
RELACIÓN ENTRE LOS CAMBIOS DE COBERTURA VEGETAL Y LA OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS DE TIERRA EN LA SERRANÍA DEL INTERIOR, VENEZUELA

María Corina Pineda, José Antonio Martínez-Casasnovas y Jesús Viloria

RESUMEN

Los cambios en cobertura vegetal pueden incidir en la susceptibilidad a los deslizamientos de tierras. Sin embargo, esta influencia está sujeta a controversia. El presente estudio intenta evaluar las relaciones entre los cambios de cobertura vegetal y la existencia de deslizamientos de tierras en dos unidades geológicas, en un sector de la Serranía del Interior de Venezuela. La primera unidad está constituida por basaltos y rocas metavolcánicas asociadas a rocas sedimentarias (VCnc) y la otra por metalavas máficas intercaladas con rocas metasedimentarias y otras rocas metavolcánicas (VCca). Para evaluar los cambios en la cobertura vegetal se utilizó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), determinado en varios periodos sucesivos entre 1986 y 2008. La clasificación de los valores de NDVI

coincidió con los principales tipos de cobertura vegetal presentes en el área de estudio. Los valores de NDVI disminuyeron paulatinamente en las áreas susceptibles a deslizamientos en ambas unidades geológicas, lo que revela la ocurrencia de una degradación progresiva de la cobertura vegetal en estas áreas. El área correspondiente a la formación VCnc presentó una mayor superficie (90%) afectada por pérdida de cobertura vegetal, mientras que VCca presentó un 60% de superficie afectada y un 17% de superficie en recuperación. Los valores de NDVI fueron significativamente mayores en sitios sin deslizamientos que en aquellos con cicatrices de desprendimiento. Esto evidencia que la remoción de la cobertura vegetal tiende a promover la ocurrencia de deslizamientos de tierra en el área estudiada.

Introducción

La cobertura vegetal ha sido objeto de debate en cuanto a su efecto condicionante o activador de distintos tipos de movimientos en masa (Imaizumi *et al.*, 2008). Algunos autores señalan que dicha cobertura juega un papel importante debido a que influye en las propiedades hidrológicas y mecánicas del suelo (Dai y Lee, 2002), mejora la cohesión, fortalece la matriz del suelo y aumenta su potencial mátrico a través de la evapotranspiración y la intercepción (Gómez y Kauzogh, 2005), favoreciendo la estabilidad de las laderas. Debido a las condiciones favorables que proporciona la presencia de cubierta vegetal, algunos tipos de movimientos en masa se asocian, por lo

general, a áreas donde hay intervención en la misma (Geymen y Baz, 2008). La intervención en la cobertura afecta los procesos de infiltración del suelo y la evapotranspiración, así como la capacidad de las raíces de arraigarse al suelo, disminuyendo con esto la estabilidad de taludes e incrementando el riesgo de deslizamientos. De hecho, en terrenos con cobertura vegetal nativa (boscosa o de uso forestal) tienden a ocurrir menos deslizamientos, debido al efecto protector de la vegetación (Glade, 2003); aunque esto depende de la naturaleza, densidad y tipo de cobertura vegetal, entre otros factores (D'Amato Avanzi *et al.*, 2004). Sin embargo, a pesar de que algunos autores como Dai y Lee (2002) y Gorsevski *et al.* (2006) indican que los

deslizamientos ocurren con mayor frecuencia en campos deforestados o cultivados y sobre tierras en barbecho o bajo pastos, otros autores señalan que la presencia de cobertura vegetal contribuye a la susceptibilidad a los deslizamientos (D'Amato Avanzi *et al.*, 2004).

El índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés) es ampliamente utilizado para estimar la cantidad, desarrollo y otros atributos de la estructura de la vegetación. Se basa en la intensidad de la radiación de las bandas del espectro electromagnético que las cubiertas reflejan. Además, el NDVI permite identificar los cambios temporales y monitorizar los cambios en la dinámica de la vegetación, presentando una alta

correlación con la densidad de vegetación y el porcentaje de cobertura (Freitas *et al.*, 2005; Krishnaswamy *et al.*, 2009). Al evaluar el estado de la cobertura se pueden hacer inferencias sobre la influencia de estos cambios en la ocurrencia de algunos tipos de movimientos en masa; aunque es difícil relacionar directamente la ocurrencia de deslizamientos de tierra con los cambios en el uso del suelo (Glade, 2003). Arismendi *et al.* (2000) evaluaron y cuantificaron las áreas afectadas por los deslizamientos en la Cordillera de la Costa Central de Venezuela, haciendo énfasis en los procesos geomorfológicos y la cobertura natural, a través de la comparación de imágenes de satélite tomadas antes y después de la ocurrencia de un

PALABRAS CLAVE / Cambios de Uso / Erosión en Masa / Guárico / Montaña Tropical / NDVI / Rocas Metavolcánicas /

Recibido: 15/05/2014. Modificado: 11/02/2016. Aceptado: 12/02/2016.

María Corina Pineda. Ingeniera Agrónoma y Doctora 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: maria.c.pineda@ucv.ve

José Antonio Martínez-Casasnovas. Doctor en

Ingeniería Agronómica, Universidad de Lleida (UDL), España. Profesor, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria, UDL, España. e-mail: j.martinez@macs.udl.es

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

RELATIONSHIP BETWEEN CHANGES OF VEGETATION COVER AND LANDSLIDES OCCURENCY IN MOUNTAIN RANGES OF NORTH-CENTRAL, VENEZUELA

María Corina Pineda, José Antonio Martínez-Casasnovas and Jesús Viloria

SUMMARY

Changes in vegetation cover can affect the susceptibility to landslides. However, this influence is a subject of controversy. The present study assesses the relationships between changes in vegetation and the occurrence of landslides in two different geological units, in a mountainous area in North-Center Venezuela. The first unit consists of basalts associated to metavolcanic and sedimentary rocks (VCnc) and the second is formed by rocks of mafic metalavas intercalated with other metasedimentary and metavolcanic rocks (VCca). Changes on vegetation cover were assessed by means of the normalized difference vegetation index (NDVI) along several successive periods between 1986 and

2008. The classification of the NDVI values coincided with the main types of vegetation cover present in the study area. The values of NDVI gradually diminished in the areas susceptible to landslides in both geological units, which reveals the occurrence of a progressive degradation of plant cover in these areas. VCnc presented a greater affected surface (90%) by loss of plant cover, whereas VCca exhibited 60% of the area affected and 17% of the surface recovered. NDVI values were significantly higher in points without landslides than in those with landslide scars. This shows that the removal of vegetation cover tends to promote the occurrence of landslides in the study area.

