

Relación entre la erosión hídrica superficial y la distribución de la pérdida de calcio, magnesio y potasio del suelo

F. J. GASPARI¹, M. VÁZQUEZ² & J. LANFRANCO²

¹ Manejo de Cuencas Hidrográficas; ² Edafología. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, U.N.L.P.
E-mail: corrector@ceres.agro.unlp.edu.ar

GASPARI, F. J., M. VÁZQUEZ & J. LANFRANCO. 2006. Relación entre la erosión hídrica superficial y la distribución de la pérdida de calcio, magnesio y potasio del suelo. *Rev. Fac. Agron.* 106 (1):47-56.

La planificación hidrológica integral de los recursos de una cuenca hidrográfica contribuye a determinar y controlar algunos de los factores limitantes de la producción, caracterizando el ambiente, identificando restricciones, entre otras, de carácter físico, así como las vinculadas al uso del suelo. El objetivo de este trabajo fue cuantificar la erosión hídrica superficial de la cuenca del Río Arrecifes y a través de ella, la distribución y pérdida potencial de nutrientes básicos, a los fines de dimensionar la magnitud del fenómeno e identificar áreas de mayor susceptibilidad a padecer la problemática. Para la evaluación de la degradación de los suelos por erosión se aplicó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (E.U.P.S.) y su distribución espacial por tecnología S.I.G., que favoreció la manipulación, diseño y análisis de la información. Esta metodología permitió identificar la presencia de una tasa de erosión relativamente baja en la cuenca (2 a 4 Mg.ha⁻¹.año⁻¹), a pesar de lo cual pudieron identificarse sitios críticos muy vulnerables a un potencial proceso erosivo, considerando que se definió que el factor de gradiente topográfico presenta mayor influencia en ese proceso en la cuenca. La pérdida potencial de nutrientes asociada a la erosión hídrica, sería mayor a 10 kg.ha⁻¹.año⁻¹ de Ca⁺², a 1 kg.ha⁻¹.año⁻¹ de Mg⁺² y 2 kg.ha⁻¹.año⁻¹ de K⁺. El proceso erosivo evaluado y su consecuente incidencia en el empobrecimiento superficial de estos nutrientes, incidiría negativamente en el potencial productivo de la región.

Palabras clave: cuenca, erosión, nutrientes.

GASPARI, F. J., M. VÁZQUEZ & J. LANFRANCO. 2006. Relationship between water superficial erosion and loss distribution of calcium, magnesium and potassium from the soil. *Rev. Fac. Agron.* 106 (1):47-56.

Integrated hydrological planning of the resources of a basin contributes to determine and control some of the limiting factors of farm production, characterizing the environment, identifying restrictions, among others, of physical character, as well as those related to the use of soil. The objective of this work was to quantify superficial water erosion in the Río Arrecifes basin and analyze the distribution and potential loss of basic nutrients, in order to measure the magnitude of the phenomenon and to identify areas with greater susceptibility to erosion. The Universal Soil Loss Equation (U.S.L.E.) was applied and its spatial distribution by the G.I.S technology for the evaluation of soil degradation by erosion, that favored manipulation, design and analysis of the geospatial and digital information. This methodology allowed identifying the presence of a relatively low erosion rate in the basin (2 to 4 Mg.ha⁻¹.year⁻¹); nevertheless critical sites very vulnerable to a potential erosion process could be identified. It was determined that the topographic gradient factor presents greater influence on that process in the basin. The nutrient potential loss associated to water erosion would be greater than 10 kg.ha⁻¹.year⁻¹ of Ca⁺², 1 kg.ha⁻¹.year⁻¹ of Mg⁺² and 2 kg.ha⁻¹.year⁻¹ of K⁺. The evaluated erosive process and its consequent incidence in the superficial impoverishment of these nutrients, would impact negatively in the productive potential of the region.

Key words: basin, erosion, nutrients.

INTRODUCCIÓN

La planificación hidrológica y gestión integral de los recursos de una cuenca hidrográfica, a través de su carácter sistémico, contribuye a determinar y controlar los factores limitantes de la producción, caracterizando el ambiente e identificando las restricciones naturales (geo-morfológicas, edáficas, hidrológicas, meteorológicas, biológicas) y las vinculadas al uso del suelo.

La erosión hídrica superficial es la remoción del material del suelo por acción del agua en ciertas partes de la cuencas y la deposición en otras (Kirkby, 1994). La degradación del suelo provocada por este fenómeno es el resultado de la dinámica del funcionamiento de una cuenca como sistema integrador. Iniciado el proceso de degradación es necesario controlarlo inmediatamente a través de medidas de conservación tendientes a prevenir mayores consecuencias degradativas (Lal & Stewart, 1992; Katsutoshi *et al.*, 1996). La utilización de herramientas informáticas, en general, y la geodatabase, en particular, son de gran ayuda por la posibilidad de registro de referenciación, manipulación y evaluación de gran cantidad de datos y variables espaciales.

