

RIESGOS AMBIENTALES Y SUELOS. ENFOQUES PARA LA MODELIZACION DE LA EROSION POR CARCAVAS Y MOVIMIENTOS EN MASA

J.A. ZINCK

International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), P.O. Box 6 - 7500 AA Enschede - The Netherlands

INTRODUCCION

Muchos riesgos ambientales, espontáneos o inducidos por acciones antrópicas, están relacionados con la cobertura edáfica de la tierra, a la vez porque están condicionados por las propiedades de los suelos y porque afectan la integridad del recurso suelo. La erosión de suelos por viento, agua y remoción en masa suministra ejemplos de estas relaciones mutuas.

Riesgos ambientales relacionados con el comportamiento y las propiedades químicas de los suelos han sido ampliamente documentados; tal es el caso de la salinización, alcalinización, acidificación, pérdida de fertilidad y polución de los suelos. El conocimiento detallado que se tiene de los procesos e interacciones químicas y la posibilidad de simularlos en laboratorio o parcelas experimentales permiten una modelización fina. Algunos procesos físico-mecánicos, como la compactación de suelos, también han sido objeto de modelos avanzados.

En cambio, la modelización de los procesos de erosión mecánica, ya sea por viento, agua o movimientos en masa, es todavía esencialmente empírica, tal como lo muestra la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE). Las relaciones entre la naturaleza del material edáfico

y los procesos morfogénéticos involucrados en la erosión hídrica y eólica son complejas y difíciles de encapsular en ecuaciones matemáticas o modelos determinísticos.

Entre los procesos de erosión mecánica, los que generan las amenazas más severas para el uso y la preservación de los suelos son los movimientos en masa y las cárcavas. Son los que causan los daños más cuantiosos en términos de pérdidas en recursos naturales, bienes materiales y vidas humanas. En ambos casos, el material suelo a la vez condiciona la iniciación y el desarrollo de los fenómenos, y se encuentra afectado por ellos. Existen también relaciones dinámicas entre cárcavas y movimientos en masa. Frecuentemente, pequeños deslizamientos o desplomes de tierra se transforman en cabeceras de cárcavas. Las cárcavas, a su vez, pueden evolucionar lateralmente por movimientos en masa. La complejidad de los procesos y de las interacciones, el carácter generalmente catastrófico de los eventos y las dificultades de predecir su ocurrencia espacial y temporal son tantos factores que hacen la modelización engorrosa.

El desarrollo de las técnicas modernas de observación de la tierra, en particular la facilidad de obtener series temporales de datos de teledetección, no solamente mejora las posibi-

lidades cartográficas a escala global (por imágenes satelitarias), pero también favorece el monitoreo a nivel local (por videografía). Igualmente, el advenimiento de los sistemas de información geográfica (SIG) permite la combinación de estratos de datos múltiples y la simulación espacial, para explorar relaciones de causa a efecto.

Después de presentar una revisión sucinta de las tendencias actuales en modelizar erosión de suelos y riesgos ambientales, como marco de referencia general, se abordan consideraciones sobre diversos enfoques para modelizar la erosión de suelos por cárcavas y movimientos en masa, implementando facilidades de SIG.

TENDENCIAS EN LA MODELIZACION AMBIENTAL Y DE EROSION

1 Modelos ambientales

Los modelos ambientales varían desde modelos de carga crítica de polución para escalas locales y regionales, hasta modelos de cambio climático global (Valenzuela and Zinck, 1994). Cargas críticas se refieren a la cantidad máxima de deposición acidificante, principalmente de azufre y nitrógeno, que un ecosistema puede recibir sin sufrir daños a largo plazo en su estructura y sus funciones. En países industrializados, la acidificación de suelos y, consecuentemente, de lagos y ríos es causada por la entrada de productos ácidos a las cuencas, principalmente por la polución aérea de larga distancia. La única fuente de alcalinización a largo plazo para neutralizar esta acidificación la constituye la meteorización de minerales en los suelos.

Las cargas críticas pueden calcularse usando modelos empíricos y modelos orientados a procesos, incluyendo los modelos de simulación dinámica y los modelos de estado fijo. Por ejemplo, el método Steady-State Water Chemistry (SSWC) determina excedentes de acidez total en relación a cargas críticas permisibles. En contraste, el método First-order Acidity Balance (FAB) considera los procesos

que controlan el balance de acidez de una cuenca (Henriksen et al., 1993). Similarmente, el modelo de estado fijo PROFILE y su versión dinámica SAFE calculan cargas críticas a partir de los umbrales químicos permisibles para indicadores biológicos seleccionados. Como datos de entrada, ambos modelos usan propiedades relevantes de los suelos tales como espesor de los horizontes, profundidad a la roca madre, distribución del tamaño de partículas de cada horizonte, minerales meteorizables en el horizonte B, regímenes de temperatura y humedad de los suelos, junto con otros parámetros ambientales (Sverdrup et al., 1992).

Similarmente, los modelos de cambios climáticos globales necesitan información de suelos, ya que la producción, el consumo y la emisión de gases de invernadero son afectados por los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en el manto edáfico. La información relativa a la geografía de los suelos, manejada mediante un SIG, es indispensable para extrapolar datos puntuales sobre emisiones y flujos de gases a ecosistemas de escala global. El doblamiento estimado de CO₂ atmosférico, desde la época pre-industrial hasta el principio del siglo 21, ha sido usado como criterio principal para construir modelos de circulación climática general (GCM). Estos modelos predicen una elevación global de la temperatura de 2 a 5° C a mediados del próximo siglo. El calentamiento atmosférico global deriva del incremento en concentraciones de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido de nitrógeno (N₂O) en el aire. Los suelos, como componente del ecosistema, contribuyen al balance de los gases de invernadero ambos como una fuente y como un receptáculo, en particular en zonas críticas de emisión de gases tales como las áreas sujetas a deforestación o desertificación, campos de arroz, áreas de hielo permanente y depósitos de basura (Bouwman, 1990).

