



# VULNERABILIDAD AMBIENTAL EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS SERRANAS MEDIANTE SIG

## *ENVIRONMENTAL VULNERABILITY IN RANGELAND WATERSHEDS, USING A GIS*

FERNANDA J. GASPARI<sup>1</sup>; A.M. RODRIGUEZ VAGARÍA<sup>1</sup>, M.I. DELGADO<sup>1,2</sup>;  
G.E. SENISTERRA<sup>1</sup>; G.A. DENEGRI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales,  
Universidad Nacional de La Plata. Diagonal 113 N 469. E-mail: cuencas@agro.unlp.edu.ar  
<sup>2</sup> CONICET, CCT La Plata.

<sup>3</sup> Cátedra de Economía y Legislación Forestal, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales,  
Universidad Nacional de La Plata

### RESUMEN

La degradación de los suelos se acentúa en presencia de riesgos ambientales, producto de la conjunción de un fenómeno natural extremo y de acciones antrópicas, dentro de un espacio y tiempo determinado. El objetivo del estudio fue zonificar la vulnerabilidad ambiental en cuencas hidrográficas serranas mediante uso de SIG. El área de estudio fue la Cuenca Alta del Río Sauce Grande, en el sudoeste de Buenos Aires, Argentina. El modelo cartográfico se conformó por mapas cuyo procesamiento representó cada uno de los factores condicionantes y activadores, basándose en la asignación de códigos numéricos enteros a las categorías de cada una

de las capas temáticas, las cuales se conjugaron a fin de obtener un único valor. La metodología utilizada fue de carácter cualitativo y aditivo. A partir de la combinación de factores condicionantes se zonificó la susceptibilidad ambiental mientras que por medio del Índice de Fournier Modificado (IFM) se determinó el factor activador, calculando su agresividad y variación espacial. Los resultados alcanzados permitieron obtener una base de datos cartográfica para la zonificación de la vulnerabilidad ambiental.

**Palabras clave:** modelo cartográfico, degradación, análisis cualitativo, índice de Fournier modificado

## SUMMARY

*Soil degradation is increased by the presence of environmental risks, as a conjunction of an extreme natural phenomenon and the anthropogenic actions, within a certain time and space. The aim of this work was to delimit the environmental vulnerability in rangeland watersheds, using a GIS. The area of study was the upper watershed of the Sauce Grande river, in the southwest of Buenos Aires, Argentina. The cartographic model consisted of maps that were processed in order to represent the conditioner and activator factors, by the assignment of integer numeric codes to the different categories of each thematic layer, which were joined in order to obtain a unique value. The methodology used was qualitative and additive. The environmental susceptibility was defined using a combination of conditioner factors. The Modified Fournier Index (MFI) was used to determine the activator factor, establishing its aggressiveness and spatial variation. The results allowed us to obtain a cartographic database for the delimitation of the environmental vulnerability.*

**Key words:** *cartographic model, degradation, qualitative analyzes, modified Fournier Index*

## INTRODUCCIÓN

Entre los problemas ambientales que causan mayor preocupación a nivel mundial se encuentran los referidos a la degradación de las tierras. Los procesos de degradación del suelo suelen traducirse en una reducción de la productividad de los cultivos y los recursos hídricos. Los efectos negativos de un suelo degradado sobre la economía de una región son más severos en las zonas que más dependen de la agricultura para obtener ingresos (Mintegui Aguirre & López Unzú, 1990; Gaspari *et al.*, 2006). La conservación y rehabilitación de tierras constituye una parte esencial del desarrollo agrícola sustentable.

La degradación de los suelos se acentúa en presencia de riesgos ambientales, que se consideran producto de la conjunción de un fenómeno natural extremo y acciones antrópicas, relacionados dentro de un espacio y tiempo determinado.