En regiones de clima húmedo, la evaluación del riesgo de degradación química de un suelo permite determinar la disminución de la productividad actual o potencial como consecuencia de uno o más procesos, tanto naturales, como los que pueden derivarse de un uso inadecuado (López, 1988).

Dentro de los procesos derivados de la erosión, tiene fundamental relevancia la modificación de las reservas de nutrientes, tanto cualitativa como cuantitativamente. La capacidad de los suelos para retener los nutrientes en forma disponible para el uso de las plantas, es de suma importancia para valorar la productividad de un sitio. Las reservas de nutrientes excesivamente bajas constituyen, desde el punto de vista de la dotación, una forma

de degradación del suelo asociada en forma directa y negativa con la producción (Pritchett, 1991).

La pérdida natural de nutrientes en las fases líquida o sólida puede ocurrir por percolación en el perfil del suelo, en solución en el agua de escorrentía y adheridos a los sedimentos arrastrados por dicha escorrentía (Baker & Laflen, 1983).

De acuerdo a estos autores, la magnitud de estos fenómenos depende de la cantidad, persistencia, ubicación en el perfil del suelo y grado de interacción del nutriente con el suelo, como los factores más importantes. Debe agregarse a esto, la posibilidad de pérdida hacia la atmósfera de aquellos elementos que tienen formas volátiles.

En este sentido, cada nutriente muestra una dinámica particular, de acuerdo a la naturaleza del elemento y sus reacciones fisico-químicas. En los elementos básicos (calcio, magnesio y potasio) se puede producir, en general, un enriquecimiento de las zonas deprimidas del paisaje por movimientos descendentes en solución, como así también por los sedimentos arrastrados a causa de la erosión hídrica superficial y, en algunos casos, hasta el nivel de horizontes profundos, debido a procesos de descarbonatación de horizontes superficiales y carbonatación en profundidad.

La percolación de las bases en el perfil es el proceso natural de mayor incidencia en la acidificación. Este proceso es la resultante de una compleja interacción del clima, el relieve, la red hidrológica, el tipo de vegetación y la dinámica del agua, así como de la alterabilidad de los minerales y la textura del suelo.

El hombre puede contribuir a la acidificación, fundamentalmente a través de la exportación de bases, mediante la producción agrícola o pecuaria, y el empleo frecuente de altas dosis de fertilizantes de elevado índice de acidez (Vázquez *et al.*, 2001). La acidificación trae como consecuencia efectos directos e indirectos sobre la productividad de los suelos. Detectada la problemática, es necesaria

la organización de la información para brindar una distribución referenciada de la misma. Este procedimiento puede implementarse por medio de un modelo cartográfico, que permite la ordenación de la información espacialmente.

La cuenca en estudio del Río Arrecifes, con una superficie total de 9731,30 km², ubicada al norte de la provincia de Buenos Aires, Argentina, pertenece a la región denominada Pampa Ondulada, debido a la morfología de su paisaje, con pendientes irregulares en la zona superior de la cuenca.

El clima es templado con temperaturas que oscilan entre los 5,4 y 30,9 ° C. La precipitación media anual es de 972,9 mm, en la Estación Experimental Agraria de INTA Pergamino. El invierno es la estación seca, aunque el déficit hídrico de mayor importancia se produce durante el verano (F.A.A., 1992). Su pluviometría puede originar fenómenos erosivos de importancia, ya sea por la intensidad de las lluvias, como por su incidencia en el transporte en masa que provocan las crecidas de gran magnitud.

Si bien se trata de una zona con predominancia de suelos de aptitud agropecuaria, las principales limitaciones agronómicas en la cuenca se deben a la susceptibilidad a la erosión hídrica superficial y presencia de impedimentos mecánicos subsuperficiales. Secundariamente, pueden manifestarse limitaciones asociadas a la presencia de alcalinidad sódica y drenaje deficiente en algunas áreas linderas de arroyos y cañadas, así como de acidez en los horizontes superficiales en posiciones altas de la topografía y a la historia de uso productivo de los suelos.

Como hipótesis se plantea que la estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica, en la cuenca del Río Arrecifes, a través de un diagnóstico cartográfico cuantitativo de los recursos naturales, permite calcular la pérdida de nutrientes básicos del suelo y su eventual distribución.