2 Modelos de pérdida y conservación de suelos

Los modelos para estimar pérdidas de sue-

los pueden clasificarse en dos categorías: (1) empíricos y (2) analíticos (Loran et al., 1988). Los modelos empíricos operan por tratamiento estadístico de amplios conjuntos de datos de suelos y datos de precipitación correspondientes a largos períodos de registro. Los mismos generan resultados que son específicos del lugar y no explican los procesos involucrados. Ecuaciones de pérdidas de suelos derivadas estadísticamente necesitan, por lo tanto, substanciales ajustes cuando se aplican en áreas fuera del lugar donde se diseñaron (por ejemplo, el modelo USLE). En contraste, los modelos analíticos intentan predecir las pérdidas de suelos en base a los procesos actuantes. Debido a su complejidad, requieren validación y cali-

bración precisa (por ejemplo, el modelo ANSWERS). Se necesitan grandes series de datos para satisfacer la simulación de procesos. Algunos modelos de erosión incluyen mecanismos para seleccionar prácticas de conservación de suelos y evaluar su efectividad económica (por ejemplo, los modelos COST y SOILEC). La tabla 1 incluye algunos de los modelos de erosión de suelos más usados (de Roo, 1993).

ENFOQUE DETERMINISTICO

Existen parámetros cuantitativos y ecuaciones empíricas para caracterizar la relativa estabilidad de un material suelo en el paisa-

Tabla 1. Colección de modelos de erosión (de Roo, 1993)

ACRONYM	NAME	YEAR	PROCESSES
USLE	UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION	1958	E
MUSLE	MODIFIED USLE	1975	E
RUSLE	REVISED USLE	1987	E
MUSLE87	MODIFIED USLE 1987	1987	E
dUSLE	DIFFERENTIATED USLE	1990	E
SLEMSA	SOIL LOSS ESTIMATOR FOR SOUTH AFRICA	1981	E
CREAMS	CHEMICAL RUNOFF AND EROSION FROM AGRICULTURAL MANAGEMENT SYSTEMS	1980	ERNP
GLEAMS	GROUNDWATER LOADING EFFECTS OF AGRICULTURAL MANAGEMENT SYSTEMS	1987	ERNP
ARM	AGRICULTURAL RUNOFF MODEL	1978	ERNP
MMF	MORGAN/MORGAN/FINNEY	1984	E
EPIC	EROSION PRODUCTIVITY IMPACT CALCULATOR	1984	ERNP
KYERMO	KENTUCKY EROSION MODEL	1988	ER
WEPP	WATER EROSION PREDICTION MODEL	1989	ER
EROSION2D	2-D RAINFALL EROSION MODEL	1989	ER
MEDALUS	MEDITERRANEAN DESERTIFICATION AND LAND USE	1992	ERC
CSU	COLORADO STATE UNIVERSITY MODEL	1977	ER
ANSWERS	AREAL NONPOINT SOURCE WATERSHED ENVIRONMENT RESPONSE SIMULATION	1977	ER
KINEROS	KINEMATIC EROSION SIMULATION	1981	ER
EUROSEM	EUROPEAN SOIL EROSION MODEL	1991	ER

E = erosion; R = runoff; N = nutrients; P = pesticides; C = crop growth

je o, inversamente, su susceptibilidad a moverse en masa. La resistencia al corte, como capacidad del suelo para resistir a tensiones tangenciales, puede estimarse mediante la ecuación de Coulomb. El valor "n" de Pons y Zonneveld permite evaluar la resistencia a la subsidencia de materiales edáficos inmaduros, derivados de sedimentos lacustres o marinos. El COLE (coeficiente de extensibilidad lineal) es una aproximación sencilla del potencial de contracción-expansión. Los límites de Atterberg permiten caracterizar el comportamiento mecánico del material suelo bajo diferentes contenidos de humedad. Pero, no existen modelos operacionales que relacionen estos parámetros con los procesos de movimientos en masa. Para subsanar esta carencia, un enfoque (pseudo-) determinístico consiste en comparar umbrales críticos de variables y establecer relaciones conceptuales entre variables y procesos, para identificar riesgos de movimientos en masa.

Los movimientos en masa, como las cárcavas, son fenómenos caóticos. Ocurren cuando los términos de una situación de equilibrio meta-estable cambian drásticamente y repentinamente. Los factores activadores no son de naturaleza edáfica (lluvias anormales, actividad sísmica). Muchos de los factores condicionantes tampoco son edáficos, tales como la cobertura vegetal, la topografía, la morfodinámica, la estructura geológica y el comportamiento geohidrológico. Pero, el material edáfico puede tener una propensión intrínseca para moverse en masa, básicamente a través de sus propiedades mecánicas e hídricas y a través de los contrastes reológicos entre los horizontes genéticos, susceptibles de funcionar como planos de cizallamiento. Cuando los contenidos de humedad presentes en el manto edáfico, en un determinado período del año, exceden la capacidad de retención de agua por el suelo o superan los límites de Atterberg, un riesgo de movimiento en masa se origina. Una simple comparación gráfica entre perfiles hídricos y perfiles de consistencia de los suelos, establecidos en series temporales, permite iden-

tificar áreas donde, en períodos críticos del año, existe un potencial de movimiento.

Las figuras 1 y 2 se refieren a un caso ilustrando las consideraciones anteriores. El ejemplo corresponde a un sitio de selva nublada en el Parque Nacional Henri Pittier, Rancho Grande, Cordillera de la Costa, en el norte de Venezuela (Zinck, 1986, 1996). La abundancia de lluvias ocasiona, durante la mayor parte del año, contenidos efectivos de humedad edáfica superiores a los valores de límites de consistencia y a la capacidad de retención de agua por los suelos. Los riesgos de movimientos en masa son por lo tanto latentes, pero controlados por la eficiente protección que asegura la cobertura densa de la selva nublada, a pesar de lo escarpado de las vertientes. Datación radiocarbónica de depósitos de flujo torrencial en el piedemonte meridional de la cordillera indica que eventos catastróficos tuvieron lugar alrededor de 6.000 y 1.500 años BP. Un evento similar a los del pasado Holocénico ocurrió el día 6 de septiembre de 1987, como consecuencia de una lluvia diluvial de 174 mm en 4 horas y 30 minutos. Una cantidad de agua superior a la capacidad de retención de los suelos y normal posibilidad de evacuación por percolación profunda fué introducida en la cobertura edáfica en un lapso de tiempo sumamente corto. Se originaron deslizamientos en plancha de tierra, rocas y troncos de árboles en las vertientes montañosas. Aguas abajo, un alud torrencial sepultó bajo una espesa capa de escombros y lodo la planicie de inundación densamente poblada del río El Limón, en las cercanías de la ciudad de Maracay. Un saldo de varios centenares de muertos y daños materiales estimados en más de 2.5 millones de dólares resultaron del evento catastrófico.