Las intensas precipitaciones, alta densidad de drenaje y altas

pendientes, en áreas con condiciones de descomposición de rocas originales del sustrato geológico pueden originar desprendimientos por procesos de erosión superficial o por movimientos de masa. Dichos procesos pueden acelerarse por deforestación de las vertientes, falta de implementación de medidas de conservación de suelos y por eventos extremos, tales como lluvias intensas.

Asimismo, la combinación de factores antrópicos y ambientales, en conjunción con las características morfométricas de la cuenca hidrográfica (el relieve, la red de drenaje y la forma), pueden generar vulnerabilidad en el ambiente.

En los últimos años se desarrollaron acciones tendientes a aumentar la productividad, que han generado situaciones problemáticas de transformación de sus espacios (usos del suelo), así como de un aprovechamiento irracional de los recursos naturales. Estas acciones han evolucionado hacia nuevos usos del suelo y aprovechamiento del agua, dando origen a la vulnerabilidad ambiental actual.

La vulnerabilidad, en términos generales, es la relación entre una condición (susceptible de recibir daño) en referencia a otra (condición no dañada), donde se manifiesta el orden, el peligro

y el riesgo (Macias, 1999). La vulnerabilidad ambiental es un concepto que se relaciona con la susceptibilidad o predisposición intrínseca del medio y los recursos naturales a sufrir un daño o una pérdida, siendo estos elementos físicos o biológicos.

El concepto de vulnerabilidad, aplicado a cuencas hidrográficas, se manifiesta cuando se presentan fenómenos de carácter hidrometeorológico extremo (granizadas, lluvias torrenciales, huracanes, inundaciones, sequías, tornados) y escenarios morfométricos críticos (alta pendiente, geomorfología abrupta, suelos poco profundos, uso del suelo sin medidas conservacionistas).

El análisis conjunto de factores que determinan la ocurrencia de movimientos en masa, se ha facilitado con la introducción de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), herramienta ideal para el análisis de parámetros con un alto grado de variabilidad espacial. Existen estudios que han abordado la zonificación de la amenaza hidrometeorológica utilizando las bondades que ofrecen los SIG y los sensores remotos (Van Westen & Soeters, 1999).

La evaluación del riesgo se basa en el análisis de datos para correlacionar la causa y el efec-

to de eventos antrópicos y la influencia climática (Masters & Ela, 2006). Teniendo en cuenta el análisis de riesgos, la simulación es cada vez más utilizada como un medio para reducir la incertidumbre de las evaluaciones basadas en la información interpolada (Goovaerts, 1997). Esta evaluación permite un diagnóstico, análisis e interpretación del sistema territorial a la luz de la visión histórica de las tendencias evolutivas con y sin intervención antrópica.

La planificación territorial permite definir una prospectiva por medio de escenarios que se adoptan como referencia, para seleccionar la imagen objetivo a con-

seguir a largo plazo, tendiendo a regular la vulnerabilidad ambiental (Gómez Orea, 2008)

El objetivo del estudio fue zonificar la vulnerabilidad ambiental en cuencas hidrográficas serranas mediante uso de SIG.

## MATERIAL Y MÉTODO

La metodología utilizada para zonificar la vulnerabilidad ambiental en cuencas hidrográficas serranas fue llevada a cabo en un área experimental representativa. El marco espacial del estudio fue la Cuenca Alta del río Sauce Grande, situada en el sudoeste bonaerense, Argentina, con una superficie de 1500 km<sup>2</sup> (Figura 1).

