

DETERMINACIÓN DE ÁREAS SUSCEPTIBLES A DESLIZAMIENTOS EN UN SECTOR DE LA CORDILLERA DE LA COSTA CENTRAL DE VENEZUELA

María Corina Pineda, Graciano Elizalde y Jesús Viloria

RESUMEN

Los movimientos en masa por deslizamiento constituyen uno de los mayores riesgos ambientales en las montañas del centro-norte de Venezuela. Este trabajo presenta una evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos, realizada por medio de dos procedimientos diferentes, en un sector de 6760ha en esta región. El primer procedimiento consistió en la evaluación de unidades de paisaje por medio de un índice de susceptibilidad, calculado como el cociente entre el número de cicatrices de erosión dentro de cada unidad y en todo el sector. El índice de susceptibilidad varió desde 0 para la unidad 'sedimentos coluvio-aluviales' hasta 1,23 para la unidad 'metatobas de El Chino

y El Caño'. El segundo procedimiento, basado en regresión logística, reveló que en el sector evaluado, además de la litología, los factores condicionantes de los deslizamientos son el tipo de relieve, la distancia a la red de drenaje, la cobertura vegetal estimada por medio del índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) y la ubicación en el paisaje; mientras que el factor activador fue la precipitación. La ecuación de regresión predice una alta susceptibilidad a los deslizamientos en todo el sector, particularmente en laderas con escasa cobertura vegetal. Tal susceptibilidad aumenta en formas de terreno cóncavas ubicadas a menos de 50m de distancia de la red de drenaje.

Introducción

Entre los riesgos ambientales más frecuentes o con mayor distribución geográfica, se encuentran los movimientos en masa (Zinck, 1996; Zinck *et al.*, 2001). Sus consecuencias pueden manifestarse en áreas de muy diversas dimensiones y en lapsos muy diferentes de tiempo. Asimismo, sus impactos pueden ser variables, desde ínfimos hasta catastróficos (López y Zinck, 1996; Renschler y Harbor, 2002). Los movimientos en masa en general, y particularmente los deslizamientos, involucran muchos factores que controlan su dinámica, por lo que raramente se atribuyen a causas simples y homogéneas; son el resultado de una interacción compleja entre factores naturales, y en algunos casos pueden tener como desencadenante acciones huma-

nas, activándose por la confluencia de factores externos e internos (Elizalde y Daza, 2003; Metternicht *et al.*, 2005). Huabin *et al.* (2005) consideran que los factores responsables de la ocurrencia de cualquier tipo de erosión en masa, entre los que se encuentran los deslizamientos, pueden ser agrupados en dos categorías: preparatorios y activadores. Los factores preparatorios son variables intrínsecas del terreno, tales como las condiciones geológicas y la estructura de la pendiente, y los factores activadores son variables extrínsecas, tales como la precipitación y la actividad humana. La distribución espacial de las variables intrínsecas determina la distribución espacial de la susceptibilidad relativa en una región dada (Carrara *et al.*, 1995, citado por Huabin *et al.*, 2005). De esta manera,

estos fenómenos no se distribuyen en forma aleatoria en el paisaje. La simple superposición de un mapa de distribución de deslizamientos sobre mapas que representan factores ambientales, muestra un grado de coincidencia espacial que permite suponer una relación no aleatoria (Zinck *et al.*, 2001).

Los deslizamientos se activan por movimientos tectónicos, actividad volcánica, sismos, heladas y deshielos, erosión precedente y actividad antrópica (Zêzere *et al.*, 1999; Wasowski y Del Gaudio, 2000; Huabin *et al.*, 2005). Adicionalmente, se incluyen como elementos activadores al clima y el colapso de un dique natural (Metternicht *et al.*, 2005).

Existen numerosas metodologías para la evaluación de los procesos de movimientos en masa que son útiles para

evaluar los deslizamientos. En la mayoría de los casos se usan como apoyo herramientas estadísticas y sistemas de información geográfica (SIG), con la finalidad de identificar los factores activadores y condicionantes, y determinar su distribución. El uso del análisis de regresión logística permite identificar, entre un grupo de variables consideradas relevantes para la evaluación, los factores condicionantes y activadores específicos involucrados con su desencadenamiento a nivel local (Dai y Lee, 2002; Can *et al.*, 2005). Al combinar estos resultados con el uso de herramientas SIG se puede determinar la distribución espacial de las áreas susceptibles a deslizamientos.

Algunos métodos de evaluación se enmarcan en una concepción sistemática del paisaje. De esta manera, el

PALABRAS CLAVE / Regresión Logística / Remoción en Masa / Sensibilidad Ambiental / Sistemas de Información Geográfica / Vulnerabilidad /

Recibido: 14/04/2010. Modificado: 12/04/2011. Aceptado: 18/04/2011.

María Corina Pineda. M.Sc. en Ciencia del Suelo, Universidad Central de Venezuela (UCV). Profesora, UCV, Venezuela. Dirección: Instituto de Edafología, Facultad de Agronomía,

UCV. Av. Universidad, 2103-Maracay, Venezuela. e-mail: pinedac@agr.ucv.ve
Graciano Elizalde. Ingeniero Agrónomo, Universidad de la República, Uruguay. Doctor en

Sedimentología, Université de Paris Sud, Francia. Profesor, UCV, Venezuela. e-mail: elizaldeg@yahoo.com

Jesús Viloria. Ingeniero Agrónomo y M.Sc. en Ciencia del Suelo, UCV, Venezuela. D. Phil., University of Oxford, RU. Profesor, UCV, Venezuela. e-mail: viloriaj@agr.ucv.ve

DETERMINATION OF LANDSLIDE SUSCEPTIBLE AREAS IN A SECTION OF THE MOUNTAIN RANGES OF NORTH-CENTRAL VENEZUELA

María Corina Pineda, Graciano Elizalde and Jesús Viloria

SUMMARY

Mass movements due to landslides are one of the greatest environmental risks in the mountains of North-Central Venezuela. This paper presents an evaluation of the susceptibility to landslides, carried out by two different procedures in an area of 6760ha in this region. The first procedure assessed landscape units by means of a sensitivity index, calculated as the ratio between the number of erosion scars within each unit and in the entire sector. The susceptibility rate ranged from 0 for the landscape unit 'colluvial-alluvial sediments' to 1.23 for the unit 'metatobas of El Chino and El Caño'. The second procedure

was based on logistic regression and revealed that, in addition to lithology, the determinants of landslides in the evaluated sector are the relief type, the distance to the drainage system, the vegetation cover estimated through the normalized difference vegetation index (NDVI) and the location in the landscape, while rainfall was the activating factor. The regression equation predicts a high susceptibility to landslides around the evaluated area as a whole, especially on hillsides with scarce vegetation. Such susceptibility increases on concave landforms located at distances lower than 50m away from the drainage network.