La combinación de datos puntuales referidos a umbrales críticos con la información espacial del mapa de suelos permite la extrapolación y zonificación de riesgos, usando las facilidades de un SIG. Las simples relaciones gráficas entre perfiles hídricos y mecánicos podrían ser la semilla para establecer modelos rexiológicos, con fines de investigar y simular

condiciones de suelo y humedad susceptibles de causar rupturas en el equilibrio del manto edáfico. Un enfoque determinístico, relacionando la organización del material edáfico a nivel de micro-fábrica, la consistencia del material a diferentes niveles de humedad y la respuesta geomorfológica, podría servir de marco conceptual básico para modelizar (Tabla 2).

ENFOQUE EXPLORATORIO

Modelos exploratorios intentan identificar relaciones no explícitas de causa a efecto entre

tipos de riesgos ambientales (por ejemplo, tipos de procesos de erosión) y tipos de suelos afectados para, a partir de estas relaciones, establecer predicciones sobre áreas de suelos potencialmente expuestas a la degradación.

Un modo exploratorio frecuentemente implementado, porque es una operación relativamente simple en un SIG, es la modelización cartográfica (Bocco et al., 1990). La superposición de estratos de información, usualmente representados por una serie de mapas temáticos o mono-atributos, permite realzar áreas de coincidencia entre factores controlando la erosión de suelos y rasgos resultando de la erosión.

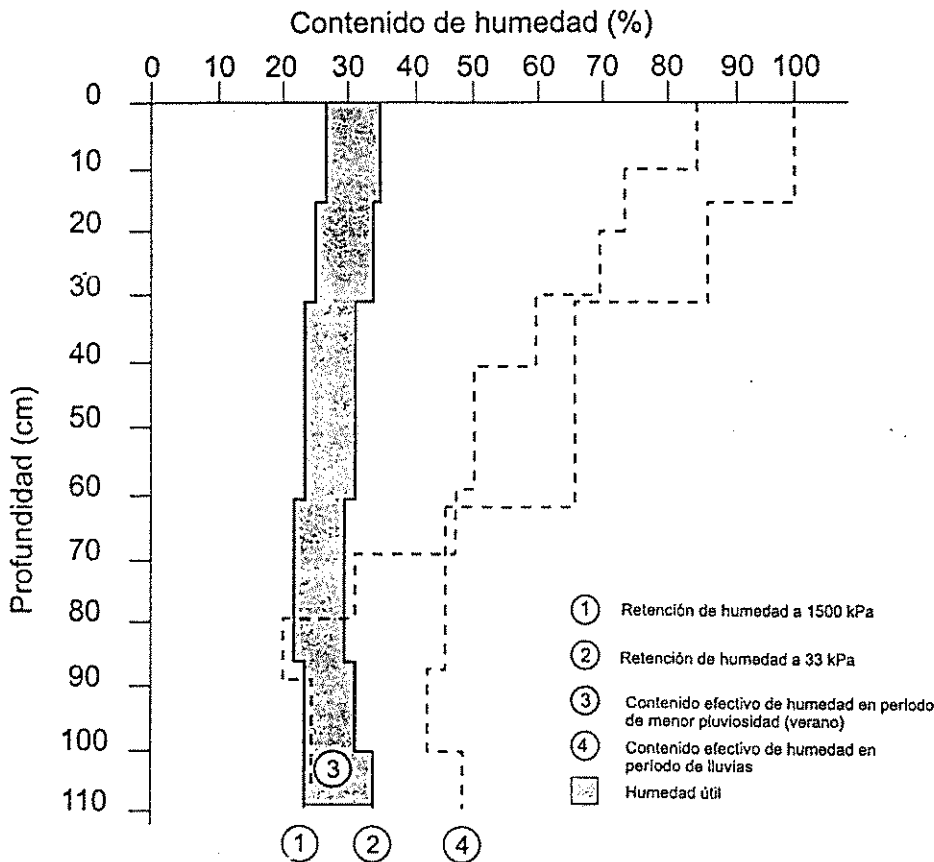


Figura 1. Perfiles hídricos en suelos de Rancho Grande (Zinck, 1986)

Tabla 2. Influencia de la fábrica y consistencia del material edáfico en la generación de movimientos en masa (Zinck, 1996)

FABRICA	ESTADO DEL MATERIAL	MOVIMIENTO EN MASA
Desfloculada	Líquido	Flujo de lodo
Dispersa	Plástico	Solifluxión
Agregada	Semi-sólido	Deslizamiento
Floculada	Sólido	Meta-estabilidad
Organización del material edáfico	Propiedad de suelo (consistencia, límites de Atterberg)	Proceso morfogénético (respuesta geomorfológica)

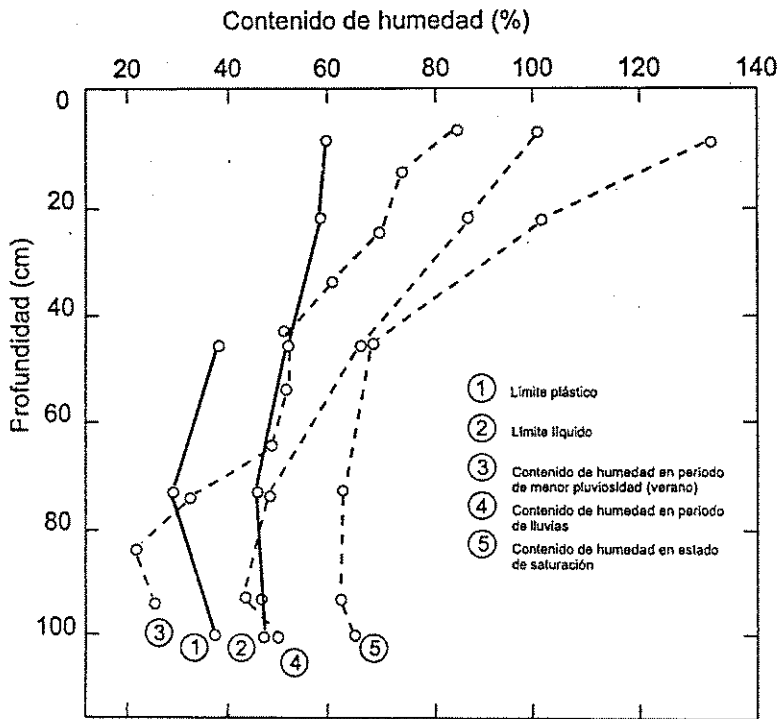


Figura 2. Perfiles hídricos y perfiles de consistencia en suelos de Rancho Grande (Zinck, 1986)