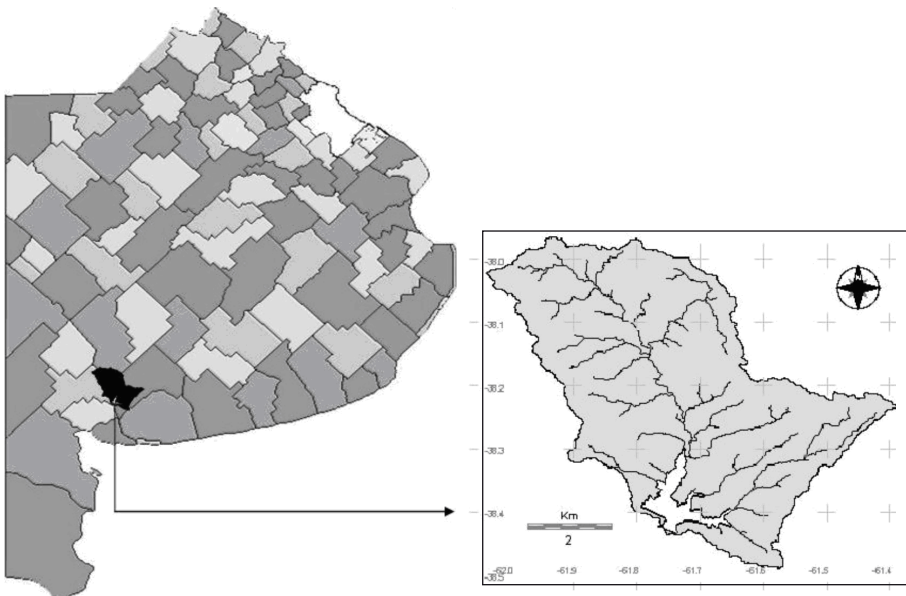


Figura 1. Ubicación de la Cuenca Alta del Río Sauce Grande  
*Figure 1. Placement of the Upper Watershed of the Sauce Grande River*

La Cuenca Alta del río Sauce Grande se encuentra ubicada en el sistema serrano de Ventania (Provincia de Buenos Aires). Presenta dos unidades geomorfológicas importantes, la primera corresponde al cordón de Ventania y Pillahuinco, con pendientes pronunciadas en la zona de divisoria de aguas. En esa zona se observan las nacientes de la mayoría de los afluentes, las cuales discurren en pequeños y profundos cañadones sobre las pendientes más pronunciadas. La segunda unidad geomorfológica corresponde a la llanura aluvial del río, compuesta principalmente por material sedimentario moderno con un espesor variable y pendientes más moderadas, es de destacar la presencia de barrancas cuyas paredes verticales y alturas variables (entre 3 y 8 m) encajonan y controlan el cauce del río (Luque *et al.*, 1979).

Las unidades cartográficas de suelos de la cuenca están clasificadas en los dominios edáficos 1, 2 y 3, según la Carta de Suelo de Sierra de la Ventana, Provincia de Buenos Aires, descripta por el Atlas de Suelos del INTA (INTA, 1989). Las mismas están directamente relacionadas con el uso del suelo superficial. Están desarrolladas sobre material loésico que ha cubierto totalmente el faldeo

de las sierras. Algunos suelos han evolucionado sobre sedimentos arenosos, apoyados sobre tosca. Las pendientes y senos entre lomas están ocupados por argiudoles típicos inclinados, en las partes distales del pedemonte, con predominio de pastizales naturales. Donde el relieve se atenúa, se hallan argiudoles típicos de familia fina, someros, con uso del suelo ganadero-agrícola. En la parte superior de las lomas, donde la tosca está más cercana a la superficie, se desarrollan hapludoles petrocálcicos, con ganadería extensiva. En las vías de escurrimiento que nacen en los faldeos y luego ingresan en otras unidades geomorfológicas se hallan haplustoles típico, éntico y lítico, donde la actividad principal se expresa con una combinación de agricultura y ganadería (Gaspari, 2002).

La metodología para la definición y zonificación de la vulnerabilidad ambiental se estableció a partir de la generación y procesamiento geoespacial de factores condicionantes y activadores. Los primeros están predeterminados en la cuenca, como ser la posición y pendiente del terreno, la textura del suelo, la cobertura vegetal y uso del suelo y la densidad de drenaje. En este estudio, el factor activador denominado erosividad de

la precipitación, es una variable que actúa durante los eventos pluviales. Su magnitud se determina a través de la intensidad, duración y frecuencia de la tormenta.