DETERMINAÇÃO DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS A DESLIZAMENTOS EM UM SETOR DA CORDILHEIRA DA COSTA CENTRAL DE VENEZUELA

María Corina Pineda, Graciano Elizalde e Jesús Viloria

RESUMO

Os movimentos em massa por deslizamento constituem um dos maiores riscos ambientais nas montanhas do centro-norte de Venezuela. Este trabalho apresenta uma avaliação da susceptibilidade aos deslizamentos, realizada por meio de dois procedimentos diferentes, em um setor de 6.760 ha nesta região. O primeiro procedimento consistiu na avaliação de unidades de paisagem por meio de um índice de susceptibilidade, calculado como o quociente entre o número de cicatrizes de erosão dentro de cada unidade e em todo o setor. O índice de susceptibilidade variou de 0 para a unidade 'sedimentos colúvio-aluviais' até 1,23 para a unidade 'metatobas de El Chino

e El Caño'. O segundo procedimento, baseado em regressão logística, revelou que no setor avaliado, além da litologia, os fatores condicionantes dos deslizamentos são o tipo de relevo, a distância à rede de drenagem, a cobertura vegetal estimada por meio do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) e sua localização na paisagem; enquanto que o fator ativador foi a precipitação. A equação de regressão prediz uma alta susceptibilidade aos deslizamentos em todo o setor, particularmente em ladeiras com escassa cobertura vegetal. Tal susceptibilidade aumenta em formas de terrenos côncavos situados a menos de 50m de distância da rede de drenagem.

paisaje previamente clasificado y jerarquizado puede ser modelado, lo cual permite analizar con detalle la ubicación espacial de los deslizamientos y seleccionar cualidades relevantes de los paisajes vinculadas con dicho proceso, para establecer posteriormente relaciones entre estas cualidades y elementos geomorfológicos (Elizalde y Daza, 2003; Ospina y Elizalde, 2004; Guillén, 2006).

En el presente trabajo se realiza una evaluación cualitativa y cuantitativa de la susceptibilidad a los deslizamientos de un sector de la Cordillera de la Costa Central de Venezuela, con el fin de conocer los factores asociados al fenómeno e identificar las variables relacionadas y su distribución espacial.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de estudio abarca 6760ha dentro de la cuenca del río Caramacate (Figura 1). Forma parte de la megaregión fisiográfica orogénica, región Cordillera de la Costa Central, provincia fisiográfica Serranía del Interior Central (Elizalde *et al.*, 2007). La geología, según Shagam (1960) y Urbani y Rodríguez (2003) está representada por rocas del Grupo o Faja Tectónica Villa de Cura, denominadas metatobas de El Chino y El Caño (OCSCN), y metalavas de El Carmen (OCSCA), a las que se suman materiales superficiales, provenientes de los sedimentos aluviales (OCSCQ) y mantos

coluviales o coluvioaluviales (OCSCC), cuaternarios (Pineda, 2008). El promedio anual de precipitación es de 1100mm y la temperatura es ~22°C (Abreu, 2000; Parra y Puche, 2004). El paisaje está constituido principalmente por laderas de montaña, con pendientes del orden del 40% y altitudes entre 334 y 1405msnm, orientadas hacia el Sur, Sureste y Suroeste. El drenaje predominante es de tipo dendrítico, con sentido general norte-sur (Ochoa *et al.*, 2004).

Evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos

Se realizó un inventario de las cicatrizes de deslizamientos (Parise, 2001) observables

en ortofotomapas a escala 1:25000 (Guillén, 2006). A partir del mapa de inventario de cicatrizes se evaluó la susceptibilidad a los deslizamientos a través de dos procedimientos diferentes. El primero relaciona los deslizamientos con las unidades delimitadas por la clasificación del paisaje realizada por Pineda (2008), con la finalidad de elaborar un mapa de susceptibilidad a los deslizamientos de cada unidad de paisaje. El segundo procedimiento relaciona, por medio de regresión logística, el mapa de inventario de cicatrizes con un conjunto de variables ambientales que representan factores potencialmente condicionantes o activadores de procesos de movimientos en masa. A par-

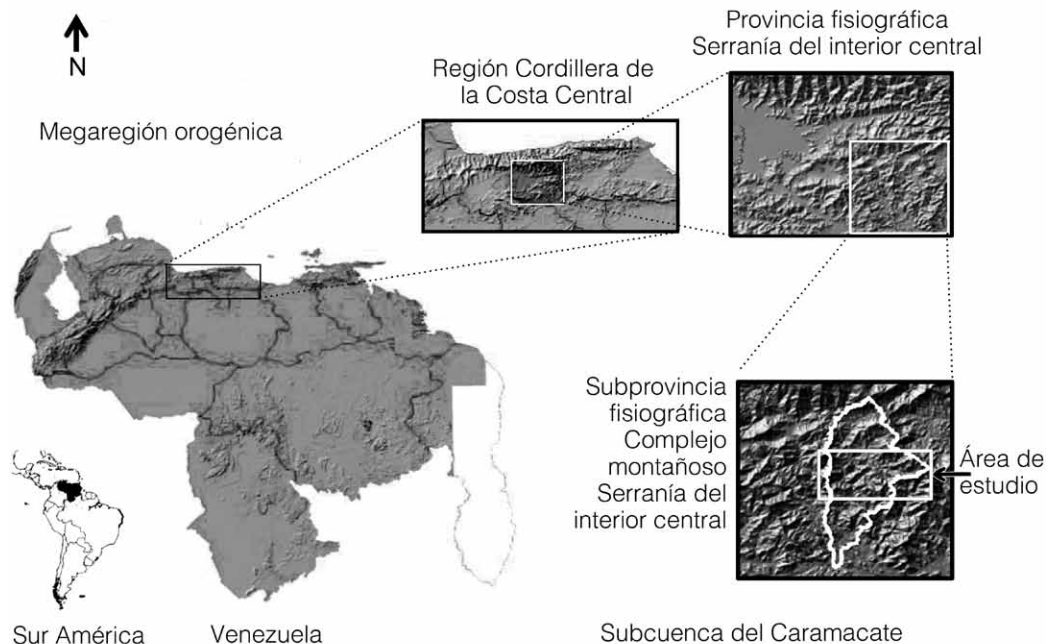


Figura 1. Mapa de ubicación relativa de la Subcuenca del Río Caramacate.