RELAÇÃO ENTRE AS MUDANÇAS DE COBERTURA VEGETAL E A OCORRÊNCIA DE DESLIZAMENTOS DE TERRA NA CORDILHEIRA “SERRANIA DO INTERIOR”, VENEZUELA

María Corina Pineda, José Antonio Martínez-Casasnovas e Jesús Viloria

RESUMO

As mudanças na cobertura vegetal podem incidir na susceptibilidade aos deslizamentos de terras. No entanto, esta influência está sujeita a controvérsia. O presente estudo tenta avaliar as relações entre as mudanças de cobertura vegetal e a existência de deslizamentos de terras em duas unidades geológicas, em um setor da Cordilheira “Serrania do Interior” na Venezuela. A primeira unidade está constituída por basaltos e rochas metavulcânicas associadas a rochas sedimentárias (VCnc) e a outra por metalavas máficas intercaladas com rochas metasedimentares e outras rochas metavulcânicas (VCca). Para avaliar as mudanças na cobertura vegetal foi utilizado o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), determinado em vários períodos sucessivos entre 1986 e 2008. A classificação dos valores

de NDVI coincidiu com os principais tipos de cobertura vegetal presentes na área de estudo. Os valores de NDVI diminuíram paulatinamente nas áreas susceptíveis a deslizamentos em ambas as unidades geológicas, o que revela a ocorrência de uma degradação progressiva da cobertura vegetal em estas áreas. A área correspondente à formação VCnc apresentou uma maior superfície (90%) afetada por perda de cobertura vegetal, enquanto que VCca apresentou 60% de superfície afetada e 17% de superfície em recuperação. Os valores de NDVI foram significativamente maiores em lugares sem deslizamentos que naqueles com cicatrizes de desprendimento. Isto evidencia que a remoção da cobertura vegetal tende a promover a ocorrência de deslizamentos de terra na área estudada.

deslizamiento de gran magnitud (SPOT-Pancromáticas, IKONOS y ortofotomapas a escala 1:25000). En las imágenes se observó un deterioro significativo de la cubierta vegetal, específicamente en los pisos tropical y pre-montano y en menor proporción en el montano bajo.

Pineda *et al.* (2011a) utilizaron un índice de susceptibilidad a deslizamientos, para comparar unidades de paisaje con diferente litología en la cuenca del río Caramacate en Venezuela. Este índice, calculado como el cociente entre el número de cicatrices de erosión en cada unidad de paisaje y en toda el área estudiada, fue mayor para las metatobas de El Chino - El Caño (VCnc) que para las metalavas de El Carmen (VCca). Los autores citados también

demonstraron, por medio de un análisis de regresión logística, la alta susceptibilidad a deslizamientos en laderas con escasa cobertura vegetal, estimada a partir de valores de NDVI.

Sin embargo, se debe tener presente que la vegetación a menudo enmascara las características morfológicas indicativas de deslizamientos de tierra (Booth *et al.*, 2009). Incluso, algunos tipos de movimientos en masa pueden estar enmascarados por diversos factores tales como: otros procesos de erosión, crecimiento de la cobertura vegetal, actividad humana y efecto del tiempo (Guzzetti, 2003). Con esto se muestra que uno de los factores más influyentes sobre la ocurrencia de los deslizamientos es la cobertura y su evaluación permite a su

vez la determinación indirecta del efecto de la intervención humana. Adicionalmente, debido a su comportamiento diferencial se hace necesario evaluar su papel en áreas calificadas como alta o ligeramente susceptibles a los deslizamientos. El objetivo de este trabajo ha sido evaluar los cambios espaciales y temporales de la cobertura vegetal y su asociación con la susceptibilidad a los deslizamientos en un sector de la cuenca del río Caramacate, en la Serranía del Interior de la Cordillera de la Costa de Venezuela.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de estudio (6760ha) forma parte de la Cuenca del

Río Caramacate localizada en Serranía del Interior en la Cordillera de la Costa Central de Venezuela (Datum Sirgas Regven, 9.55 a 10.09m Norte y -67.12 a -67.03m Este). La geología está representada por dos unidades geológicas: VCnc, constituída por basaltos y rocas metavulcánicas asociadas a rocas sedimentarias, y VCca, compuesta por metalavas máficas intercaladas con rocas metasedimentarias y otras rocas metavolcánicas (Tabla I). El relieve es montañoso, con altitudes de 334 a 1405msnm mar y pendiente media de 40%. La precipitación media anual es de 1100 mm y la temperatura media anual 22°C (Pineda *et al.*, 2011a). La cobertura vegetal dominante es herbácea, sometida a pastoreo extensivo e interrumpida por corredores