Para la zonificación de los factores condicionantes se requirió de estudios de suelos (INTA-Aero Terra, 1995; Irurtia *et al.*, 2007), de cartografía topográfica a escala 1:50.000 (IGM, 1970), la digitalización de ambos y de la interpretación de imágenes satelitales (Landsat ETM) para definir áreas de cobertura vegetal y uso del suelo.

Para la densidad de drenaje, se generó un índice de compacidad de drenaje a partir del procesamiento con SIG, de cartografía de base vectorial de la red de drenaje y el área de una circunferencia

de radio de 5000 m. Este procesamiento asigna a la celda central de la circunferencia, un valor resultante del cociente entre la longitud total de los drenajes que se encuentran en la misma y su área.

El factor activador, erosividad de la precipitación, se calculó por medio del Índice de Fournier Modificado (IFM), determinando su magnitud y variación temporal (Jordan & Bellifante, 2000; Gaspari *et al.*, 2009).

El modelo cartográfico se conformó por mapas cuyo procesamiento mediante SIG representó cada uno de los factores condicionantes y activadores. Este modelo se representa en la Figura 2.

La determinación espacial y temporal del IFM comprendió diferentes períodos de análisis,

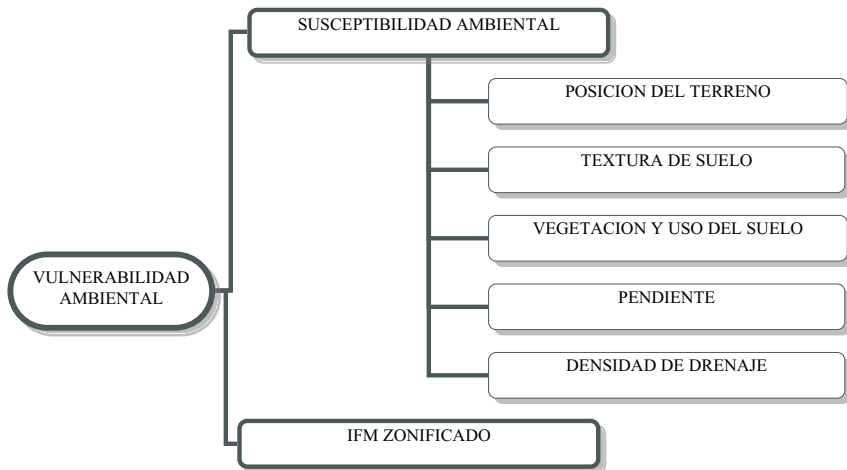


Figura 2. Secuencia cartográfica para la vulnerabilidad ambiental  
 Figure 2. Cartographic sequence for the environmental vulnerability

Tabla 1. Estaciones meteorológicas, ubicación geográfica y periodo analizado  
*Table 1. Meteorological stations, locations and analyzed period*

Estación	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud (msnm)	Años analizados
Tres Arroyos	38°20'	58°42'	115	1961-1980
Bahía Blanca	38°44'	62°10'	83	1959-2006
Pigüe	37°36'	62°23'	304	1959-2006
Coronel Pringles	37°59'	61°23'	253	1911-2006
Coronel Suárez	37°26'	61°53'	233	1959-2006
Tornquist	38°05'	62°13'	293	1908-1985
Quiñihual	37°47'	61°35'	282	1917-1987
Sierra de la Ventana	38°08'	61°47'	250	1911-1985

según la información de base disponible (Tabla 1).

A partir de los valores de IFM obtenidos, se realizó su distribución espacial dentro de la cuenca, por medio de una interpolación con el método de Krigging, obteniendo la distribución espacial de la agresividad climática.

La herramienta utilizada para el desarrollo del estudio fue el SIG Idrisi Andes®, desarrollado por Clark University, USA (Eastman, 2006).

El procesamiento geoespacial del modelo cartográfico se basó en la asignación de códigos numéricos enteros a las categorías de cada una de las capas temáticas, las cuales se conjugaron a fin de obtener un único valor luego de la combinación de las mismas.