El objetivo de este trabajo fue cuantificar la erosión hídrica superficial de la cuenca del Río Arrecifes y, a través de ella, la distribución y pérdida potencial de nutrientes básicos, a

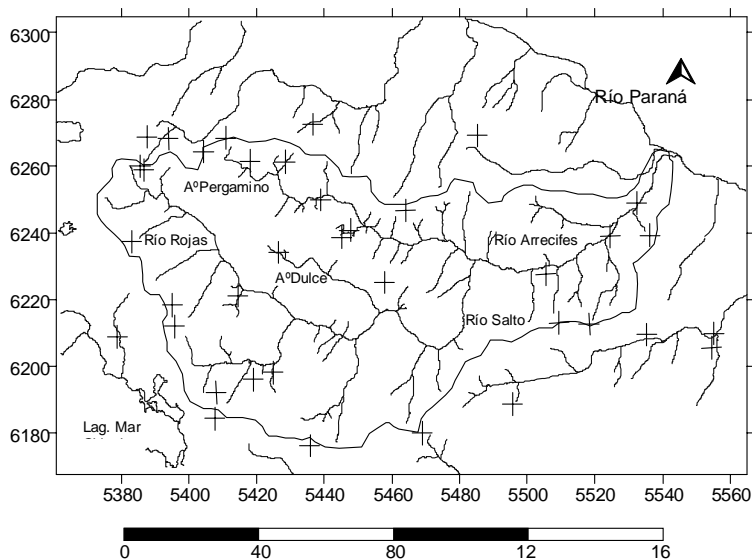


Figura 1. Ubicación de la Cuenca del Río Arrecifes y distribución de calicatas (+).

The Río Arrecifes basin location and trench distribution (+).

los fines de dimensionar la magnitud del fenómeno e identificar áreas de mayor susceptibilidad a padecer la problemática.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se desarrolló en el área correspondiente a la cuenca del Río Arrecifes, ubicada al norte de la provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 1).

Para la evaluación y cuantificación de la erosión hídrica superficial de los suelos de la cuenca, se aplicó el modelo matemático denominado Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (E.U.P.S.) (Wischmeier & Smith, 1978) según la metodología propuesta por Mintegui Aguirre & López Unzú (1990) y López Cadenas de Llano (1998).

El cálculo de la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial se utilizó para estimar la consecuente y potencial distribución de calcio, magnesio y potasio en la cuenca. Las hipotéticas pérdidas de estos nutrientes básicos permitieron establecer sitios críticos para la producción, con el propósito de promover el tratamiento racional de suelos afectados y el desarrollo de sistemas sustentables (López, 1988).

La *secuencia metodológica* para cumplir el objetivo planteado, se detalla a continuación:

1. Identificación de la cuenca en estudio y los parámetros que la definen en toda su superficie (Henaos, 1988; López Cadenas de Llano, 1998) a partir del drenaje y topografía (I.G.M., 1957; I.G.M., 1978) en una escala 1:50000.
2. Confección de la cartografía temática 1:500000 de suelos (INTA-Castelar, 1989), de relieve, de pendiente y Modelo Digital del Terreno, M.D.T., (I.G.M., 1957; I.G.M., 1978), de vegetación (cereales, oleaginosas, forestal y vegetación natural) y uso del suelo (agropecuario, forestal y sin actividad productiva) ambos obtenidos de datos de campo y carto-

grafía temática antecedente (I.G.M., 1994). Los mismos fueron digitalizados y procesados en el Sistema de Información Geográfica (S.I.G.) Idrisi 32 (Eastman, 1999).

3. Establecimiento de los factores que intervienen en la E.U.P.S. ajustados por S.I.G.: mapa de isoerodentas (R); mapa de erosionabilidad del suelo (K); mapa de longitud de pendientes (L); mapa de gradiente de pendientes (S); mapa de vegetación (C) considerando tipo de labranza (cero, mínima y convencional) y rotaciones, a partir de interpretación de imágenes satelitales con corroboración a campo; y mapa de prácticas de ordenación de cultivos (P) considerando este de valor unitario, debido a la no detección de aterrazamientos o cultivos a nivel, a la escala de trabajo (Wischmeier & Smith, 1978; FAO-PNUMA-UNESCO, 1981; Rojas & Conde, 1985; Vich, 1989; Mintegui Aguirre & López Unzú, 1990; López Cadenas de Llano, 1998; Eastman, 1999; Bruno & Gaspari, 2000).

4. Elaboración de matrices cartográficas de superposición (Eastman, 1999) para implementar la E.U.P.S., y obtener el mapa de pérdida de suelo por erosión hídrica superficial (A) ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$).

5. Análisis estadístico por regresión múltiple para interpretar el peso relativo de cada factor sobre la erosión hídrica superficial.