TABLA I
CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ÁREAS DE MUESTREO LOCALIZADAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Unidad geológica	Susceptibilidad a los deslizamientos	Orientación	Pendiente media (%)	Altura media (m)	Tipo de drenaje	Tipo de erosión
VCnc	Ligeramente susceptible	Noreste	44	676	Paralelo, de baja densidad	Terracetas y laminar
	Altamente susceptible	Noreste, Suroeste	44-47	698-710	Dendrítico, de mediana densidad	Terracetas, laminar, concentrada y cicatrices de erosión por deslizamiento
VCca	Ligeramente susceptible	Noroeste-Norte, Suroeste	50	574-603	Dendrítico	Terracetas y laminar
	Altamente susceptible	Sur, Noroeste	40	837-875	Paralelo, de mediana densidad	Terracetas, laminar, concentrada y cicatrices de erosión por deslizamiento

TABLA II
VALORES DE PROPIEDADES SELECCIONADAS DEL PERFIL DE SUELO REPRESENTATIVO DE CADA COMBINACIÓN DE UNIDAD GEOLÓGICA Y GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS

Unidad geológica	Susceptibilidad a los deslizamientos	Horizonte	Prof. del suelo (cm)	Arcilla* (%)	Da (Mg·m ⁻³)	Ks (mm·h ⁻¹)	CC	PMP		CAA
								(mm)		
VCnc	Ligeramente susceptible	A	0-13	19,7	1,3	204	42,5	23,0	66,4	
		B	13-26	22,7	1,3	285	40,3	25,2	63,7	
	Altamente susceptible	A	0-11	21,1	1,3	523	25,4	20,6	70,9	
VCca	Ligeramente susceptible	A	0-13	17,8	1,4	124	36,5	23,8	64,2	
		B	13-25	23,5	1,5	22	39,4	26,5	52,1	
	Altamente susceptible	A	0-12	17,0	1,4	145	37,7	21,7	57,2	

Ks: conductividad hidráulica saturada (mm·h⁻¹), Da: densidad aparente (Mg·m⁻³), CC: capacidad de campo estimada como el contenido de agua a -33kPa, PMP: punto de marchitez permanente estimado como el contenido de agua a -1500kPa; CAA: capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

de bosques de galería y áreas de bosque perenne en las tierras más altas.

Ambas unidades geológicas presentan áreas susceptibles a deslizamientos de tierra. Pineda *et al.* (2011a) determinaron un índice de densidad de cicatrices de deslizamiento, a partir del cual generaron un mapa de susceptibilidad relativa a la erosión en masa, presumiendo que aquellas unidades que presentan mayor densidad de cicatrices son más susceptibles. Este mapa dividió el área estudiada en las siguientes clases de susceptibilidad: baja (0-0,25), moderada (0,25-0,5), alta (0,5-0,75) y muy alta (0,75-1), en función de los intervalos de susceptibilidad propuestos por Tangestani (2003).

En el área los suelos en su mayoría son entisoles, inceptisoles y alfisoles, con régimen de humedad ústico. Algunos son muy pedregosos ó excesivamente pedregosos en superficie. En general, son suelos bien drenados, de permeabilidad y drenabilidad media

(Pineda *et al.*, 2011a). En el área de estudio se realizó una caracterización de suelos tomando en cuenta las dos principales fuentes de variación. La primera fuente de variación consideró las dos unidades geológicas presentes en el área (VCnc y VCca) y la segunda tomó en cuenta las diferencias en susceptibilidad a deslizamientos. Los suelos de la unidad VCca tienen mayor CIC y son más ricos en Mg, K y Na cambiables que los suelos de la unidad VCnc. Pero estos últimos retienen más agua (Pineda *et al.*, 2011b). Dieciséis perfiles de suelo fueron descritos y muestreados en cada segmento (un total de 62 perfiles, 32 por cada formación geológica, y 16 para cada nivel de susceptibilidad. En cada punto de muestreo se determinaron las propiedades del suelo indicadas en la Tabla II.

Colección de imágenes

Se seleccionaron siete imágenes LANDSAT TM y una

imagen SPOT 5 (Tabla III), las cuales fueron tomadas en los primeros tres meses del año, que corresponden al periodo seco, en el cual se presentan los valores más estables de NDVI (Krishnaswamy *et al.*, 2009). Se consideró que las diferencias en este periodo solo producen efectos menores, y que las propiedades del fondo de la imagen son constantes.

Pre-procesamiento de las imágenes

Las operaciones de pre-procesamiento fueron aplicadas a las bandas 4 (infrarojo cercano) y 3 (rojo) de las imágenes LANDSAT TM, e incluyeron la georeferenciación en el Datum SIRGAS_R E G V E N, Proyección UTM, Huso 19, y la corrección radiométrica. Para la georeferenciación se usaron entre 40-50 puntos

de control. La transformación geométrica se realizó con un polinomio de segundo grado y el método del vecino más cercano, obteniéndose un error cuadrático medio (RMS) <10m (Lunetta y Elvidge, 1998). Para la corrección radiométrica se utilizó el método de Chávez (1988), el cual consiste en la sustracción del valor mínimo del histograma en cada banda espectral. Posteriormente se calculó el índice de normalización topográfica (Minnaert y

TABLA III
INFORMACIÓN GENERAL DE LAS IMÁGENES ANALIZADAS

Imagen	AES	AS
LANDSAT 1986TM*	52,3	108,93
LANDSAT 2000ETM*	63,98	80,89
LANDSAT 2001TM*	57,45	110,91
LANDSAT 2002TM*	47,97	132,10
LANDSAT 2003TM*	54,73	116,75
LANDSAT 2005ETM*	47,16	134,73
LANDSAT 2006 ETM*	49,94	128,19
SPOT 5 2008	-	-

*LANDSAT fueron obtenidas a través del proyecto GeoCover de United States Geological Survey (USGS).

AES: ángulo de elevación solar, AS: azimuth solar.

Szeicz, 1961), para lo cual se usó el modelo no lambertiano con la constante de Minnaert.