Esta metodología es de carácter cualitativo y aditivo, expresando adjetivaciones de los diferentes

factores condicionantes y activadores (López Cadenas del Llano, 1998).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo cartográfico presentado en la Figura 2 expresa la secuencia de mapas elaborados para obtener un área de vulnerabilidad ambiental homogénea en la cuenca.

Particularmente, la Cuenca Alta del Sauce Grande, se expresó por medio de factores condicionantes descriptivos a los cuales se asignaron códigos de valor para las diferentes categorías cualitativas. En la Tabla 2 se expresan los valores de referencia.

La combinación de factores condicionantes estableció la zonificación de la susceptibilidad ambiental.

Para el factor activador IFM, se consideró una escala de valores



Tabla 2. Valores de referencia para los factores en la Cuenca Alta del Río Sauce Grande

Table 2. Reference values for the different factors in the Upper Watershed of the Sauce Grande River

Factores Condicionantes	Posición del terreno	Factor	Roca	Loma	Pen- diente	Valle		
		Código	1	2	3	4		
	Textura del suelo	Factor	Franco	Fr. Arc.	Fr. Lim.	No determ.		
		Código	10	20	30	40		
	Vegetación y uso del suelo	Factor	AG	GA	G	Pastizal	A c/med.	Urbano
		Código	100	200	300	400	500	600
Pendiente (%)	Factor	<3	3-12	12-24	>24			
	Código	1000	2000	3000	4000			
Índice de compacidad de drenaje (m/km <sup>2</sup> )	Factor	<20	20-40	40-60	60-80	>80		
	Código	10000	20000	30000	40000	50000		

Ref.: Fr.: Franco; Arc.: Arcilloso; Lim.: Limoso; determ.: determinado; AG: agrícola-ganadero; GA: ganadero-agrícola; G: ganadero; A c/med.: agrícola con medidas conservacionistas.

comprendido en tres categorías, que en este caso se establecieron en: <67, 67-70, >70.

La conjunción de la susceptibilidad ambiental con el factor activador IFM, definió el área de vulnerabilidad ambiental. Los resultados de la aplicación de dicho modelo se presentan en la Figura 3.

En la cuenca caso de estudio, se identificaron áreas donde la susceptibilidad ambiental reflejó valores moderados, que influenciados por la agresividad climática, generaron zonas más vulnerables a riesgos de degradación ambiental. Cabe destacar que el IFM permitió definir el grado de impacto de la precipitación sobre el estado de degradación de los suelos de forma cualitativa.

De acuerdo con lo mencionado por López Cadenas del Llano

(1998), un aspecto positivo de una clasificación cualitativa agro-lógica, es permitir una aplicación universal con pequeñas modificaciones y adaptaciones a nivel local. Además, expresa la ventaja de establecer una topología entre los distintos elementos de las capas temáticas, permitiendo el procesamiento con SIG.

La zonificación de la vulnerabilidad ambiental en cuencas hidrográficas serranas mediante uso de SIG generó una metodología de sencilla y simple aplicación. El uso de los factores condicionantes y activadores para la zonificación de la vulnerabilidad ambiental, contribuye a la definición de estrategias de manejo y gestión de cuencas hidrográficas, reflejando la ocurrencia de fenómenos morfo-ambientales.