6. Confección de una base de datos de 149 perfiles edáficos realizados en la cuenca a partir de material cartográfico en escala 1:50000 (INTA Castelar, 1989) y material inédito de los autores. La misma consta de los siguientes datos analíticos presentes en el horizonte superficial: $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de Ca^{+2} , K^{+2} , Mg^{+} , y Na^{+} intercambiables; porcentaje de saturación cálcica, magnésica y potásica; pH en agua y pH en pasta; contenido de materia orgánica ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); porcentaje de limo, arena y arcilla (Etchevehere, 1976; INTA Castelar, 1989).

7. Realización de una cartografía afin a la base de datos anteriormente mencionada, por medio del método de interpolación de Kriging, para obtener la distribución espacial de los cationes de cambio y elementos texturales.

8. Elaboración de una cartografía final que relaciona la pérdida del suelo por erosión hídrica superficial y la consecuente pérdida de nutrientes básicos. Se obtuvo de mapas temáticos procesados con S.I.G. (Mintegui Aguirre & López Unzú, 1990; López Cadenas de Llano, 1998; Eastman, 1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La escala de trabajo utilizada 1:500000, denominada mesoescala, queda definida como la gradación donde prepondera el factor de desarrollo a lo largo del río único, siendo éste de fuerte influencia sobre la vegetación y la toponimia (Figura 1) (Sylla *et al.*, 1996).

Topográficamente, la cuenca se caracteriza por pendientes suaves, con un desnivel de 97 metros a lo largo de la cuenca (sentido W-E). La aplicación de la técnica de Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.) asistió en la creación de una geodatabase y realizar el modelo digital del terreno (M.D.T.) para esta-

blecer que la máxima pendiente se registra en 3,39 %, dentro de la planicie de inundación del curso de agua.

El M.D.T. permitió identificar sitios donde por características topográficas son potenciales receptores de nutrientes, como, por ejemplo, las planicies de inundación de cada curso de drenaje y los bajos inundables, tanto por acción pluvial como por ascenso freático (Figura 2).

Los dominios edáficos arealmente más importantes (INTA, 1989), se detallan en la Tabla 1.

El procesamiento de la información digital permitió, a partir de la información antecedente en formato cartográfico, la confección de una base de datos de 29.044 registros.

a) Erosión hídrica superficial de la cuenca

Los resultados obtenidos por aplicación de la E.U.P.S. permitieron identificar zonas de ero-

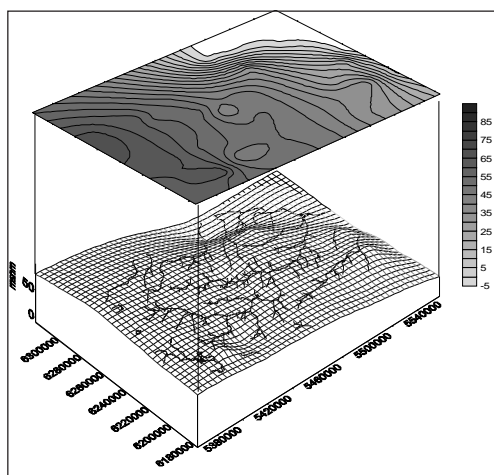


Figura 2. Mapa Topográfico y Modelo Digital del Terreno de la cuenca del Río Arrecifes.

Topographic Map and Terrain Digital Model of the Río Arrecifes basin.

Tabla 1. Dominios edáficos arealmente mas representativos en la cuenca del Río Arrecifes, su taxonomía y clase textural (Etchevehere, 1976; INTA Castelar, 1989).

Most representative edaphic domains in the Río Arrecifes basin, their taxonomy and textural class.

Dominio Edáfico	Nombre Taxonómico	Textura
19	Hapludol Éntico	Franco arenoso
	Hapludol Típico	Franco arenoso
10	Argiudol Típico	Arcilloso
	Natracualf Típico	Limoso fino
	Argialbol Típico	Franco fino
	Natracuol Típico	Arcilloso
	Argiudol Vértico	Arcilloso
8	Natracuol Típico	Arcilloso
	Natracualf Típico	Arcilloso
	Argiudol Ácuico	Arcilloso
	Argiudol Vértico	Arcilloso
	Natralbol Típico	Arcilloso
	Haplacuol Hístico	Limoso arcilloso
29	Haplacuent Aérico	Limoso arcilloso
	Hapludol Ácuico	Limoso arcilloso

sión hídrica superficial (Figura 3), jerarquizando la potencial degradación del suelo y la consecuente pérdida de cationes de cambio (Ca^{+2} , K^+ y Mg^{+2}) en la cuenca (Figura 4).