TABLA I
VARIABLES O MAPAS TEMÁTICOS DERIVADOS A PARTIR DEL MDE
EMPLEADAS EN EL ANÁLISIS

Variable	Descripción y unidad de medida
Altura absoluta	(m)
Gradiente de la pendiente	(°)
Orientación de la pendiente	En grados positivos (0-359,9°)
Perfil de curvatura	Concavidad y convexidad de la pendiente en sentido longitudinal (m·m ⁻²).
Plano de curvatura	Concavidad y convexidad de la pendiente en sentido transversal (m·m ⁻²).
Forma de terreno o curvagríd	Relación entre el plano de curvatura y el perfil de curvatura
Área de captación	Área de drenaje que contribuye a cada celda específica del MDE (m ²).

tir de este análisis se elaboró un mapa con información de carácter cuantitativo sobre la susceptibilidad a los deslizamientos.

Análisis cualitativo

El primer procedimiento empleado consistió en relacionar el ‘mapa de inventario de erosión en masa’ con el mapa de unidades de paisaje de Pineda (2008), a través de un índice de densidad de cicatrices de deslizamientos (ID_{UP}), calculado como

$$ID_{UP} = (Nd/NT)/(Sup/S_{at}) \quad (1)$$

donde Nd: número de cicatrices en la unidad de paisaje, NT: número de cicatrices en toda el área de estudio, S_{up} : superficie de la unidad de

paisaje, y S_{at} : superficie del área de estudio. Este índice es independiente de la extensión de las diferentes unidades de paisaje y permite compararlas entre sí.

El índice se calculó para las siguientes categorías de la clasificación de paisaje: unidad litogeomorfológica (nivel 5), tipo de paisaje (nivel 6) y tipo de relieve (nivel 7), con fines de comparación entre ellos (Pineda, 2008). De esta manera se obtuvo un ‘mapa de densidad de erosión en masa’ para cada nivel categórico. Estos mapas fueron convertidos a formato raster para generar, a partir de ellos, mapas de susceptibilidad relativa a la erosión en masa, presumiendo que aquellas unidades que presenten mayor densidad de cicatrices son más susceptibles.

Análisis cuantitativo

Como factores condicionantes relevantes se encuentran: el relieve, la red de drenaje, las unidades de paisaje previamente delimitadas y la cobertura vegetal. Para describir las condiciones de relieve se utilizó un modelo digital de elevación (MDE), en formato raster con celdas de 20m de lado, generado a partir de mapas topográficos 1:25000 del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (ArcGIS versión 9.1). Una vez construido el MDE, se derivaron las variables indicadas en la Tabla I.

Según D’Amato Avanzi *et al.*, (2004) y Shrestha y Zinck (1999), hay mayor frecuencia de deslizamientos en la cercanía a líneas de drena-

je. Por ello, para determinar la variable condicionante ‘distancia a la red de drenaje’ (DISRED) se generaron líneas de contorno cada 50m desde cero hasta 250m de separación de cada línea de drenaje. Esto permitió determinar automáticamente la ubicación tanto de las cicatrices de deslizamientos como de sitios, sin cicatrices con respecto a la red de drenaje (Dai y Lee, 2002).

Las unidades de paisaje se extrajeron de los mapas de los niveles categóricos 5 (unidades litogeomorfológicas), 6 (tipos de paisaje) y 7 (tipos de relieve) de la clasificación de paisajes realizada por Pineda (2008). Como información sobre cobertura y uso de la tierra se utilizó el mapa generado por Ochoa (2003), transformado a formato raster, y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) determinado a partir de una imagen SPOT-4, cuyos valores cambian de píxel a píxel.

Los factores activadores incluyeron un mapa de precipitación mediana y otro de precipitación extrema. El mapa de precipitación mediana (P50), se basó en el mapa de percentil 50 de la precipitación (Viloria *et al.*, 2004). El mapa de precipitación extrema (P75) se generó a partir del cálculo del percentil 75 de la precipitación en cada una de las estaciones localizadas en la cuenca alta del río Guárico y una interpolación posterior por kriging ordinario. Se seleccionó como factor activador a la precipitación, debido a que en la Cordillera de la Costa Central de Venezuela el factor desencadenante que más frecuentemente actúa en la activación de los deslizamientos es la lluvia (Bello *et al.*, 2000; Hernández, 2000; Hong *et al.*, 2000; López *et al.*, 2000a, b, 2003; Lyon, 2002; Romero *et al.*, 2006; Larsen, 2008).

Finalmente, se relacionó el mapa de inventario de deslizamientos con cada una de las variables (Tabla II) o

mapas temáticos indicados anteriormente, para generar una tabla de datos en la cual, a cada celda correspondiente a una cicatriz de erosión se le asignan valores de los factores potencialmente condicionantes y activadores. Con la finalidad de realizar el análisis de regresión logística, se tomaron 236 puntos sin evidencias de erosión y 216 con cicatrices de deslizamiento. Para la generación de puntos de no erosión en masa se delimitó un área buffer de 50m alrededor de cada cicatriz, con la finalidad de aislarlos de los sectores sin cicatrices, según Dai y Lee (2002). Del total de puntos, se seleccionaron 40 de forma aleatoria para llevar a cabo la validación del modelo.