Cálculo y relación entre la cobertura vegetal y los valores de NDVI

Una vez corregidas las imágenes, se determinó el índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) (Rouse *et al.*, 1973) para cada fecha, utilizando la ecuación

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{IR}) / (\rho_{NIR} + \rho_{IR})$$

donde NIR: reflectancia en la banda del infrarrojo cercano y R: reflectancia en la banda roja. Los valores de NDVI van desde -1 a 1, pero en la práctica oscilan entre 0,0-0,8 (Boone *et al.*, 2007); los valores ≤ 0 corresponden a cuerpos de agua o áreas sin vegetación, mientras que los valores $> 0,1$ representan a la vegetación (Maselli, 2004; Krishnaswamy *et al.*, 2009), razón por la cual se realizó una reclasificación del índice. Todos los valores entre -1 y 0 se clasificaron como 0 con la finalidad de mostrar solo los valores relacionados con la cobertura vegetal (NDVI $> 0,1$), tal como sugieren Boone *et al.* (2007). Los valores se reclasificaron y se establecieron clases que corresponden a los tipos de cobertura presentes en el área de estudio. La clase 1 (-1 a 0) corresponde a suelos desnudos, áreas quemadas y nubosidad (SD), la clase 2 (0,1 a 0,25) corresponde a herbazal arbustivo arbolado (HA), la clase 3 (0,25 a 0,5) corresponde a bosque ribereño (BR), la clase 4 (0,5 a 0,75) a bosque semidecídúo (BS) y la clase 5 (0,75 a 1) a bosque siempre verde (BV). Para determinar la posibilidad de usar los valores de NDVI como indicadores de cambios en límites o superficies de los tipos de cobertura vegetal existentes en el área de estudio, se realizó una comparación entre el mapa de cobertura vegetal realizado por Ochoa (2003) y el NDVI generado a partir de la imagen LANDSAT 3TM del año 2003. Para tal fin, se construyó una matriz de error comparando las clases de tipos de cobertura

vegetal con las clases de NDVI y se calculó el índice de concordancia Kappa (Cohen, 1968). Adicionalmente, en cada clase se determinó la exactitud del productor y del usuario, y el error de comisión y omisión por clase de cobertura vegetal.

Evaluación de los cambios en cobertura vegetal a través del NDVI

Para detectar los cambios ocurridos durante cada periodo de tiempo se restaron los valores de NDVI de las imágenes de periodos sucesivos (Krishnaswamy *et al.*, 2009), utilizando la ecuación

$$\Delta p = NDVI_E - NDVI_R$$

donde Δp : diferencia de NDVI para cada pixel entre las imágenes e y r , NDVI_E: NDVI de cada pixel de la imagen del año a evaluar, y NDVI_R: NDVI de cada pixel de la imagen del año de referencia. Posteriormente se determinaron los histogramas de las diferencias para cada periodo y se estimó la desviación estándar y la media de las diferencias. Con estos valores se realizó la normalización de cada uno de los mapas a través del uso de la ecuación

$$\Delta n = (\Delta p - Md) / s$$

donde Δn : diferencia normalizada, Md: media de las diferencias, y s : desviación estándar de las diferencias. Los mapas obtenidos de las diferencias normalizadas se reclasificaron en cinco clases, basadas en los límites de los intervalos según los valores $Md \pm s$ y la $Md \pm 2s$. Clase 1 o disminución significativa del NDVI ($< Md - 2s$), Clase 2 o disminución moderada del NDVI ($Md - 2s$ a $Md - s$), clase 3 o sin cambio aparente del NDVI ($Md - s$ a $Md + s$), Clase 4 o aumento moderado del NDVI ($Md + s$ a $Md + 2s$) y clase 5 o aumento significativo del NDVI ($> Md + 2s$). Estas clases reflejan las diferencias encontradas y el valor relativo del cambio (Ruiz-Gallardo *et al.*, 2003). Finalmente, el mapa de diferencias extremas (2008-1986)

se comparó con el mapa de cobertura vegetal existente, para determinar los tipos de coberturas más afectadas.

Relación entre cambios de cobertura vegetal y susceptibilidad a deslizamientos

Para establecer las relaciones entre los tipos de coberturas basadas en el NDVI y las áreas altamente y ligeramente susceptibles a los deslizamientos en cada formación, se seleccionaron dos sectores previamente calificados como alta- y ligeramente susceptibles (Pineda *et al.*, 2011a). En cada uno de estos sectores se determinó el valor medio de NDVI para cada fecha. Finalmente, se determinó la clase de cambio en cobertura vegetal, usando para ello la relación entre los mapas de clases de cambio de cobertura de cada fecha y la formación geológica.

Relación entre valores de NDVI y puntos con evidencias de cicatrices de deslizamiento

Con la finalidad de determinar el tipo de cobertura asociada a la ocurrencia de deslizamientos traslacionales (Carson y Kirkby, 1972; Zinck, 1996) se realizó la identificación de puntos con evidencias (cicatrices) de deslizamientos. Para la identificación se utilizó un ortofotomapa del año 1992 y una imagen de satélite SPOT 5 del año 2008. La identificación se realizó de forma visual, marcando puntos que identifican la cicatriz de deslizamiento y la masa de suelo fallada. La fotointerpretación fue validada en campo, constatando en el terreno parte (20%) de los puntos identificados en las imágenes. Posteriormente, en cada imagen se delimitó un área de influencia (buffer) de 50m alrededor de cada cicatriz, siguiendo la metodología de Dai y Lee (2002). El área delimitada incluyó tanto la cicatriz de deslizamiento como la masa fallada y se utilizó para seleccionar los puntos de no cicatriz en sectores fuera de la zona de influencia de la

cicatriz de deslizamiento. Con esto se generaron dos escenarios que corresponden a cada una de las fechas evaluadas. Los valores correspondientes al escenario del año 1992 se relacionaron con el NDVI de 1986 y los valores correspondientes al escenario del año 2008 se relacionaron con el NDVI de 2008. Posteriormente se realizó una prueba de medias no paramétrica de U Mann Whitney-Wilcoxon ($\alpha = 0,05$) para determinar si existen diferencias entre los valores de NDVI asociados a puntos con o sin cicatrices de deslizamientos en cada fecha, y entre los valores de NDVI en áreas con cicatrices y sin cicatrices de fechas distintas. En la formación VCnc se tomaron 160 puntos de cicatrices de deslizamientos y 139 puntos sin cicatrices de deslizamientos. En la formación VCca se tomaron 159 puntos de cicatrices de deslizamientos y 177 puntos sin cicatrices de deslizamientos.