La tolerancia de pérdida de suelo es la

tasa máxima de erosión que permite que se sostenga un alto nivel de productividad (Kirby, 1994). La pérdida de suelo se considera tolerable cuando alcanza valores entre 6 y 8 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ para suelos arenosos y arcillosos, alcanzando valores de hasta 12,5 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ para suelos de textura media, profundos, de permeabilidad moderada y fértil. Estos últimos son generalmente de uso agrícola, (Mintegui Aguirre, 1986). Utilizando este criterio se determinó que la cuenca en estudio está todavía dentro de la tolerabilidad de

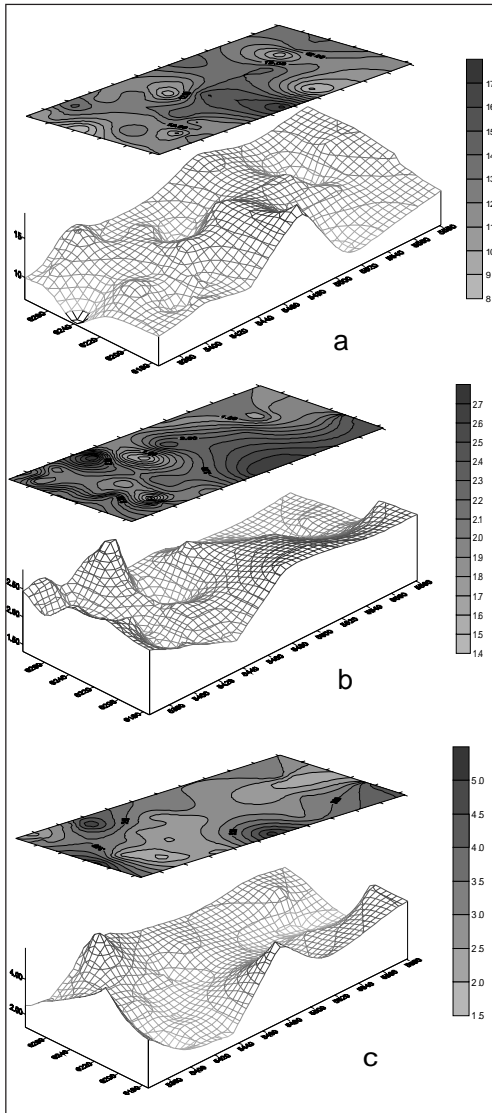


Figura 3. Distribución espacial ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) de a) Ca^{+2} , b) K^+ y c) Mg^{+2} en situación de referencia inicial.

Spatial distribution ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) of a) Ca^{+2} , b) K^+ and c) Mg^{+2} in the initial reference situation.

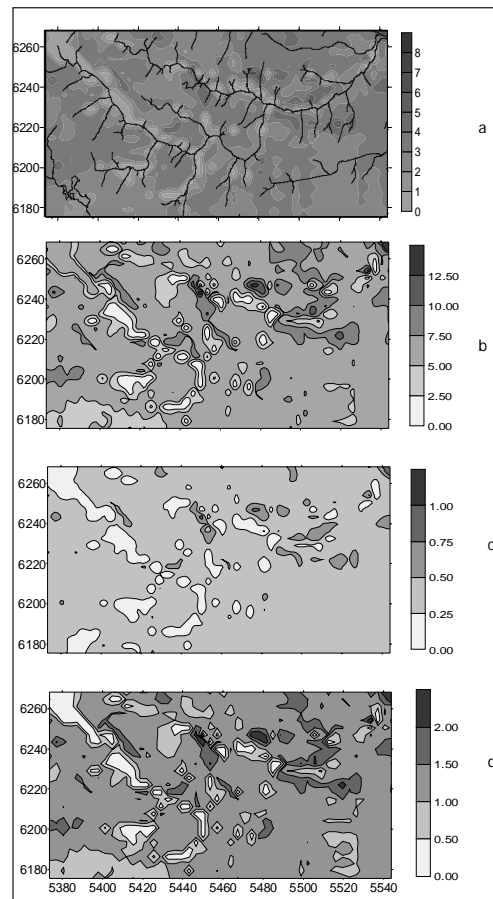


Figura 4. a) Pérdida de suelo ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) y distribución de pérdida ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) de b) Ca^{+2} , c) Mg^{+2} y d) K^+ .

a) Soil loss ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$) and loss distribution ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$) of b) Ca^{+2} , c) Mg^{+2} and d) K^+ .

Tabla 2. Evaluación de diferentes rangos de pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del Río Arrecifes y su cuantificación areal.

Evaluation of different ranges of soil loss by hydric erosion in the Río Arrecifes basin and its areal quantification.