Regresión logística

Las tablas de datos de los puntos con y sin cicatrices se integraron en una sola para realizar un análisis multivariado de regresión logística, por medio del programa SPSS v12 (SPSS Inc., Chicago, IL, EEUU). Los puntos de cicatrices de deslizamientos se calificaron como uno (1) y los puntos sin cicatrices detectables a escala 1:25000 se calificaron como cero (0). Se procesaron un total de 412 puntos que se denominaron deslizamientos (D), de los cuales 197 correspondían a cicatrices y 215 a ausencia de cicatrices.

Finalmente, se realizó una reclasificación de las unidades correspondientes a los tipos de relieve identificados en el nivel 7 de la clasificación de paisajes, para crear una variable categórica identificada como FT. Posteriormente, el programa creó las variables binarias ficticias FT1 y FT2, que

TABLA II
VARIABLES INCLUIDAS EN EL MODELO DE ANÁLISIS
MULTIVARIADO DE REGRESIÓN LOGÍSTICA

	B	ET	WALD	gl	p-valor	Exp(B)	IC 95,0% para Exp(B)	
							Inferior	Superior
Curvagrid	-0,309	0,095	10,647	1	0,001	0,734	0,610	0,885
DISRED	-0,014	0,004	14,723	1	0,000	0,986	0,979	0,993
NDVI	-13,857	2,001	47,957	1	0,000	0,000	0,000	0,000
P75	0,008	0,003	7,267	1	0,007	1,008	1,002	1,014
FT			30,104	2	0,000			
FT ₍₁₎	-2,454	0,447	30,104	1	0,000	0,086	0,036	0,207
FT ₍₂₎	-22,168	14752,53	0,000	1	0,999	0,000	0,000	
Constante	-10,457	5,499	3,616	1	0,057	0,000		

B: coeficiente estimado; ET: error estándar; Wald: Estadístico de Wald que contrasta la hipótesis de si los coeficientes son iguales a 0; gl: grados de libertad; p-valor: nivel de significación; Exp (B): exponente de B; IC 95,0% para Exp (B): intervalo de confianza estimados para el coeficiente B para p= 0,95.

pueden tomar los valores 0 o 1, como se muestra en la Tabla III.

Para la generación del modelo se usó el análisis de máxima verosimilitud (estadístico de Wald). La ecuación de regresión producida por la regresión logística, se aplicó a toda el área de estudio por medio del programa Arc/Map V 9.2. Posteriormente, se determinó la susceptibilidad (P) de ocurrencia de deslizamientos para cada pixel. El valor de P se estimó usando la ecuación

$$P = 1 / (1 + e^{-\hat{g}}) \quad (2)$$

donde e: base de los logaritmos neperianos, y \hat{g} : valor calculado por la ecuación resultante de la regresión logística (Can *et al.*, 2005). P debe ser interpretada como susceptibilidad a los deslizamientos y no como una probabilidad de ocurrencia de los mismos, debido a que no se toma en cuenta al factor tiempo. Finalmente, el producto fue reclasificado en

TABLA III
CODIFICACIÓN DE LA VARIABLE
CATEGÓRICA TIPO DE RELIEVE

Descripción	Código	
	FT ₍₁₎	FT ₍₂₎
Cresta y viga	1	0
Cresta de piedemonte	0	1
Ladera	0	0

Resultados y Discusión

Mapa cualitativo de susceptibilidad a deslizamientos

El índice de densidad de cicatrices de erosión (ID_{UP}) dio como resultado la siguiente gama de valores para las diferentes unidades litogeomorfológicas (categoría 5 de la clasificación de paisajes): 0 para la unidad OCSCQ; 0,28 para la unidad OCSCC; 0,79 para la unidad OCSCA; y 1,23 para la unidad OCSCN. Obsérvese que los códigos utilizados para

identificar los paisajes difieren solamente en el último término, el cual representa la litología del sustrato de cada unidad litogeomorfológica. Estos resultados revelan, al igual que los encontrados por D'Amato Avanzi *et al.* (2004) y Federici *et al.* (2006), que las características geológicas del terreno inciden de manera importante sobre la localización de deslizamientos y que la unidad OCSCN es la más susceptible a este tipo de fenómeno.

El índice ID_{UP} revela que existen diferencias entre las unidades litogeomorfológicas OCSCN y OCSCA. De esta manera, se logra discriminar entre tres diferentes clases de susceptibilidad en la misma área de estudio: baja, en las áreas cubiertas por sedimentos recientes; media, en las áreas correspondientes a las metalavas de El Carmen y alta, donde afloran las meta-tobas de El Chino y El Caño. El material de origen coluvial presentó una susceptibilidad baja a los deslizamientos, contrario a lo reportado en la literatura (Dai y Lee, 2002, D'Amato Avanzi *et al.*, 2004).

En la categoría 6 (tipo de paisaje), se encontró una gran variabilidad respecto a los valores del índice de densidad (ID_{UP}). Así, doce tipos de paisajes localizados en la

función del grado de susceptibilidad a deslizamientos, para lo que se usó la propuesta por Tangestani (2003) donde se crean cuatro clases de susceptibilidad.

El producto final reclasificado fue comparado con el mapa de susceptibilidad a deslizamientos cualitativo para generar el mapa definitivo.

Validación del modelo de regresión logística

La validación de las predicciones de la ecuación de regresión logística se realizó por medio de una matriz de confusión construida para comparar los datos observados con los predichos, en 40 puntos no incluidos en la generación del modelo.

Este es un procedimiento frecuentemente utilizado para demostrar la validez de modelos en términos de su poder predictivo (Meyer y Martínez-Casasnovas, 1999; Pearce y Ferrier, 2000; Frattini *et al.*, 2008). La matriz de confusión permite determinar la exactitud y la precisión del modelo, así como el error de omisión o falsos negativos (el modelo falla en predecir sitios con deslizamientos) y el error de comisión o falsos positivos (el modelo predice erosión en sitios donde no se han observado cicatrices).

categoría 6 y provenientes a su vez de la unidad metatobas de El Chino y El Caño (OCSCN), cicatrices de erosión por deslizamientos. De esas unidades, tres presentaron valores altos. Por otra parte, siete unidades de paisaje del nivel 6 ubicadas en la unidad OCSCA, presentaron cicatrices de deslizamientos y de esas unidades, sólo una presentó un valor alto. De este resultado se deduce que la alta susceptibilidad a los deslizamientos no se debe solamente a la formación geológica. Adicionalmente, existen otros atributos del paisaje que también contribuyen a dicha susceptibilidad. Al calcular el índice de densidad (ID_{UP}) por tipo de relieve (categoría 7 de la clasificación de paisajes) se encontró que existe mayor cantidad de tipos de relieve afectados por los deslizamientos en la unidad litogeomorfológica OCSCN que en la unidad OCSCA.