Los rasgos de erosión, dejados por el cárcavamiento o la remoción en masa, no se distribuyen al azar. Los mismos se desarrollan en respuesta a una combinación de factores. La simple superposición de un mapa de distribución de cárcavas sobre mapas representando factores ambientales individuales, como son geformas, pendiente, litología, suelos y uso de las tierras, conduce a identificar el grado de coincidencia espacial entre cárcavas y factores. Esta coincidencia cartográfica puede considerarse como una indicación de relaciones subyacentes de causa a efecto.

En un área situada aproximadamente a 100 km al noreste de Ciudad México, en la municipalidad de Huasca de Ocampo, estado de Hidalgo, se ha realizado un ejercicio de modelización

cartográfica por superposición de un mapa de cárcavas sobre una serie de mapas factoriales (Vázquez-Selem and Zinck, 1994). La relación espacial entre cárcavas y pendiente, por ejemplo, se ilustra en la figura 3. De acuerdo a la frecuencia de distribución, cerca de la mitad del área cárcavada corresponde a un estrecho rango de pendientes entre 4 y 7%. Por lo tanto, la erosión en cárcavas no aumenta proporcionalmente al gradiente de la pendiente y, en este sentido, se aparta substancialmente de los principios que gobiernan la erosión laminar y en surcos.

Similarmente, la superposición del mapa de cárcavas al mapa de suelos revela que la mayoría de las cárcavas se desarrolla en Alfisoles (Fig. 4). Cerca de 90% de la superficie cárcavada de toda el área de estudio se concentra sobre

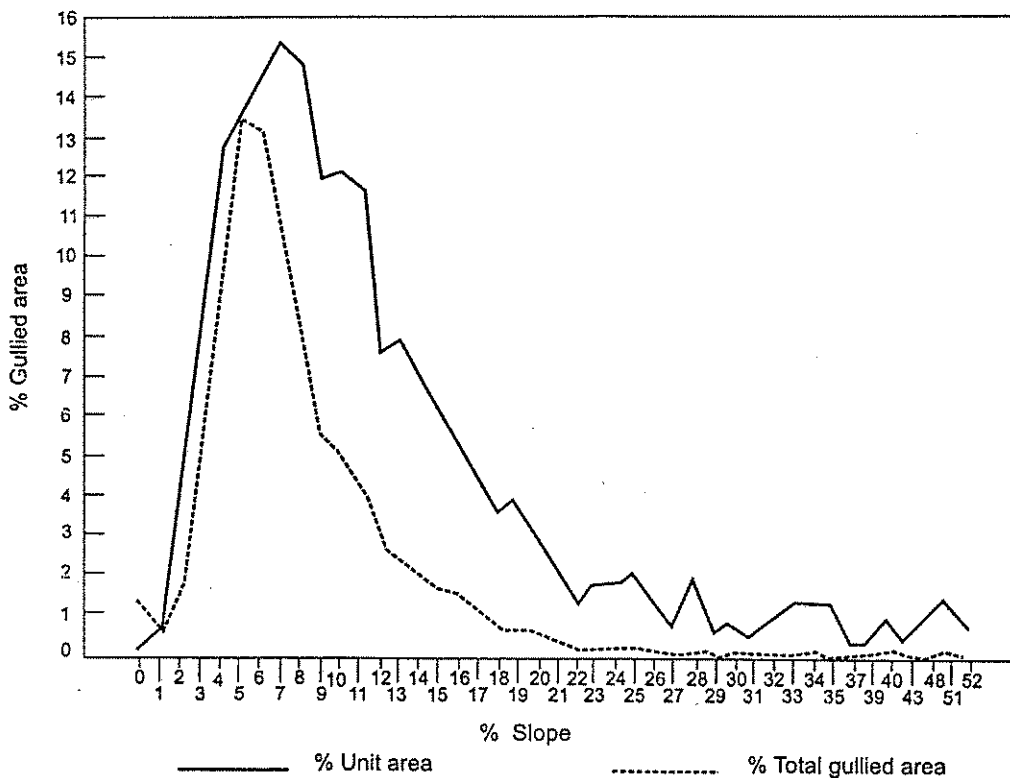
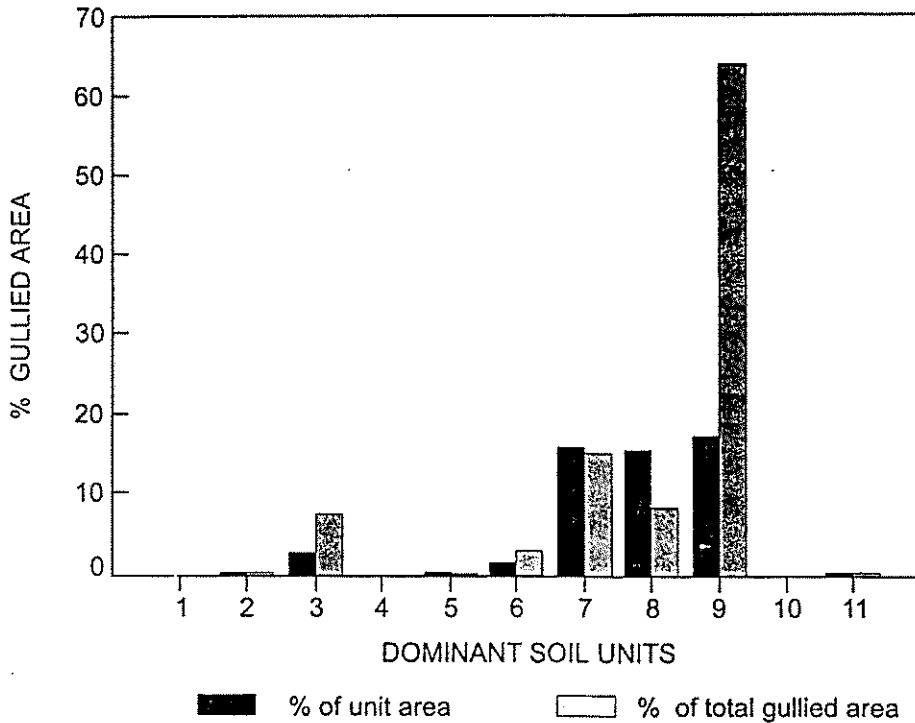


Figura 3. Superficies con cárcavas por gradientes de pendiente (Vázquez-Selem and Zinck, 1994).