Resultados y Discusión

Relación entre el mapa de cobertura vegetal y los valores del NDVI

La comparación entre el mapa de cobertura vegetal (Ochoa, 2003) y el NDVI dio como resultado un valor del índice de concordancia Kappa de 0,45 con un intervalo de confianza de 0,012 a 1,19. Este valor se puede calificar como moderado. Las clases 3 y 4 ('bosque ribereño' y 'bosque semidecídúo') presentaron los valores de exactitud del productor y usuario más bajos y el error de comisión más alto (Tabla IV). A pesar de estos resultados, el patrón de distribución de ambas clases muestra que las mismas pueden ser identificadas y delimitadas. En efecto, el bosque ribereño se distribuye a lo largo de los cursos de agua y, como consecuencia, su configuración es alargada y estrecha. En cambio, la distribución espacial del bosque semidecídúo no sigue la red de drenaje y su configuración es irregular. La clase 'suelos

TABLA IV
MATRIZ DE COMPARACIÓN ENTRE EL MAPA
DE TIPOS DE COBERTURA VEGETAL (CV)
Y LAS CLASES DE NDVI (CNDVI)

CV	CNDVI × 100000ha							
	HA	BR	BD	BV	EU	EO	M	FE
HA	480	12	1	1	86	14	78	380
BR	122	39	2	0	24	76	128	14
BD	6	20	37	4	54	46	31	5
BV	2	3	25	70	69	31	31	8
EP	79	52	56	94	-	-	-	-
EC	21	48	44	6	-	-	-	-

HA: herbazal arbustivo arbolado, BR: bosque ribereños, BD: bosque semidecídulo, BV: bosque siempre verde, EP: exactitud del productor; EU: exactitud del usuario; EC: error comisión; EO: error de omisión, M: marginales, FE: frecuencia esperada.

desnudos, áreas quemadas, nubosidad' presentó valores Kappa de cero, debido a que la misma no fue delimitada en el mapa de tipos de cobertura vegetal y se encuentra inmersa en las otras clases existentes. Esto afectó los valores del índice de concordancia, la exactitud del productor y el error de comisión. En síntesis, los resultados confirman que los valores de NDVI y su patrón de distribución pueden ser usados para evaluar la magnitud de los cambios ocurridos en la cobertura vegetal (Julien y Sobrino, 2009; Bakr *et al.*, 2010). No obstante, se debe tener presente que la resolución espacial (tamaño de pixel) puede afectar la clasificación de cobertura, sobre todo si presenta fragmentación (Koutsias y Karteris, 2003).

Evaluación de los cambios en cobertura vegetal

Las clases de cambios significativos en el NDVI, clases 1 y 5, presentaron los cambios de superficie más

evidentes (Tabla V). La superficie asociada a una disminución significativa del NDVI (Clase 1) se redujo desde el periodo 2001-1986 al 2008-2006, periodo a partir del cual la superficie ocupada por esta clase aumentó. Las áreas que presentaron un crecimiento significativo del NDVI mostraron una disminución desde el periodo 2001-1986 al 2003-2002. Sin embargo, esta clase tuvo un incremento para el periodo 2005-2003, con lo cual se consideró que parte del área fue recuperada; aunque posteriormente la superficie asociada a esta clase disminuyó drásticamente en los periodos 2006-2005 y 2008-2006. Los cambios entre las dos fechas extremas 1986 y 2008, utilizados para analizar el cambio global, mostraron que las clases 4 y 5 (relacionadas con áreas en recuperación), representan el 45% del área total, mientras que las clases 1 y 2 (relacionadas con áreas altamente afectadas), abarcan el 42% del área. Los periodos que presentaron mayor

TABLA V
SUPERFICIE POR CLASES ASOCIADAS A LOS CAMBIOS
EN COBERTURA VEGETAL, BASADOS EN EL NDVI

(*)	2000-1986	2001-2000	2002-2001	2003-2002	2005-2003	2006-2005	2008-2006	2008-1986
	Superficie (ha)							
1	5065	3882	3775	3845	3139	3067	4114	4290
2	804	835	860	854	237	1546	2137	798
3	1672	1810	1729	1793	752	5734	2584	1669
4	770	838	1675	3266	995	229	858	722
5	4013	4960	4282	2566	7199	1640	2360	4681

* Periodo extremo de evaluación de diferencias, Clase 1: disminución significativa del NDVI, Clase 2: disminución moderada del NDVI, Clase 3: sin cambio aparente en del NDVI, Clase 4: aumento moderado del NDVI, Clase 5: aumento significativo del NDVI.

TABLA VI
COMPARACIÓN ENTRE EL MAPA DE COBERTURA
VEGETAL REALIZADO POR OCHOA (2003) Y EL MAPA
DE CLASES ASOCIADAS A LOS CAMBIOS EN
COBERTURA VEGETAL, BASADOS EN EL NDVI,
PARA EL PERIODO 2008-1986

Clases	Porcentaje				
	1	2	3	4	5
HA	5,97	7,97	15,47	38,52	32,07
BR	5,27	5,90	12,38	35,85	40,59
BD	6,13	3,33	10,69	9,03	70,82
BV	7,73	3,64	12,30	16,07	60,27

HA: herbazal arbustivo arbolado, BR: bosque ribereños, BD: bosque semidecídulo, BV: bosque siempre verde. Clase 1: disminución significativa del NDVI; Clase 2: disminución moderada del NDVI; Clase 3: sin cambio aparente en del NDVI; Clase 4: aumento moderado del NDVI, Clase 5: aumento significativo del NDVI.

afectación en la cobertura vegetal corresponden al periodo 2008-2006 con un 58% y 2001-1986 con 48% y el periodo de menor afectación corresponde al 2005-2003 con 27% del área total. Estos resultados confirman la utilidad del NDVI como medio para evaluar los cambios en cobertura vegetal en el tiempo, lo cual coincide con los resultados de otros autores (Maselli, 2004; Freitas *et al.*, 2005; Giannico, 2007; Krishnaswamy *et al.*, 2009).