En síntesis, el mapa cualitativo de susceptibilidad a la erosión en masa (Figura 2) revela que las cicatrices de desprendimiento no se distribuyen aleatoriamente en toda el área de estudio, sino que tienden a concentrarse en áreas específicas. En particular, son más frecuentes en las laderas y crestas localizadas en la unidad litogeomorfológica OCSCN, y en ciertas laderas de la unidad OCSCA.

Mapa cuantitativo de la susceptibilidad a la erosión en masa

En la Tabla II se observan los componentes del modelo de regresión generado, el cual posee un poder de predicción de 79%, según las pruebas de ajuste realizadas. El modelo (Ec. 3) incluye las variables continuas curvagrid, distancia a la red de drenaje (DISRED), NDVI, y percentil 75 de la precipitación, así como la variable categórica $FT_{(1)}$, las cuales resultaron significativas ($P < 0,05$). En el modelo también se incluyó la varia-

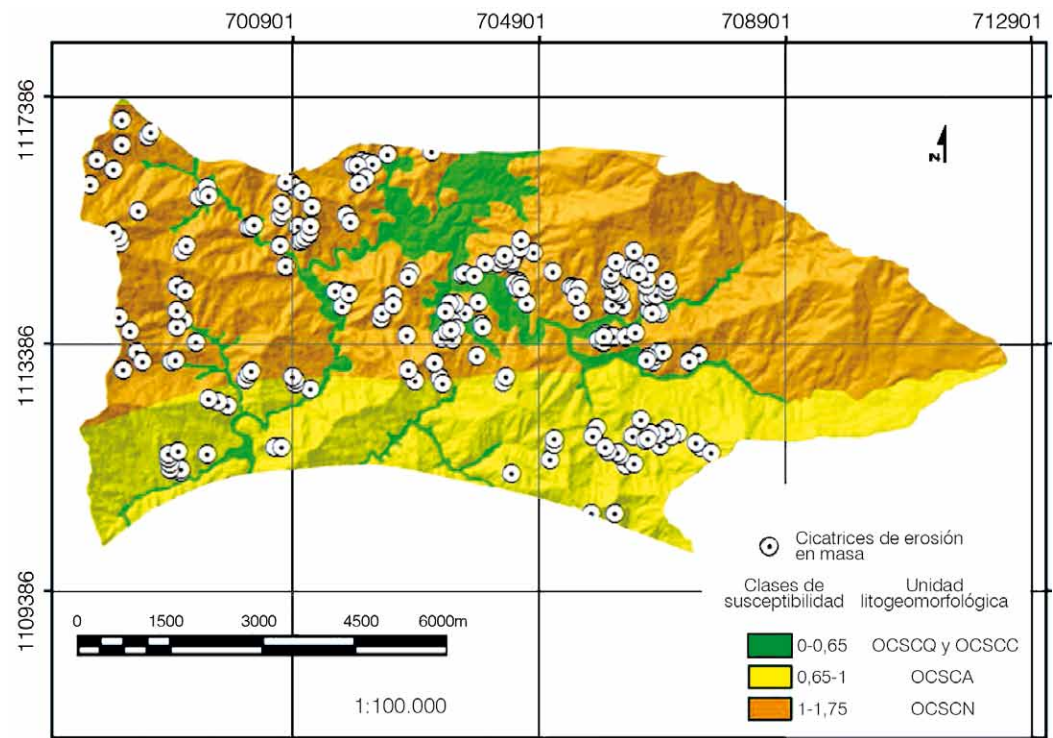


Figura 2. Mapa de susceptibilidad a la erosión en masa por unidad litogeomorfológica. Las clases de susceptibilidad a la erosión en masa determinadas en función del índice de densidad de cicatrices de erosión son: poco susceptible ($ID_{UP} = 0-0,65$), ligeramente susceptible ($ID_{UP} = 0,65-1$), y moderadamente susceptible ($ID_{UP} = 1-1,75$).

ble categórica $FT_{(2)}$ la cual, aunque no es significativa, se conservó debido a que su eliminación llevaría a excluir también la variable $FT_{(1)}$ que es altamente significativa y su exclusión disminuye la calidad predictiva del modelo.

El modelo obtenido no tomó en cuenta la variable pendiente, considerada como muy importante en los procesos de movimientos en masa (Ohlmacher y Davis 2003; Coe *et al.*, 2004). Este resultado difiere de los alcanzados por Guillén (2006), quien encontró un aumento de la densidad de cicatrices de erosión con el aumento de la pendiente. Sin embargo, se debe tener presente que la casi totalidad (90%) del área abarcada en este estudio tiene pendiente $>20\%$, mientras que Guillén (2006) estudió un área más extensa (toda la cuenca del río Caramacate) con mayor diversidad de pendientes.

Es de hacer notar que cuando el factor B en la Tabla II es negativo, el valor de $\exp(B)$ es <1 , y la variable es

interpretada como un factor de protección, porque incrementa la resistencia del sistema al deslizamiento. Por el contrario, cuando B es positivo los valores de $\exp(B)$ son >1 y, en consecuencia, la variable se considera como un factor de riesgo porque incrementa la acción de la erosión sobre el sistema.