Rango	Pérdida de suelo (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Superficie (km ²)	Porcentaje de ocurrencia
1	0 – 2	2456,16	25,25 %
2	2 – 4	6740,66	69,27 %
3	4 – 6	502,22	5,15 %
4	6 – 8	27,55	0,28 %
5	8 – 10	4,71	0,05 %
Total	0 - 10	9731,30	100,00 %

Tabla 3. Coeficientes de la ecuación de pérdida de suelo por erosión hídrica de la cuenca del Río Arrecifes y su análisis estadístico. α Nivel de significancia; R, K, L, S, C y P: Factores que intervienen en la E.U.P.S.; ns: no significativo

Coefficients of the soil loss equation by hydric erosion in the Río Arrecifes basin and its statistical analysis.

α Significance level; R, K, L, S, C y P: U.S.L.E. Factors; ns: non significant

Variables dependientes	Coeficientes de las variables	Estadístico T	α
Intercepción	-11,4769	-0,003323	Ns
Factor R	0,0092	15,664347	1 %
Factor K	2,7542	40,157421	1 %
Factor L	6,8777	347,426178	1 %
Factor S	35,5506	121,905586	1 %
Factor C	7,2497	106,156204	1 %
Factor P	0,0105	0,000003	Ns

pérdida de suelo superficial según los datos determinados por la E.U.P.S. (A). Estos datos de A se categorizaron en rangos para una mayor definición en forma absoluta (Tabla 2).

La pérdida de suelo predominante en la cuenca, determinada por E.U.P.S., es de entre 2 a 4 Mg.ha⁻¹.año⁻¹.

Un análisis estadístico de regresión múltiple lineal, permitió analizar la relación de las variables independientes (factores de la E.U.P.S.) con el grado de erosión. El Coeficiente de Regresión Múltiple (r) fue de 0,937882 (a: 1%). La regresión creó nuevos archivos de imagen por atributos de valor.

En la Tabla 3 se indican los coeficientes de cada una de las variables en el modelo y

su nivel de significancia. A partir de la misma, se determina que los factores R, K, L, S, C son altamente significativos (a 1%) mientras que la intersección al origen y P son no significativos. El nivel de los coeficientes de las variables puede sugerir su relativa importancia en la determinación del proceso, destacándose en este sentido los factores S, C y L.

b) Distribución espacial de Ca⁺², Mg⁺² y K⁺ en la cuenca

La Figura 3 indica la distribución espacial de Ca⁺², Mg⁺² y K⁺ en la situación inicial de referencia de los horizontes superficiales de los suelos de la cuenca. La Tabla 4 represen-

Tabla 4. Distribución areal de los niveles de concentración de cationes de cambio en la cuenca. Situación inicial de referencia.

Areal distribution of the concentration levels of exchange cations in the basin. Initial reference situation.

	Nivel de concentración ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	Superficie ocupada (km^2)	Porcentaje de ocurrencia
Ca^{+2}	MEDIO (5 – 10)	1188,6	12,22
	ALTO (10 - 20)	8542,7	87,79
	MUY ALTO (> 20)	—	0,00
Mg^{+2}	MEDIO (1 - 3)	7430,4	76,35
	ALTO (3 – 8)	2300,9	23,65
	MUY ALTO (> 8)	—	0,00
K^+	MEDIO (0,3 – 0,6)	—	0,00
	ALTO (0,6 – 1,2)	—	0,00
	MUY ALTO (> 1,2)	9731,3	100,00

ta la distribución areal en relación con la superficie ocupada y el porcentaje de ocurrencia dentro de la cuenca.

De acuerdo a los criterios utilizados por Michelena (1989), el contenido de las diferentes bases en el complejo de intercambio pue-

de calificarse de la siguiente manera: K^+ como muy alto, mientras que Ca^{+2} y Mg^{+2} como medios y altos.

La evaluación de la erosión hídrica potencial permitió relacionar directamente la pérdida de suelo, calculada por la E.U.P.S. (Figura

Tabla 5. Cuantificación de la pérdida potencial de cationes de cambio por erosión hídrica superficial y su valoración areal.

Quantification of the potential loss of exchange cations by hydric superficial erosion and its areal assessment.

	Cantidad de nutriente perdido ($\text{kg. ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)	Superficie afectada (km^2)	Porcentaje de ocurrencia %
Ca^{+2}	< 2,50	3522,05	36,19
	2,50 – 5,00	201,38	2,07
	5,00 – 7,50	4501,02	46,25
	7,50 – 10,00	1319,75	13,56
	> 10,00	187,10	1,92
Mg^{+2}	< 0,25	3522,30	36,20
	0,25 – 0,50	5530,21	56,83
	0,50 – 0,75	635,20	6,53
	0,75 – 1,00	38,07	0,39
	> 1,00	5,52	0,06
K^+	< 0,50	3522,33	36,20
	0,50 – 1,00	246,21	2,53
	1,00 – 1,50	4699,38	48,29
	1,50 – 2,00	1108,09	11,39
	> 2,00	155,29	1,59

4 a), con la distribución espacial de los cationes de cambio (Figura 4 b, c, d).