- (1) Ustifluvents-Fluvaquents
- (2) Ustorthents (frequently Lithic)
- (3) Ustorthents - Ustropepts
- (4) Ustropepts (shallow: Typic and Lithic)
- (5) Ustropepts (deep: Typic and Fluventic)
- (6) Typic or Lithic Ustropepts - Lithic Ustorthents - Typic Haplustalfs
- (7) Typic Ustropepts - Typic Haplustalfs
- (8) Typic Haplustalfs
- (9) Typic Paleustalfs - Typic Haplustalfs
- (10) Typic Argiustolls - Typic Haplustolls
- (11) Fluventic Ustropepts - Typic Argiustolls - Typic Haplustalfs

Figura 4. Superficies con cárcavas por unidades de suelos dominantes (Vázquez-Selem and Zinck, 1994)

profundos Paleustalfs, a pesar de que estos representan apenas el 36% del perímetro total. Los Alfisoles del área en consideración están compuestos de dos capas mayores: una cobertura coluvial de 40 a 60 cm de espesor, reposando sobre un suelo truncado a nivel del horizonte Bt. La superficie de discontinuidad entre los dos materiales está jalonada por antiguos artefactos

humanos (2400 años BP). La diferencia de permeabilidad entre la cobertura coluvial y el substrato más arcilloso favorece el escurrimiento hipodérmico lateral, el cual inicia la formación de cárcavas. En contraste, las áreas de Mollisoles están virtualmente libres de cárcavas, a pesar de que estos suelos ocurren en condiciones similares de pendiente y uso de las tierras.

ENFOQUE PREDICTIVO

Los modelos predictivos, usualmente implementados en SIG, se basan en reglas y conocimiento experto. No tienen capacidad determinística, porque no simulan ni explican los mecanismos involucrados en la formación de cárcavas o la remoción en masa. Estos modelos se construyen a partir de los resultados del análisis exploratorio, que identifica relaciones de causa a efecto en base a la coincidencia espacial entre rasgos de erosión observados (cárcavas, deslizamientos) y factores del paisaje. Ninguno de estos modelos puede tomar en cuenta, para efectos de predicción, el papel que desempeñan los factores activadores (precipitaciones catastróficas, terremotos) en el desencadenamiento de los procesos. Las reglas se basan esencialmente en los factores condicionantes del medio ambiente (pendiente, cobertura vegetal, litología) y en algunas propiedades edáficas. Este tipo de modelo permite (1) reproducir la distribución espacial de las cárcavas existentes, y (2) predecir el potencial de ocurrencia de cárcavas en áreas donde las condiciones son favorables.

Como ejemplo de aplicación de las consideraciones anteriores, se ha desarrollado una serie de modelos para confirmar la ocurrencia de cárcavas observadas y estimar la ocurrencia de cárcavas potenciales en el área de Huasca, México central, antes mencionada (Vázquez-Selem and Zinck, 1994). En este caso, las reglas utilizadas se basan exclusivamente en el porcentaje áreal, que ocupan las cárcavas observadas en las unidades cartográficas de los mapas temáticos representando los factores ambientales. Se seleccionaron seis factores ambientales, asumidos de contribuir de una manera u otra a la formación de cárcavas: geoformas, unidades litológicas, gradientes de pendiente, formas de pendiente, suelos dominantes y usos de las tierras. Se implementaron dos criterios de porcentaje áreal: (1) el porcentaje de área carcavada en relación a la superficie de cada unidad de mapa temático, y (2) el porcentaje de área

carcavada de cada unidad de mapa temático en relación a la superficie total de las cárcavas observadas (562 ha) en el perímetro de estudio (8009 ha). Se consideró más diagnóstico el primer criterio que el segundo, porque es independiente de la superficie total carcavada y refleja por lo tanto mejor la susceptibilidad intrínseca de cada unidad de mapa temático a la formación de cárcavas. Los umbrales críticos de porcentajes áreales, para establecer límites de clases, fueron determinados por iteración en base a los gráficos de distribución de frecuencia del porcentaje de superficie carcavada por clases de factores ambientales (Figs. 3 y 4).

Con estas reglas se establecieron por tanteo seis modelos, con restricciones decrecientes del primero al sexto (Tabla 3). Por ejemplo, el modelo 1 toma en consideración solamente las unidades de los mapas temáticos con altos porcentajes de área carcavada (más de 10% o más de 15% según el factor ambiental considerado). Una tal combinación de reglas es altamente selectiva, ya que pocas unidades satisfacen estos requerimientos. En consecuencia, el área de cárcavas calculada por el modelo 1 es pequeña. Pero, al mismo tiempo, el modelo puede considerarse como eficiente, porque una gran proporción del área carcavada calculada corresponde a cárcavas observadas. Los demás modelos operan con reglas menos restrictivas por orden decreciente.

En la figura 5, se representa la eficiencia relativa de los diversos modelos por su capacidad de corroborar cárcavas observadas. La superficie actual de cárcavas es de 562 ha, equivalente al 7% del perímetro de estudio. Un modelo ideal confirmaría 100%¹ de la superficie carcavada con solamente 7% del perímetro de estudio. Por lo tanto, el modelo más eficiente es el que se acerca a este rendimiento ideal. Para estimar la eficiencia de los modelos, la superficie carcavada total calculada por cada modelo se compara con el porcentaje áreal de las cárcavas existentes adecuadamente confirmadas. En base al criterio anterior, los modelos 2b, 3a, 3b y 4a resultan ser buenos predictores.