Basados en lo expuesto anteriormente la ecuación presentó la siguiente forma:

$$\hat{g} \text{ (deslizamientos)} = -10,457 - 0,309(\text{curvagrid}) - 0,014(\text{DISRED}) - 13,857(\text{NDVI}) + 0,008(P75) - 2,454(FT_{(1)}) - 22,168(FT_{(2)}) \quad (3)$$

De acuerdo a la Ec. 2, la susceptibilidad a los deslizamientos P, aumenta cuando aumenta \hat{g} . Los valores negativos de curvagrid, DISRED y NDVI, indican que la ocurrencia de deslizamiento disminuye en la medida que aumentan los valores de estas variables. Esto es, cuanto más convexo es el terreno, mayor es la distancia a la red de drenaje y mayor es la co-

bertura vegetal (valores mayores de NDVI), menor será la ocurrencia de deslizamientos en el área de estudio. Estos resultados coinciden con los reportados por Dai y Lee (2002), quienes encontraron que existe una mayor frecuencia de deslizamientos laterales en las pendientes cóncavas y con los de D'Amato Avanzi *et al.* (2004), quienes indicaron que las configuraciones rectilíneas y cóncavas de perfiles de pendiente presentan mayor frecuencia de deslizamientos. Ello ha sido considerado de la misma forma en el modelo desarrollado por Elizalde y Daza (2003). En cuanto a la distancia a la red de drenaje, Federici *et al.* (2006) también establecieron que existe una alta frecuencia de movimientos en masa alrededor de los ríos. Por otra parte, Dai y Lee (2002) y Zhou *et al.* (2002) encontraron que los valores del NDVI influyen en la distribución espacial de los deslizamientos.

La variable P75 presentó un signo positivo, lo cual indica que la ocurrencia de

erosión en masa aumenta en la medida que aumentan los valores de la precipitación, comportándose como una variable de riesgo. Estos resultados coinciden con lo reportado por Polemio y Sdao (1999), Zêzere *et al.* (1999), Zhou *et al.* (2002), Chau *et al.* (2004), Coe *et al.* (2004), D'Amato Avanzi *et al.* (2004) y Can *et al.* (2005), quienes encontraron que el factor activador más importante fue la precipitación, por lo que se considera a este atributo como responsable de aumentar la susceptibilidad a los procesos de movimientos en masa y controlar la distribución de la misma.

Las variables $FT_{(1)}$ y $FT_{(2)}$ tienen coeficiente negativo y el valor absoluto del coeficiente de $FT_{(2)}$ es mayor a $FT_{(1)}$. De acuerdo a su codificación en la Tabla III, se puede concluir que las crestas de montaña y piedemonte presentan menor riesgo de deslizamientos que las laderas.

Validación del modelo de regresión logística

Para la validación del modelo seleccionado, se calculó la probabilidad pronosticada para cada uno de los puntos usados para generar el modelo y se comparó el valor determinado por medio de la ecuación de regresión con el valor observado (dato de entrada). El punto de corte fue establecido en 0,5. Aquellos puntos que obtuvieron una probabilidad $>0,5$ fueron clasificados como puntos susceptibles a deslizamientos, y los que obtuvieron una probabilidad $<0,5$ lo fueron como puntos no susceptibles. Del total de 215 puntos calificados como no susceptibles, 160 fueron clasificados correctamente, lo cual corresponde a un porcentaje de clasificación correcta de 74,4%. Del total de 197 puntos calificados como susceptibles, 166 fueron clasificados correctamente, lo cual arroja una probabilidad de 84,3%. En total un 79,1% de los

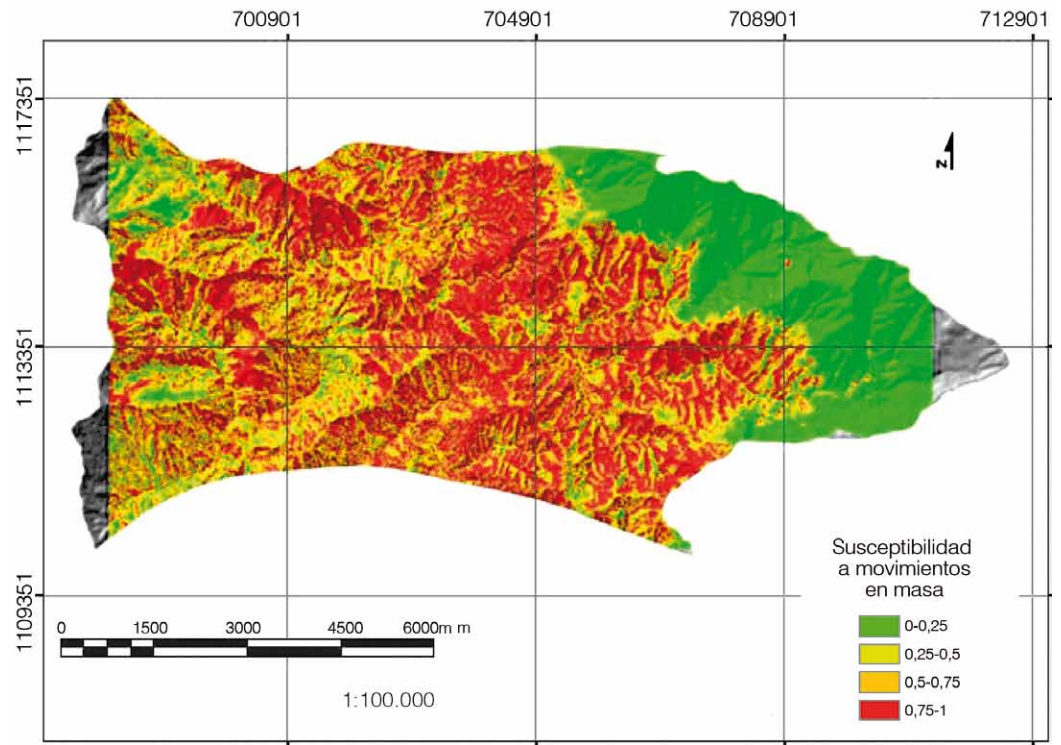


Figura 3. Mapa de susceptibilidad a la erosión en masa basada en regresión logística. Susceptibilidad baja (0-0,25), moderada (0,25-0,5), alta (0,5-0,75) y muy alta (0,75-1). Los intervalos de susceptibilidad se tomaron de Tangestani (2003).

puntos fueron clasificados por el modelo en forma correcta. Posteriormente, con los 40 puntos seleccionados de forma aleatoria de la base de datos, se estimó la probabilidad ($P=1/1+e^{-\hat{z}}$) para cada uno de los puntos y se generó la matriz de confusión. El modelo propuesto permitió discriminar entre puntos con y sin deslizamientos, con una exactitud de 73% y una precisión de 70%. El porcentaje de positivos verdaderos fue de 74% y falsos positivos o error de omisión de 29%. Los negativos verdaderos fueron de 71% y falsos negativos o error comisión de 26%. Así, en siete de cada diez sitios el modelo predice con certeza la susceptibilidad a deslizamientos, mientras que en los tres sitios restantes el modelo puede subestimar o sobreestimar esta susceptibilidad.

