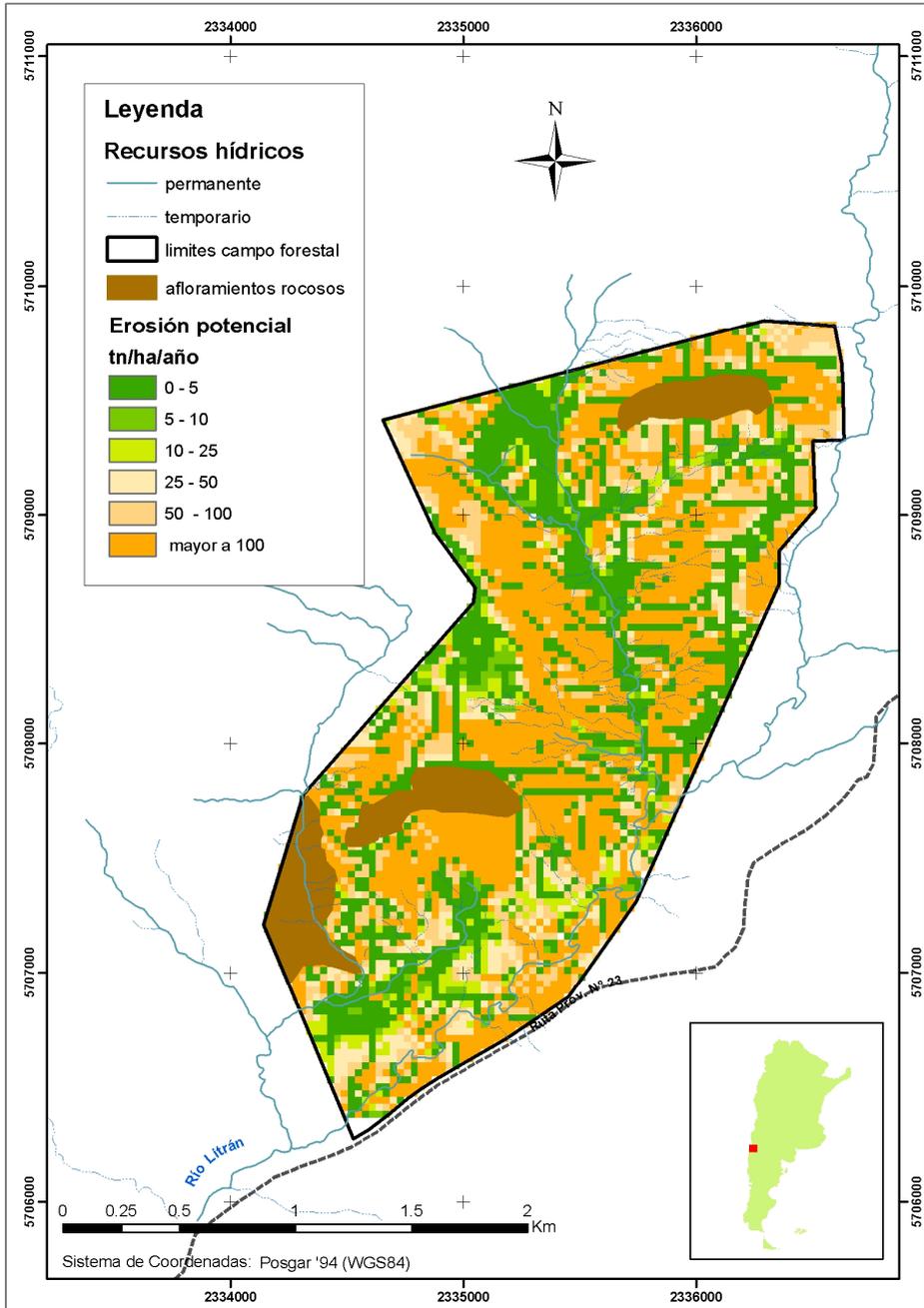


Figura 5: erosión potencial actual (tn/ha/año)

Se han cuantificado las superficies (Tabla 2) encontrando que el 40 % de la misma está afectada por erosión muy severa, mientras que solo el 34 % de la superficie del campo presenta condiciones de erosión aceptable.

**Tabla 2:** superficie afectada por erosión potencial actual

Erosión potencial (tn/ha/año)	Superficie afectada (ha)	Superficie afectada (%)
0 -5	147	32
5-10	9	2
10 -25	20	4
25 -50	36	8
50 – 100	64	14
Mayor a 100	179	40

En la última categoría del Tabla 2, se incluye la superficie correspondiente a afloramientos rocosos.

## Conclusiones

La metodología es adecuada para clasificar el territorio en áreas con distinto grado de riesgo de erosión hídrica ya que considera las condiciones físicas y las actuaciones humanas que sobre él se realizan, pudiendo orientarse de esta manera las medidas de mitigación hacia los sitios más afectados.

La estimación de la erosión actual realizada en base a observaciones de campo, determina que el grado de erosión es avanzado y generalizado y sólo una pequeña zona no presenta evidencias de erosión,

La estimación de erosión potencial con USLE determina que sólo un 34% del campo forestal presenta erosión potencial aceptable (menor a 10 tn/ha/año), mientras que la superficie restante presenta niveles elevados de erosión hídrica potencial que es necesario controlar.

El diagnóstico de la situación actual, es la base para monitorear en el futuro, la eficiencia de las medidas que se implementarán para controlar la erosión hídrica.

El aumento de detalle en el DEM permite definir las áreas afectadas con mayor precisión.

El efecto del cierre con alambrado (ya finalizado) y la forestación (en marcha) sobre la erosión hídrica, se podrá evaluar en el futuro modificando los valores del factor P en el modelo calibrado.

## Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la compañía YPF S.A. que ha facilitado los recursos para realizar estos estudios mediante convenios con la Universidad Nacional del Comahue.

## Referencias

- ALMOROX J., DE ANTONIO R., SAA REQUEJO A., DÍAZ M. C., GASCÓ J. (1994). *Métodos de estimación de la erosión hídrica*. Editorial Agrícola Española, S.A. 152 p.
- ESRI. ArcGis 9.2. *Manual del usuario*.
- FERRER J.A., IRISARRI J. Y MENDÍA, J.M. (1991). Cartografía de los suelos. En: *Estudio regional de suelos de la provincia del Neuquén*. Vol 1 Tomo 3. CFI - COPADE.
- FERRER J.A. (1991). Geología. En: *Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén*. Plano N° 2. CFI - COPADE.
- GALLO L., MARTÍNEZ MAIER A., AZPILICUETA M., MARCHELLI P. Y MONDITO V. (2005). Subprograma coníferas y otras especies en la Región Patagónica. En: *CA Norverto (ed). Mejores árboles para más forestadores*. SAGPyA. Buenos Aires.
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA)(2000). Guía para la elaboración de estudios del medio físico. *Serie monografías. España*. 809p.
- MOORE I.D., BURCH, G.J. (1986). Physical basis of the length - slope factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society American Journal*, 50, 1294-1298.
- SCHOENEBERGER P.J., WYSOCKY D.A., BENHAM E.C. Y BRODERSON W.D. (1998). *Libro de campaña para la descripción y muestreo de suelos*. Centro Nacional de Relevamiento de Suelos. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Lincoln, Nebraska.
- USDA (2010). *Keys to Soil Taxonomy*. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, undécima edición. 346p
- ZINCK JA. (1989). *Physiography and Soils*. Lecture Notes. ITC. Enschede. The Netherlands.