El cálculo de la erosión hídrica superficial potencial indica que más del 98% de la superficie de la cuenca presenta una pérdida de Ca^{+2} menor a $10 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ y el 93 % señala menos de $0,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ de Mg^{+2} . En el caso del K^+ , el 98,4 % de la superficie de la cuenca pierde hasta de $2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ (Tabla 5).

Los resultados cartográficos permiten identificar sitios donde la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial es menor a $1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ y asociados a ellos otros sitios de deposición, donde se registra acumulación de nutrientes por lavado y transporte desde la cuenca alta. En las zonas donde las pérdidas de suelo fueron superiores a $5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, se movilizan cantidades mayores a $10 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ de Ca^{+2} , a $1 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ de Mg^{+2} y $2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ de K^{+2} , fenómeno representado cartográficamente en la Figura 4 b, c y d respectivamente.

Estos resultados permiten demostrar que los procesos erosivos en la cuenca del Río Arrecifes tienen consecuencias importantes en la pérdida y distribución espacial de los nutrientes básicos. Este fenómeno provocaría importantes disminuciones en las reservas de Ca^{+2} , Mg^{+2} y K^+ en las posiciones topográficas más elevadas de la cuenca y enriquecimientos en áreas de deposición. Conjuntamente con procesos antrópicos como la exportación de estos elementos por producción y otros naturales, como la percolación profunda, los procesos erosivos conducirían al empobrecimiento superficial de estos nutrientes, incidiendo negativamente en el potencial productivo de la región.

CONCLUSIONES

1. El cálculo de la pérdida de suelo permitió establecer que la cuenca del Río Arrecifes presenta una tasa de erosión predominante relativamente baja (2 a $4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$), a

pesar de lo cual pudieron identificarse sitios críticos muy vulnerables a un potencial proceso erosivo mayor.

2. Se definió el factor de gradiente topográfico como el de mayor incidencia en el proceso erosivo de la cuenca. Por lo tanto, se sugiere que el mismo sea directriz en el diseño de estrategias de control para propender al desarrollo sustentable de la región.

3. La geodatabase permitió establecer la distribución espacial de Ca^{+2} , Mg^{+2} y K^+ en la situación de referencia inicial y su potencial pérdida por erosión hídrica superficial.

4. La pérdida potencial máxima de estos elementos sería mayor a $10 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ de Ca^{+2} , a $1 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ de Mg^{+2} y $2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ de K^+ . El proceso erosivo evaluado y su consecuente incidencia en el empobrecimiento superficial de estos nutrientes, incidiría negativamente en el potencial productivo de la región.

BIBLIOGRAFÍA

- Baker, J. L. & J. M. Laflen.** 1983. Water quality consequences of conservation tillage. *Journal of Soil & Water Conservation*, Ankeny, 38(3) pp 186-93.
- Bruno, J. E. & F. J. Gaspari.** 2000. Propuesta metodológica para la evaluación de procesos erosivos. *Avances en Ingeniería Agrícola*. Ed. Fac. Agronomía. UBA. BsAs. pp 337-342.
- Eastman, J. R.** 1999. *Idrisi 32 Tutorial*. Ed. Clarks Labs. Clark University. 298 pp.
- Etchevehere, P. H.** 1981. Normas de reconocimiento de suelos. *SUELOS*. Publ. N° 152. 118 pp.
- F.A.A.** 1992. Servicio Meteorológico Nacional. Estadísticas climatológicas. pp 120-124.
- Gaspari, F. J. & J. E. Bruno.** 2001. Evaluación de la erosión hídrica superficial. I Reunión Binacional de Ecología. San Carlos de Bariloche. pp 116-124.
- Henaos, J. E.** 1988. *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas*. Ed. Universidad de Santo Tomás. Colombia. 395 pp.
- I.G.M.** 1957. *Cartas Topográficas Escala 1: 50.000*. Los Patricios 3360-34-1 (18); San Pedro 3360-34-2 (19); Puerto Baradero 3360-35-1 (20); Mariano H. Alfonzo 3360-32-3 (24); Pergamino 3360-32-4 (25); Juan Anchorena 3360-