Distribución espacial de la susceptibilidad a deslizamientos

Como se observa en la Figura 3, la mayor parte del

área de estudio es susceptible o altamente susceptible de sufrir deslizamientos, debido a que la probabilidad es $>0,5$. Igualmente se observa que la zona este del área, presenta baja susceptibilidad, posiblemente por estar cubierta de vegetación boscosa. Si se eliminara esta cubierta, los problemas de deslizamientos podrían extenderse o generalizarse hacia esta zona, ya que las demás condiciones incluidas en el modelo de regresión son similares al resto del área.

Conclusiones

El índice de densidad de deslizamientos calculado para cada unidad cartográfica de los mapas geomorfológicos, permitió determinar la distribución espacial de estos fenómenos, mostrando en cierta forma cuáles unidades lito-geomorfológicas, tipos de paisaje y tipos de relieve, pudiesen ser más o menos susceptibles, independientemente de su extensión.

El modelo de regresión logística seleccionado muestra

que los atributos más relacionados con el desencadenamiento de los deslizamientos en el área de estudio son la forma del terreno o curvatura, la distancia a la red de drenaje, la cobertura vegetal evaluada a través del NDVI y el tipo de relieve (crestas, vigas o laderas), como factores condicionantes, y el percentil 75 de la precipitación que corresponde a la precipitación máxima, como factor de activación o riesgo.

La comparación entre los mapas cualitativo y cuantitativo de susceptibilidad a los deslizamientos permite valorar la utilidad de cada enfoque. La determinación de la susceptibilidad en unidades de paisaje previamente delimitadas permite establecer la distribución espacial de la susceptibilidad, e inferir en forma indirecta los atributos relacionados con ésta. En cambio, la determinación de la susceptibilidad a través de regresión logística, usando datos de variables continuas o categóricas, permite determinar cuáles son los atributos relacionados con los pro-

cesos, establecer su relación y su distribución espacial. Es importante establecer que las variables seleccionadas para el modelo de regresión resultan relevantes para la zona estudiada; pero la aplicación del mismo procedimiento en otras áreas, podría producir una ecuación de predicción compuesta de otras variables y otros coeficientes.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH) de la Universidad Central de Venezuela, el Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FONACIT) del Ministerio del Poder Popular para Ciencia, Tecnología e Industrias Intermedias y la Ley Orgánica de Ciencia, Tecnología e Innovación (LOCTI).