Tabla 3. Modelos espaciales basados en reglas para la predicción de cárcavas (Vázquez-Selem and Zinck, 1994).

	Geopedologic map (1)	Lithologic map	Slope gradient map	Slope shape map	Dominant soil map	Landuse map
Model 1	>15% unit area	>15% unit area	>10% unit area	>15% unit area	>15% unit area	>10% unit area
Model 2	(>10% unit area and >10% total gullied area) or >15% unit area	>15% unit area or >30% total gullied area	>5% unit area or >5% total gullied area	>10% unit area or >20% total gullied area	>10% unit area	>5% unit area
Model 3	>5% unit area	>5% unit area and >5% total gullied area	>5% unit area or >5% total gullied area	>5% total gullied area	>5% unit area	>3% unit area
Model 4	>2% unit area	>2% unit area	>2% unit area	>2% unit area	>2% unit area	>2% unit area
Model 5	>0% unit area	>0% unit area	>0% unit area	>0% unit area	>0% unit area	>0% unit area
Model 6	no gullies	no gullies	no gullies	no gullies	no gullies	no gullies

(1) Only geomorphic component of the geopedologic map taken into account

Examples:

">15% unit area" means that only units in which gullies cover >15% of the area of the unit will be considered in the model's calculations
">5% total gullied area" means that only units that contain >5% of the total gullied area within the study area will be considered in the model's calculations

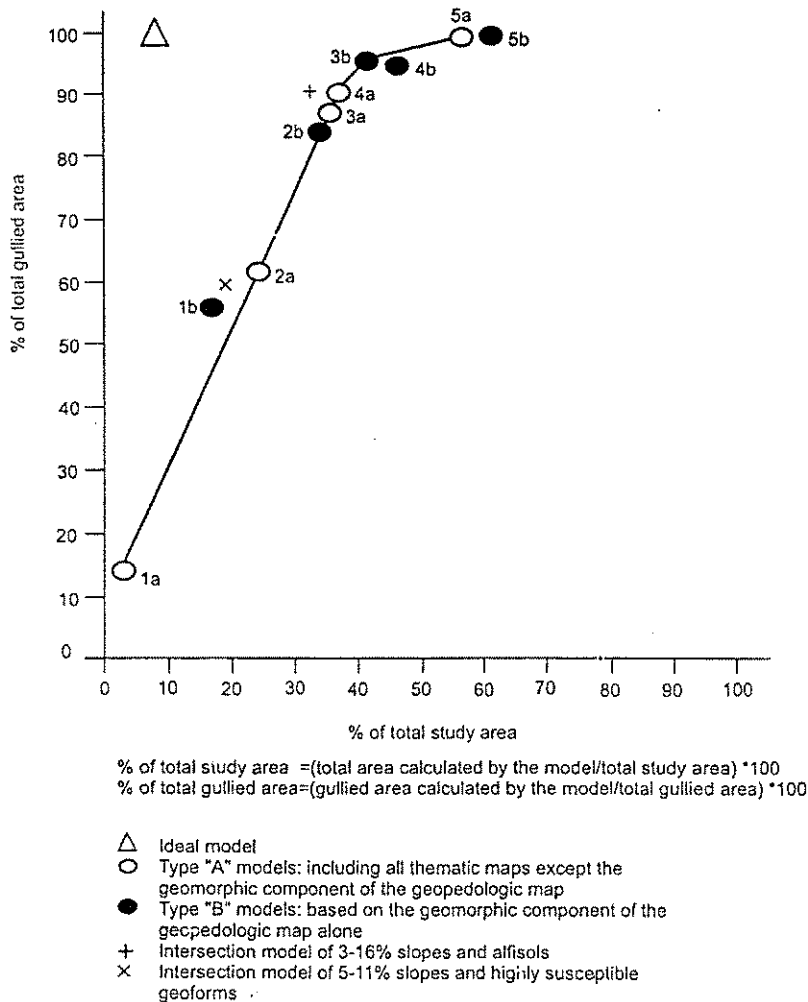


Figura 5. Eficiencia relativa de los modelos para predecir cárcavas (Vázquez-Selam and Zinck, 1994)

Además de confirmar cárcavas existentes, los modelos pueden también identificar áreas que reúnen condiciones favorables al desarrollo potencial de cárcavas. Como los modelos están ordenados por orden decreciente de restricciones, esta secuencia representa también una escala decreciente de severidad de riesgos. El modelo 1 identifica, por lo tanto, áreas de alto riesgo para futura iniciación de cárcavas; los modelos 2 a 6 señalan grados de riesgo decrecientes (Fig. 6).

En vez de basarse en consideraciones puramente areales, los modelos predictivos pueden utilizar directamente parámetros concretos para describir los factores ambientales y establecer clases de severidad de riesgos. En el valle del río Coello, departamento del Tolima, en la cordillera central de los Andes Colombianos, se estableció un modelo para identificar áreas favorables al desarrollo potencial de movimientos en masa en coberturas de cenizas volcánicas

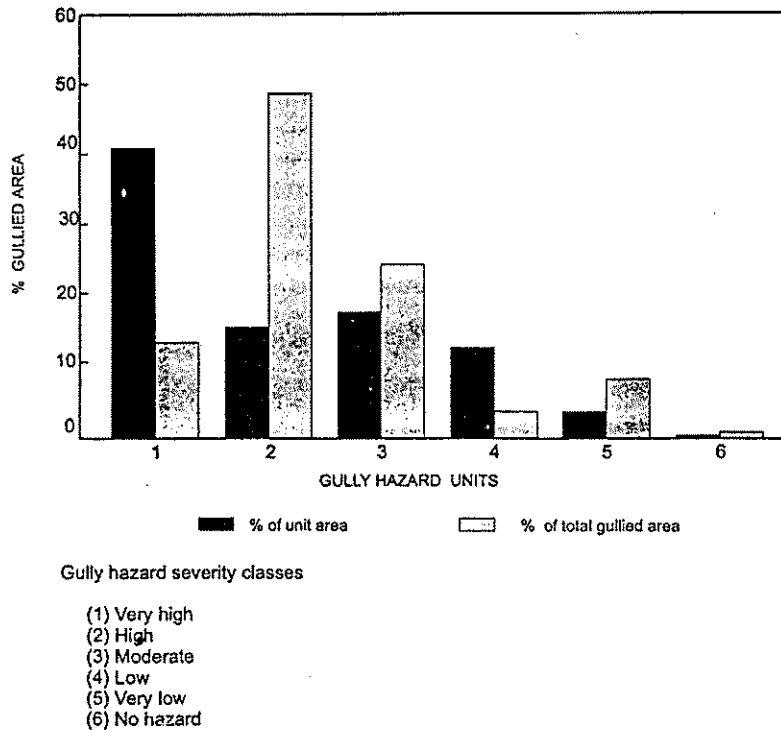


Figura 6. Grados de riesgo para la formación de cárcavas (Vázquez-Selem and Zinck, 1994)