Al comparar el mapa de diferencias de NDVI 2008-1986 con el mapa de cobertura vegetal de Ochoa (2003) se encontró que las coberturas más relacionadas con la clase 5 (aumento significativo del NDVI) corresponden a bosque semidecídulo y bosque siempre verde y en menor proporción a bosque ribereño y herbazales arbustivos arbolados. Posiblemente este incremento se debe a áreas pastoreadas anteriormente, dejadas en barbecho por disminución de la productividad (Tabla VI).

Relación entre cambios de cobertura y susceptibilidad a los deslizamientos

Los valores medios de NDVI, calculados para las fechas consideradas en las áreas altamente y ligeramente susceptibles a deslizamientos en ambas unidades geológicas, muestran que el porcentaje de cobertura vegetal ha disminuido paulatinamente desde el año 2000 (Figura 1). Este comportamiento indica que toda el área estudiada ha estado sujeta a altos niveles de intervención durante el periodo considerado. En la unidad VCcn, tanto en las áreas alta como ligeramente susceptibles a los deslizamientos (Figuras 2a y 2b) se observó un incremento de la clase 1 (disminución significativa del NDVI). Esta tendencia se mantiene en los distintos periodos evaluados (Figura 2a y b), excepto para los periodos 2005-2003 y 2006-2005. La clase 2 (disminución moderada del NDVI) presentó un comportamiento similar pero en menor magnitud. En la unidad VCca también se detectó un incremento en la clase 1 (disminución significativa del NDVI) en ambos niveles de susceptibilidad (Figuras 2c y d). En este caso el comportamiento se mantiene hasta el 2002, periodo en el cual disminuye; incrementando nuevamente para el periodo 2006-2008. La clase 2 (disminución moderada del NDVI) presentó un comportamiento similar pero en menor

magnitud. En las áreas calificadas como ligeramente susceptibles a deslizamientos (Figura 2d), el balance muestra un incremento en la clase 3 (sin cambio aparente en NDVI). En esta unidad las áreas en recuperación son prácticamente nulas y muestran una tendencia a la disminución, excepto para los periodos 2002-2001 y 2005-2003. El balance general muestra que la cobertura vegetal ha disminuido en el 61% de la superficie en el área altamente susceptible, y en 50% de la superficie en las áreas ligeramente susceptibles. En contraposición, la superficie con recuperación de cobertura vegetal abarca solo 1% del área altamente susceptible y 17% de las áreas ligeramente susceptibles (Tabla VII).

En general, a pesar de que los valores de cobertura han disminuido progresivamente, tanto en las áreas ligeramente susceptibles como en las altamente susceptibles (Figuras 2a, b, c y d), los mayores cambios relacionados con la disminución del NDVI (Clases 1 y 2) se produjeron en la formación VCnc. Pineda *et al* (2011a) encontraron que el área ocupada por esta unidad geológica es más propensa a la ocurrencia de deslizamientos. Los resultados del presente estudio revelan que esta susceptibilidad a deslizamientos puede deberse a una mayor afectación de la cobertura vegetal además de la naturaleza del substrato geológico.

El balance general del área ligeramente susceptible, evaluado a lo largo del periodo 2008-1986 (Tabla VII) muestra el incremento que presentaron las clases 1 (disminución significativa del NDVI) y 2 (disminución moderada del NDVI), asociadas a mayor afectación, lo cual representó un 85% del área total. El resto del área permaneció prácticamente bajo condiciones similares de cobertura. En las áreas altamente susceptibles el área afectada por disminución de la cobertura vegetal ocupó el 90% del total. Sin embargo, en esta área se presentaron algunos sectores en recuperación (5%). Estos cambios

extremos son importantes, principalmente los asociados a la clase 1 (disminución significativa del NDVI), ya que pueden indicar cambios de uso de la tierra que modifican el paisaje. Los mismos pueden alterar la topografía (Glade, 2003), propiedades de suelo como la tasa de infiltración potencial y la conductividad hidráulica y con ello la estabilidad de las pendientes (Imaizumi *et al.*, 2008), y promover así la ocurrencia de los deslizamientos (Beguía, 2006).

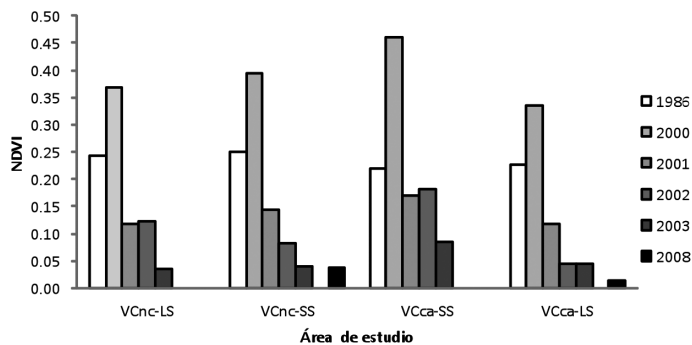


Figura 1. Valores de NDVI en distintos periodos de tiempo, en áreas altamente susceptibles (SS) o ligeramente susceptibles (LS) a los deslizamientos, en las unidades geológicas VCnc y VCca.