REFERENCIAS

- Abreu X (2000) *Caracterización de los Tipos de Utilización de la Tierra Relevantes en la Cuenca Alta del Río Guárico, Subcuencas Caramacate y Las Hermanas*. Tesis. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 152 pp.
- Bello ME, O'Brien JS, López JL, García-Martínez R (2000) Simulation of flooding and debris flows in the cerro Grande river. En *Estudio de Caso*. Jornadas de Investigación. JIFI 2000. Segundo Encuentro Académico EAI-UCV. (27/11-01/12/2000). Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. pp. 531.
- Can T, Nefeslioglu H, Gokceoglu C, Sonmez H, Duman TY (2005) Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses. *Geomorphology* 72: 250-271.
- Chau KT, Sze YL, Fung MK, Wong WY, Fong EL, Chan LCP (2004) Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS. *Comput. Geosci.* 30: 429-443.
- Coe JA, Godt JW, Baum RL, Bucknam RC, Michael JA (2004) Landslide susceptibility from topography in Guatemala. En Lacerda WA, Ehrlich M, Fontura SAB, Sayón ASF (Eds.) *Landslides: Evaluation and Stabilization*. Taylor & Francis. Londres, RU. pp. 69-78.
- Dai FC, Lee CF (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* 42: 213-228.
- D'Amato Avanzi G, Giannecchini R, Puccinelli A (2004) The influence of the geological and geomorphological settings on shallow landslides. An example in a temperate climate environment: the June 19, 1996 event in northwestern Tuscany (Italia). *Eng. Geol.* 73: 215-228.
- Elizalde G, Daza M (2003) Procedimiento para evaluar amenazas de movimientos en masa con información restringida en paisajes montañosos. *Rev. Fac. Agron.* 29: 197-208.
- Elizalde G, Viloria J, Rosales A (2007) *Geografía de suelos de Venezuela. Geo Venezuela 2. Medio Físico y Recursos Ambientales*, Cap. 15. Fundación Empresas Polar. Caracas, Venezuela. 2: 402-535.
- Federici PR, Puccinelli RA, Cantarelli E, Casarosa N, D'Amato Avanzi G, Falaschi F, Giannecchini R, Pochini A, Ribolini, Bottai M, Salvati N, Testi C (2006) Multidisciplinary investigations in evaluating landslide susceptibility. An example in the Serchio River valley (Italia). *Quat. Int.* 171-172: 52-63.
- Fratini P, Crosta G, Carrara A, Agliardi F (2008) Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. *Geomorphology* 94: 419-437.
- Guillén C (2006) *Diagnóstico de cicatrices de erosión en masa en la subcuenca del río Caramacate de la cuenca alta del río Guárico (CARG) y su Relación con Elementos Geomorfológicos*. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 167 pp.
- Hernández EA (2000) Debris and mud flows, Vargas state, Venezuela, storm of 15 and 16 december 1999. En *Dinámica de Flujo Torrencial*. Jornadas de Investigación. JIFI 2000. Segundo Encuentro Académico EAI-UCV. (27/11-01/12/2000). Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. pp. 572-573.
- Hong X, Fangqiang W, Peng C (2000) Causes and characteristics of the Avila debris flows in Venezuela. En *Estudio de Caso*. Jornadas de Investigación. JIFI 2000. Segundo Encuentro Académico EAI-UCV. (27/11-01/12/2000). Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. pp. 581.
- Huabin W, Gangjun L, Weiya X, Gonghui W (2005) GIS-based landslide hazard assessment: an overview. *Progr. Phys. Geogr.* 29: 548-567.
- Larsen MC (2008) Rainfall-triggered landslides, anthropogenic hazards, and mitigation strategies. *Adv. Geosci.* 14: 147-153.
- López H, Zinck A (1996) GIS. Assisted modeling of soil-induced mass movement hazards: A case study of upper Coello river basin, Tolima, Colombia. *ITC-Journal* 4: 202-220.
- López JL, Bello ME, González N, Toyo A, Alcalá O (2000a) Consideraciones sobre el desastre de Carmen de Uria. En *Estudio de Caso*. Jornadas de Investigación. JIFI 2000. Segundo Encuentro Académico EAI-UCV. (27/11-01/12/2000). Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. pp. 593.
- López JL, Pérez D, García R, Shucheng Z (2000b) Evaluación hidro-geomorfológica de los aludes torrenciales de diciembre de 1999 en Venezuela. En *Hidrología*. En *Estudio de Caso*. Jornadas de Investigación. JIFI 2000. Segundo Encuentro Académico EAI-UCV. (27/11-01/12/2000). Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. pp. 594.
- López JL, Pérez D, García R. (2003) Hydrologic and geomorphologic evaluation of the 1999 debris-flow event in Venezuela. *Proc. Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment* 2: 989-1000.
- Lyon B (2002) Enhanced seasonal rainfall in Northern Venezuela and the extreme events of December 1999. *J. Climate* 16: 2302-2306.
- Metternicht G, Hurni L, Gogu R (2005) Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geospatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Rem. Sens. Env.* 98: 284-303.
- Meyer A, Martínez-Casasnovas JA (1999) Prediction of existing gully erosion in vineyard parcels of the NE Spain: a logistic modelling approach. *Soil Till. Res.* 50: 319-331.
- Ochoa J (2003) *Análisis de la cobertura y uso de la tierra a escala semidetallada, a partir del procesamiento visual de una imagen de satélite Landsat, en la cuenca del río Caramacate*. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 127 pp.
- Ochoa J, Jácome A, Viloria J (2004) *Caracterización del relieve de las subcuencas de los ríos Caramacate y San Juan, por medio de los modelos digitales de elevación*. Proyecto Iniciativa Científica del Milenio. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 30pp.
- Ohlmacher G, Davis JC (2003) Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Eng. Geol.* 69: 331-343.
- Ospina A, Elizalde G (2004) *Clasificación de paisajes de la subcuenca del río Caramacate a escala 1:100.000*. Proyecto Iniciativa Científica del Milenio. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 45 pp.
- Parise M (2001) Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard. *Phys. Chem. Earth (C)* 26: 697-703.
- Parra M, Puche M (2004) *Informe sobre caracterización climática de las estaciones pertenecientes a la cuenca alta del río Guárico. Manejo integral de la cuenca alta del río Guárico*. Proyecto Iniciativa Científica del Milenio. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 78 pp.
- Pearce J, Ferrier S (2000) An evaluation of alternative algorithms for fitting species distribution models using logistic regression. *Ecol. Modell.* 128: 127-147.
- Pineda MC (2008) *Determinación de áreas susceptibles a movimientos en masa y erosión laminar en unidades de paisaje del río Caramacate, localizada en la cuenca alta del río Guárico*. Trabajo de ascenso. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 332 pp.
- Polemio M, Sdao F (1999) The role of rainfall in the landslide hazard: the case of the Avigliano urban area (Southern Apennines, Italia). *Eng. Geol.* 53: 297-309.
- Renschler CS, Harbor J (2002) Soil erosion assessment tools

- from point to regional scales -the role of geomorphologists in land management research and implementation. *Geomorphology* 47: 189-209.
- Romero M, Cragno A, Schmitz M, Ambrosio R (2006) Caracterización de suelos con métodos geofísicos en la Guaira, Macuto, Caraballeda y Tanaguarena, estado Vargas, Venezuela. *Bol. Técn. IMME* 44: 15 pp.
- Shagam R (1960) *Geología de Aragua central (Venezuela)*. III Cong. Geol. Venezuela. Caracas, Venezuela. 2: 574-675.
- Shrestha DP, Zinck JA (1999) Land degradation assessment using geographic information system: A case study in the middle mountain region of the Nepalese Himalaya. *Int. Conf. on Geoinformatics for Natural Resource Assessment, Monitoring and Management* (09-11/03/1999) IIRS. Dehradun, India. pp. 391-409.
- Tangestani MH (2003) Landslide susceptibility mapping using the fuzzy gamma operation in a GIS, Kakan catchment area, Iran. *Proc. 6th Annual Int. Conf. Map India 2003*. New Delhi, India. 6 pp.
- Urbani F, Rodríguez JA (2003) *Atlas Geológico de la Cordillera de la Costa, Venezuela*. (Mapas a escala 1:25.000). FUNVISIS / Universidad Central de Venezuela. Caracas. Venezuela. 146 pp.
- Viloria J, Primera M, Puche M (2004) *Mapa de Isoyetas de Precipitación para la Cuenca Alta del río Guárico usando kriging ordinario*. Proyecto Iniciativa Científica del Milenio. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay. Venezuela. 11 pp.
- Wasowski J, Del Gaudio V (2000) Evaluating seismically induced mass movement hazard in Caramanico Terme (Italia) *Eng. Geol.* 58: 291-311.
- Zêzere A, Ferreira B, Rodrigues M (1999) The role of conditioning and triggering factors in the occurrence of landslides: a case study in the area north of Lisbon, Portugal. *Geomorphology* 30: 133-146.
- Zhou CH, Lee CF, Li J, Xu ZW (2002) On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* 43: 197-207.
- Zinck A (1996) Susceptibilidad de los suelos a la remoción en masa, con referencia especial a las montañas tropicales húmedas. En Aguilar RJ, Martínez A, Rocca RA (Eds.) *Evaluación y Manejo de Suelos*. Junta de Andalucía/SECS/ Universidad de Granada. España. pp. 25-48.
- Zinck A, López J, Metternicht G, Shrestha D, Vázquez-Selem L (2001) Mapping and modeling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf.* 3: 43-53.