- 33-3 (26); Viña 3360-33-4 (27); Santa Lucía 3360-34-3 (28); Ireneo Portela 3360-34-4 (29); Carabelas 3560-2-1 (36); Roberto Cano 3560-2-2 (37); Arroyo Dulce 3560-3-1 (38); Arrecifes 3560-3-2 (39); La Luisa 3560-4-1 (40); Santa Coloma 3560-4-2 (41); La Angelita 3560-2-3 (48); Rojas 3560-2-4 (49); Salto 3560-3-3 (50); Estación Salto 3560-3-4 (51); Cap.Sarmiento 3560-4-3 (52); Duggan 3560-4-4; Rafael Obligado 3560-8-1 (68); Inés Indart 3560-8-2 (69); Berdier 3560-9-1 (70); Gahan 3560-9-2 (71); Carmen de Areco 3560-10-1; Heavy 3560-10-2; Junín 3560-8-3 (88); O'Higgins 3560-8-4 (89); Chacabuco 3560-9-3 (90); Rawson 3560-9-4 (91); Castilla 3560-10-3 (92); Baigorrita 3560-14-1; Irala 3560-14-2; Paraje San Vicente 3560-15-1; Emilio Ayarza 3560-15-2.
- I.G.M.** 1978. Cartas Topográficas. Escala 1: 250.000. Pergamino 3360-32; Pérez Millán 3360-33; Rojas 3560-2 y Salto 3560-3.
- I.G.M.** 1994. Carta de Imagen. Escala 1:250.000. Gualaguaychú 3360-IV; San Nicolás de los Arroyos 3360-III; General San Martín 3560-II y Junín 3560-I.
- INTA-Castelar.** 1989. Descripción de Cartas de Suelo. Prov.Bs.As. Esc. 1:500.000.
- Kirkby, M. J & R. P. Morgan.** 1994. Erosión de Suelos. Ed.Limusa. México. 375 pp.
- Sakurai, K., S. Kozasa, T. Yuasa, B. Puriyakorn, P. Preechapanaya, V. Tanpibal, K. Muangnil & B. Prachaiyo.** 1996. Changes in soil properties after land degradation associated with various human activities in Thailand. *Soil Science. Plant Nutr.* 42 (1) pp 81-92.
- Lal L. & B. A. Stewart.** 1992. Soil restoration. Needs for land restoration. *Advance of Soil. Science*, 17, pp 1-10.
- Lopez, R.** 1988. La Degradación y Pérdida de los Suelos Agrícolas. Serie Suelos y Clima: SC – 65. CIDINT. Venezuela. 45 pp.
- López Cadenas De Llano, F.** 1998. Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas y Control de la Erosión. Ed. TRAGSA. 945 pp.
- Mengel, K. & E. A. Kirkby.** 2000. Principios de Nutrición Vegetal. Cap. 6 Aplicación de fertilizantes. Ed. Instituto Internacional de la Potasa. Basilea. Suiza. 4ta. Edición 1º Ed. español. 607 pp.
- Michelena, R, C. Iurtia, F. Vavruska, R. Mon & A. Pittaluga.** 1989. Degradación de suelos en el norte de la Región Pampeana. Publicación Técnica N°6. INTA CIRN. Castelar. 136 pp.
- Mintegui Aguirre, J. A.** 1986. La Erosión en la Sedimentación de la Albufera. Monografías I. Generalitat Valenciana. España. 108 pp
- Mintegui Aguirre, J. A. & F. López Unzu.** 1990. La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación. Ed. Servicio Central de Publicación del Gobierno Vasco. 306 pp.
- Pritchett, W. L.** 1991. Suelos Forestales. Propiedades, conservación y Mejoramiento. Ed. Limusa. México. 635 pp.
- Rojas, A. & A. Conde.** 1985. Estimación del factor R de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo para el centro-este de la Rep. Argentina. *Ciencia del Suelo*, Vol. 3 pp 1 - 2.
- Sylla, M., A. Stein, M. E. F. Van Mensvoort & N. Van Breemen.** 1996. Spatial variability of soil actual and potential acidity in Mangrove agroecosystem of West Africa. *Soil Science Society American Journal.* 60, pp 219-229.
- Vázquez, M., E. Baridón, J. Lanfranco & G. Malagrina.** 2000. Evaluación de la Potencialidad de la Problemática de la Acidez en la región norte de la Provincia de Buenos Aires. Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Libro de actas 59.
- Vich, A. I. J.** 1989. Erosión hídrica: Estimación y medición de pérdidas de suelo. Ed. A. Roig. CRICYTME. BsAs. pp 118-130.
- Wischmeier, W. H. & D. D. Smith.** 1978. Predicting rainfall erosion losses. *Agriculture Handbook N° 537.* Washington D.C. 58 pp.