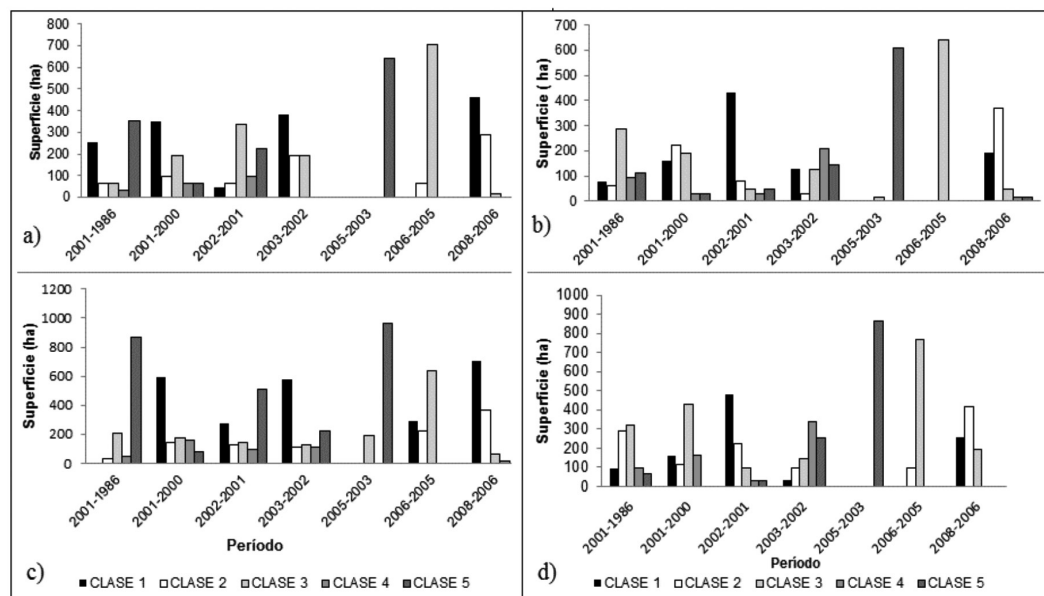


Figura 2. Clases de cambios en NDVI en áreas a) altamente susceptible y b) ligeramente susceptible a deslizamientos sobre la unidad VCnc, y c) altamente susceptible y d) ligeramente susceptible a deslizamientos sobre la unidad VCca.

TABLA VII
PORCENTAJE DE ÁREAS EN RECUPERACIÓN O DISMINUCIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL PARA EL PERIODO 2008-1986

Unidad geológica	Susceptibilidad a deslizamientos	Superficie (%)	
		A	B
VCnc	Ligera	0,00	85,42
	Alta	5,00	90,00
VCca	Ligera	16,67	50,00
	Alta	1,39	61,11

A: recuperación de la cobertura vegetal (clases 4 y 5).
B: disminución de la cobertura vegetal (clases 1 y 2).

Relación entre valores de NDVI y puntos de cicatrices de deslizamiento

Las Figuras 3a y b muestran diferencias manifiestas de valores de NDVI entre las áreas

afectadas y no afectadas por cicatrices de deslizamientos. Los puntos localizados sobre áreas con cicatrices presentan valores de NDVI que varían desde 0 hasta 0,3. Estos valores están asociados a

herbazales arbustivos y bosques ribereños. Los primeros están generalmente relacionados con áreas destinadas a pastoreo extensivo, mientras que los segundos se asocian a la red hidrográfica. En cambio, los puntos sin cicatrices presentan valores de NDVI más altos (0,3 a 0,8), asociados a bosques siempre verde y semidecídulos. Los resultados de la prueba de medias no paramétrica de Whitney-Wilcoxon, indican que existen diferencias significativas entre los valores de NDVI de las áreas con cicatrices (0,07 en 1992 y 0,20 en 2008) y sin cicatrices de deslizamiento (0,36 en 1992 y 0,37 en 2008). Esto demuestra que existe una

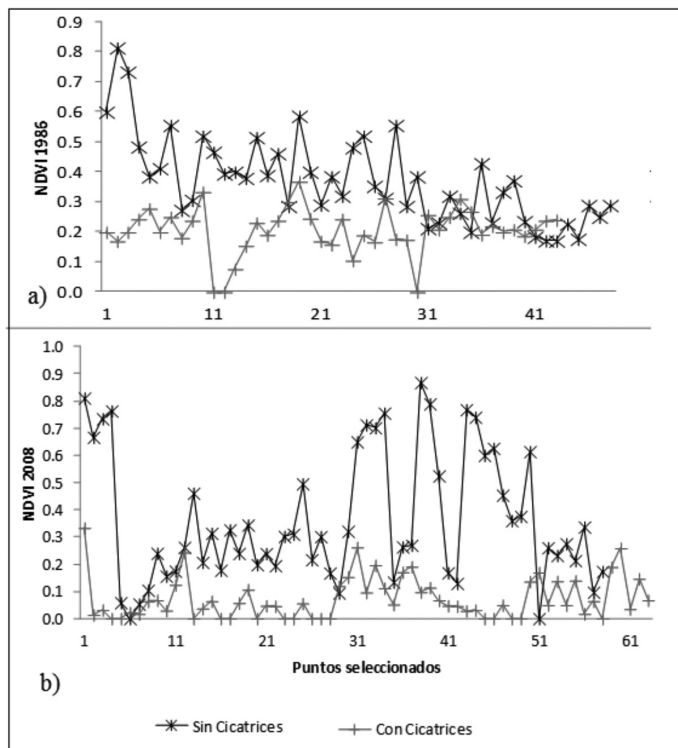


Figura 3. a) Valores de NDVI del año 1986 y b) Valores de NDVI del año 2008 relacionados con puntos con o sin cicatrices de deslizamientos.