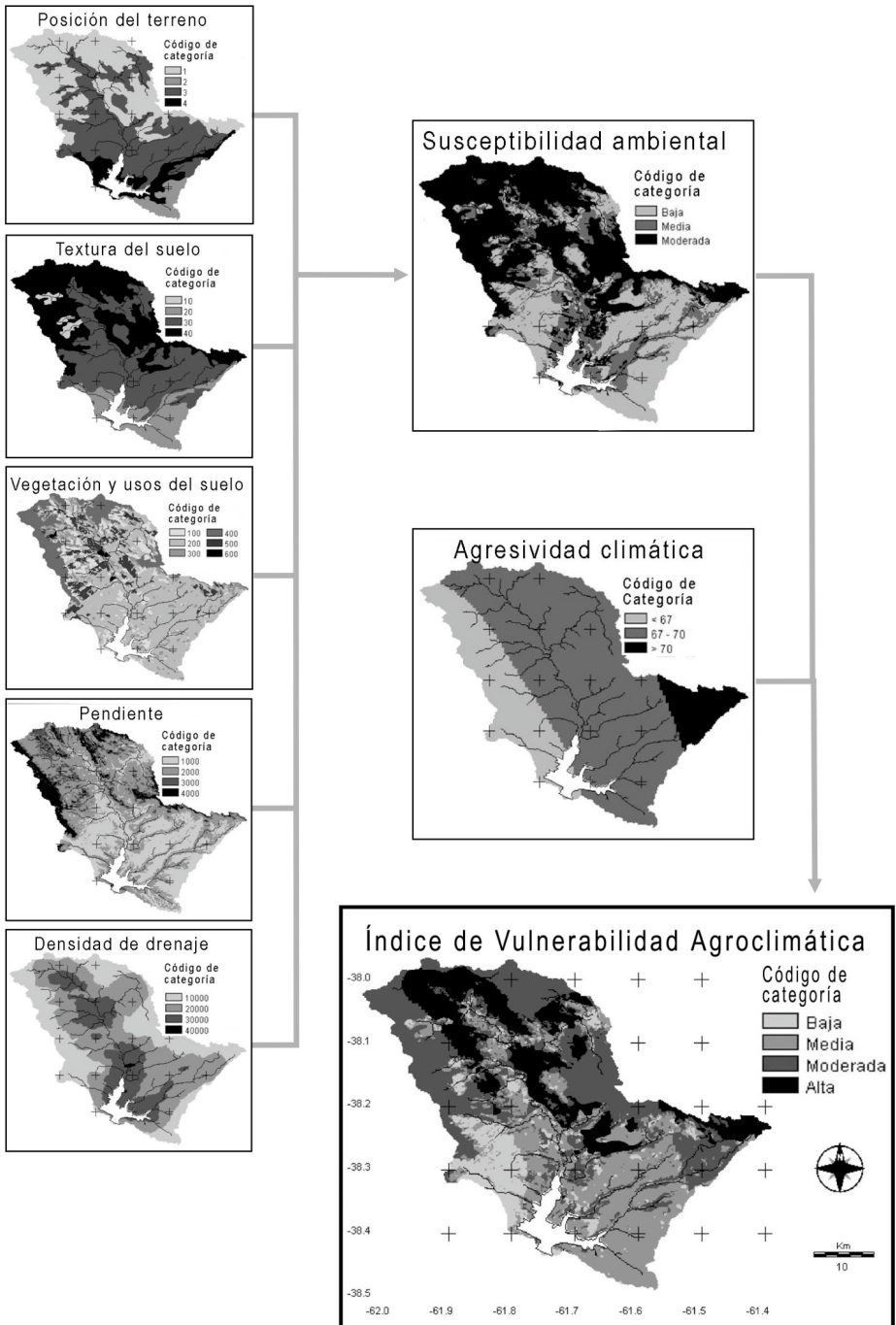


Figura 3. Modelo cartográfico para la vulnerabilidad ambiental  
 Figure 3. Cartographic model for the environmental vulnerability

## CONCLUSIONES

En el presente estudio se realizaron análisis de antecedentes de distintos parámetros para describir morfológicamente la Cuenca Alta del río Sauce Grande y definir la vulnerabilidad ambiental en forma geoespacial.

La metodología de trabajo permitió alcanzar el objetivo propuesto de zonificar la vulnerabilidad ambiental en cuencas hidrográficas serranas mediante uso de SIG. Además, conformó una práctica para obtener una base de datos cartográfica, que ofrece elementos fundamentales para la definición de pautas de manejo del territorio, sobre la base de la vulnerabilidad ambiental.