(Lopez and Zinck, 1991). Como criterios se usaron clases de pendiente y clases de susceptibilidad del material, en base a sus propiedades físico-mecánicas, además de la presencia de movimientos en masa observados. De esto resultó un mapa representando clases de severidad en los riesgos de producirse movimientos en masa en el futuro (Fig. 7). Para la zonificación de riesgos, se utilizó un mapa geopedológico como vector para extrapolar sobre la cuenca del río Coello el modelo causal establecido en áreas-muestra. Previo a la extrapolación, se validó la homogeneidad estructural de la población de suelos y la homogeneidad espacial de las unidades geopedológicas, verificando la normalidad de los parámetros seleccionados y usando geoestadística para caracterizar la variabilidad espacial.

ENFOQUE EVOLUTIVO

La estimación de riesgos ambientales puede mejorarse, si se tiene información sobre la velocidad de progresión y dirección de desarrollo de los fenómenos de erosión. Esta información sobre la dinámica espacial y temporal de los fenómenos requiere monitoreo.

Tradicionalmente, se han utilizado técnicas de campo (estacas) para medir cambios en la erosión de suelos y, en particular, para seguir el ensanchamiento y el retroceso de las cabeceras de cárcavas. Más recientemente, mapas fotogramétricos y fotografías aéreas a gran escala han sido implementados para los mismos fines. Imágenes satelitarias son adecuadas para identificar rasgos de erosión de suelos a escala regional. Una nueva técnica, promisoría especialmente por

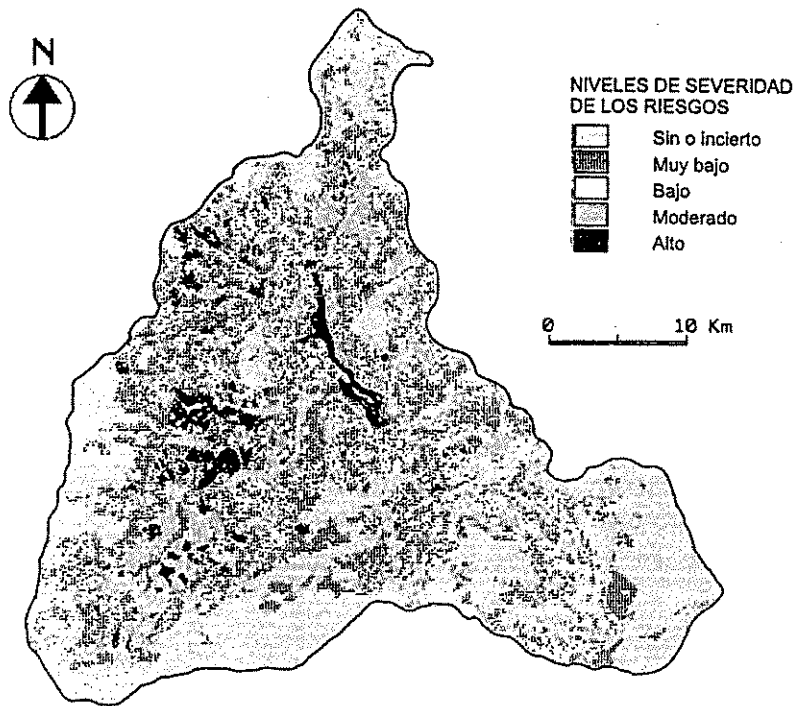


Figura 7. Riesgos de movimientos en masa en el valle del río Coello (Lopez and Zinck, 1991)

su alta resolución espacial, es la videografía basada en la adquisición y el procesamiento de imágenes obtenidos con cámaras de video.

En el área de Huasca de Ocampo (México central), anteriormente mencionada, se colectaron series temporales de imágenes de video, para monitorear la progresión espacial de cárcavas en un período de 18 meses (Palacio-Prieto and López-Blanco, 1994). Las imágenes fueron tomadas desde una altura de aproximadamente 100 m, a partir de una plataforma suspendida a un globo plástico inflado al helio, y posteriormente digitalizadas. Se corrigieron las distorsiones geométricas, para obtener documentos ortogonales que permitan identificar cambios en la configuración de las cárcavas y medir su expansión. Los tamaños de pixel de las imágenes digitales estaban entre 1 y 5 cm, lo que permitió alta precisión en la detección de detalles. Dos

cabeceras de cárcava fueron investigadas. En la primera, larga de 7 m, la pérdida de superficie de suelo fue de 1.5 m² en 18 meses, con un retroceso promedio de 215 cm² por metro de cabecera de cárcava y retrocesos máximos de 28 y 60 cm (Fig. 8). En la segunda, larga de 62 m, la pérdida total de superficie de suelo fue de 4 m² en 12 meses, con un retroceso promedio de 128 cm² por metro de cabecera de cárcava y retrocesos máximos de 30 y 45 cm (Fig. 9). Este ejemplo muestra el beneficio que se puede derivar de imágenes de video, para seguir la evolución de fenómenos de erosión acelerada y para decidir sobre eventuales medidas de protección.