La actualización permanente de la base de datos del SIG, con trabajo de campo y análisis espacial cartográfico permite un entendimiento de la dinámica espacio-temporal donde los datos son escasos o inexistentes.

## BIBLIOGRAFÍA

- EASTMAN, J.R., 2006. *Idrisi Andes Guide to GIS and Image Processing*. Clark Labs, Clark University, USA.
- JORDÁN, A. & N. BELLINFANTE, 2000. Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de registros pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz). *Edafología* 7(3): 83-92. <http://edafologia.ugr.es/revista/tomo7tr/a83v7tt.htm>
- GASPARI, F., 2002. *Ordenamiento territorial en Cuencas Serranas. Aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG)*. Ediciones Cooperativas FCE-UBA. Argentina. 116 pp. Tesis de Maestría.
- GASPARI, F., J. BRUNO, R. RICKFELDER, B. HAURI, I. CORNELLY, C. ORONÁ & M. LEONART, 2006. *Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas Serranas del Partido de Tornquist. Estudio de Prefactibilidad*. 135 pp.
- GASPARI, F.J., G.E. SENISTERRA, M.I. DELGADO, A. RODRÍGUEZ VAGARÍA & S. BESTEIRO, 2009. *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. Primera Edición. La Plata. 321 pp.
- GÓMEZ OREA, D., 2008. *Ordenación Territorial*. Ediciones Mundi Prensa. España. 766 pp.
- GOOVAERTS, P., 1997. Kriging versus Stochastic Simulation for Risk Analysis in Soil Contamination. In: A. Soares, J. Gómez-Hernandez, and R. Froidevaux (eds.), *geoENV-VI-Geostatistics for Environmental Applications*. Kluwer Academic Publishers.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR. (IGM), 1970. *Cartas Topográficas*. Esc 1:50.000.
- IRURTIA, C., G. CRUZATE & F. GASPARI. 2007. Guía de divulgación técnica. *Aplicación de la USLE en la provincia de Buenos Aires para establecer tasas de erosión hídrica*. INTA-UNLP. 25 pp.
- INTA – AeroTerra, 1995. *Atlas de suelo de la República Argentina*. Versión digital en CD-ROM.

- INTA Castelar, 1989. *Descripción de Cartas de Suelo de la Provincia de Buenos Aires*. Cap.4.1: p 43-55. Escala. 1:500.000.
- LÓPEZ CADENAS DEL LLANO, F., 1998. *Restauración hidrológico-forestal y control de la erosión. Ingeniería Ambiental*. Tragsa-Tragsatec, Ministerio del Medio Ambiente, Ediciones Mundiprensa, Madrid, España. 945 pp.
- LUQUE, J.A., J. D.PAOLONI & G.A. BONORINO, 1979. *Estudio Hidrológico e hidrogeológico de la cuenca del río Sauce Grande. Serie Hidrológica N° 3*. Depto. de Ciencias Agrarias y Depto. de Ciencias Naturales. Universidad Nacional del Sur. 64 pp.
- MASTERS, G. & W. ELA, 2008. *Introducción a la Ingeniería Ambiental*. Pearson Educación, SA. Madrid. 752 pp.
- MACIAS, J. M., 1999. *Desastres y protección civil. Problemas sociales, políticos y organizacionales*. Centro de Investigaciones y Estudios Sociales en Antropología Social. Dirección General de Protección Civil del Gobierno del Distrito Federal. México. 101 pp
- MINTEGUI AGUIRRE, J.A. & F. LÓPEZ UNZÚ, 1990. *La ordenación agrohidrológica en la planificación*. I parte. Servicio Central de publicaciones del Gobierno Vasco. 172 pp.
- VAN WESTEN, C. & R. SOETERS, 1999. *Geographic Information Systems in Slope Instability Zonation*. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences ITC, 156 pp.

Recibido: 4/2011  
 Aceptado: 9/2011