CONCLUSION

Cárcavas y movimientos en masa constitu-

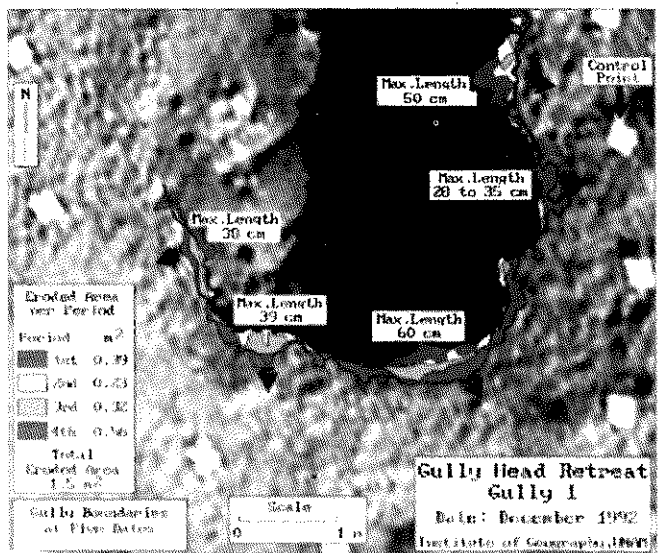


Figura 8. Pérdida de superficie por erosión en cárcava (sitio 1) entre junio 1991 y diciembre 1992. (Palacio-Prieto and López-Blanco, 1994)

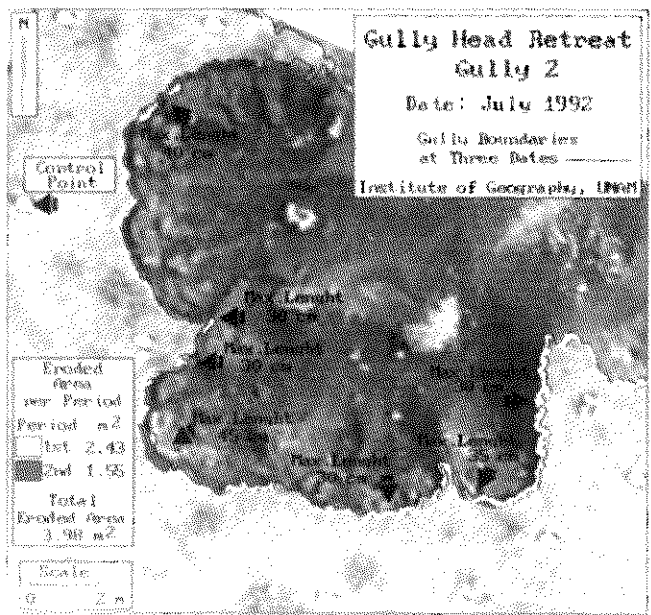


Figura 9. Pérdida de superficie por erosión en cárcava (sitio 2) entre agosto 1991 y julio 1992. (Palacio-Prieto and López-Blanco, 1994)

yen riesgos ambientales muy severos por los cuantiosos daños que causan y la dificultad de controlarlos. Debido a la complejidad de su dinámica de formación y evolución, son difíciles de analizar mediante modelos determinísticos. Enfoques más empíricos, basados en modelos de reglas y conocimiento experto e implementados en SIG, permiten explorar relaciones entre factores de formación de los fenómenos y su distribución espacial, seguir su evolución e identificar áreas potencialmente expuestas a riesgos.

BIBLIOGRAFIA

- BOCCO, G., PALACIO J. and C.R. VALENZUELA. 1990. Gully erosion modelling using GIS and geomorphic knowledge. *ITC Journal* 1990-3: 253-261.
- BOUWMAN, A.F. (ed). 1990. *Soils and the greenhouse effect*. John Wiley and Sons, Chichester, UK.
- HENRIKSEN, A., FORSIUS, M., KAMARI, J., POSCH, M. and A. WILANDER. 1993. Exceedance of critical loads for lakes in Finland, Norway and Sweden: reduction requirements for nitrogen and sulphur deposition. Norwegian Institute for Water Research (NIVA), *Acid Rain Research Report* 32, Oslo.
- LOPEZ, J. and J.A. ZINCK. 1991. GIS-assisted modelling of soil-induced mass movement hazards: A case study of the upper Coello river basin, Tolima, Colombia. *ITC Journal* 1991-4: 202-220.
- LORAN, T., ZINCK, J.A. and K.J. BEEK. 1988. Management, conservation and erosion database. In: S. Rimvanich (ed.). *Land conservation for future generations. Proc. V Int. Soil Conservation Conference, Bangkok, Thailand, Vol. 1: 37-62.*
- PALACIO-PRIETO, J.L. and J. LÓPEZ-BLANCO. 1994. Videography: an alternative remote sensing tool for monitoring gully erosion. *ITC JOURNAL* 1994-3: 233-237.
- ROO, A.P.J. DE. 1993. *Modelling surface runoff and soil erosion in catchments using geographical information systems. Validity and applicability of the ANSWERS model in two catchments in the loess area of South Limburg (The Netherlands) and one in Devon (UK)*. Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University, The Netherlands.
- SVERDRUP, H., WARFVINGE, P., RABENHORST, M., JANICKI, A., MORGAN, R. and M. BOWMAN. 1992. Critical loads and steady state chemistry for streams in the state of Maryland. *Environmental Pollution* 77: 195-203.
- VALENZUELA, C.R. and J.A. ZINCK. 1994. Information technology requiring soil data. *Proceedings 15th World Congress of Soil Science, Acapulco, Mexico, Vol. 6a: 20-39.*
- VÁZQUEZ-SELEM, L. and J.A. ZINCK. 1994. Modelling gully distribution on volcanic terrains in the Huasca area, central Mexico. *ITC Journal* 1994-3: 238-251.
- ZINCK, J.A. 1986. Propiedades y estabilidad mecánicas de los suelos en ambiente de selva nublada. In: O. Huber (ed.). *La selva nublada de Rancho Grande, Parque Nacional Henri Pittier*. Fondo Edit. Acta Cient. Venez. y Seguros Anauco C.A., Caracas, pp. 91-105.
- ZINCK, J.A. 1996. La susceptibilidad de los suelos a la erosión por movimientos en masa. Con referencia especial a las montañas tropicales húmedas. In: J. Aguilar R., A. Martínez R. y A. Roca R. (eds.). *Evaluación y Manejo de Suelos*. Junta de Andalucía - SECS - Universidad de Granada, pp. 25-48.