relación clara entre los puntos con cicatrices de deslizamiento y una menor cobertura vegetal, estimada a partir de los valores de NDVI. Por consiguiente, se puede considerar que existen condiciones favorables provistas por la presencia de cobertura que reducen la ocurrencia de deslizamientos (Glade, 2003). No obstante, es importante reconocer que en las áreas con mayor cobertura (mayores valores de NDVI) es más difícil identificar las cicatrices de deslizamiento. Los valores de NDVI no mostraron diferencias significativas entre 1992 y 2008 en las áreas sin cicatrices de deslizamiento; pero sí fueron diferentes en las áreas con cicatrices. Los valores de NDVI de las áreas con cicatrices de deslizamiento en el año 2008 se asocian a coberturas de herbazal arbustivos; mientras que las condiciones encontradas en el año 1992 se asociaron a una fuerte deforestación. Este resultado concuerda con lo encontrado por Beguería (2006), quien establece que existe una relación negativa

entre áreas ocupadas por bosques y los deslizamientos superficiales.

Conclusiones

La clasificación de los valores de NDVI coincidió con los principales tipos de cobertura vegetal identificados en el área de estudio. Los valores medios de NDVI muestran que el porcentaje de cobertura vegetal ha disminuido paulatinamente desde el año 2000 lo cual indica que el área estudiada ha estado sujeta a una deforestación intensa durante el periodo considerado. La disminución de la cobertura vegetal ha sido mayor en la unidad VCnc que en VCca, tanto en las áreas altamente como ligeramente susceptibles a deslizamientos. Los tipos de cobertura más afectados corresponden a bosque siempre verde y herbazal arbustivo arbolado. Los resultados revelan que el comportamiento de la cobertura vegetal en el área y período estudiados ha sido dinámico, producto de dos procesos inversos pero relacionados. Primero, la

deforestación de áreas boscosas para incorporarlas al pastoreo. Segundo, el crecimiento de una vegetación secundaria en pastizales abandonados una vez que estos han perdido su productividad debido a sobrepastoreo y erosión. Los valores de NDVI fueron significativamente menores en puntos localizados sobre áreas con cicatrices de deslizamientos que en aquellos sin cicatrices.

Es importante señalar que aunque existe una relación entre los cambios de cobertura vegetal y la ocurrencia de deslizamientos, esta última es afectada también, directa o indirectamente, por otros factores. Por esta razón, los resultados obtenidos no permiten determinar si la mayor densidad de cicatrices de deslizamiento observadas en VCcn son producto de una mayor deforestación o si ocurre un efecto combinado de pérdida de cobertura vegetal, substrato geológico y relieve.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela (CDCH-UCV) y recursos procedentes de la Ley Orgánica de Ciencia y Tecnología (LOCTI). Los autores agradecen además el apoyo científico y técnico ofrecido por el ICTP (Trieste-Italia) y la Universidad de Lleida (Cataluña, España).

REFERENCIAS

Arismendi J, Salcedo R, Varela D (2000) Geomorfología actual y cobertura natural de la vertiente norte de la cordillera de la costa afectada por el evento hidrometeorológico de diciembre 99, a partir de la interpretación de imágenes de satélite. *Jornadas de Investigación del Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.*

Bakr N, Weindorf DC, Bahnassy MH, Marei SM, El-Badawi MM (2010). Monitoring land cover changes in a newly reclaimed area of Egypt using multi-temporal Landsat data. *Appl. Geogr.* 30: 1-14.

Beguería S (2006). Changes in land cover and shallow landslide activity: A case study in the Spanish Pyrenees. *Geomorphology* 74: 196-206

Boone RB, Lockett JM, Galvin KA, Ojima DS, Tucker CJ (2007) Links and broken chains: evidence of human-caused changes in land cover in remotely sensed images. *Environ. Sci. Polic.* 10: 135-149.

Booth AM, Roering JJ, Taylor Perron J. (2009) Automated landslide mapping using spectral analysis and high-resolution topographic data: Puget Sound lowlands, Washington, and Portland Hills, Oregon. *Geomorphology* 109: 132-147.

Carson MA, Kirkby MJ (1972) *Hillslope Form and Process*. Cambridge University Press. Cambridge, RU. 475 pp.

Chavez PS (1988) An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Rem. Sens. Environ.* 24: 459-479.

Cohen J (1968) Weighted kappa: nominal scales agreement with provision for scaled disagreement or partial credit. *Psychol. Bull.* 70: 213-220.

D'Amato Avanzi G, Giannacchini 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.

Dai FC, Lee CF. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* 42: 213-228.

Freitas SR, Mello MCS, Cruz CBM (2005) Relationships between forest structure and vegetation indices in Atlantic Rainforest. *Forest Ecol. Manag.* 218: 353-362.

Geymen A, Baz I (2008) The potential of remote sensing for monitoring land cover changes and effects on physical geography in the area of Kayisdagi Mountain and its surroundings (Istanbul). *Environ. Monit. Asses.* 140: 33-42.

Giannico C (2007) Remote sensing of vegetation in the calabrian region. *Acta Astronaut.* 60: 119-131.

Glade T (2003) Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand. *Catena* 51: 297-314.

Gómez H, Kavzoglu T (2005) Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural network in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Eng. Geol.* 78: 11-27.

- Gorsevski PV, Gessler PE, Boll J, Elliot WJ, Foltz RB (2006) Spatially and temporally distributed modeling of landslide susceptibility. *Geomorphology* 80: 178-198.
- Guzzetti F (2003) En Jansà A, Romero R (Eds.) *Proc. 4th Plinius Conference on Mediterranean Storms*. Universitat de Illes Balears. Mallorca, Spain, CD-ROM. ISBN 84-7632-792-7. 4 pp
- Imaizumi F, Sidle RC, Kamei R (2008) Effects of forest harvesting on the occurrence of landslides and debris flows in steep terrain of central Japan. *Forest Harv. Eff. Occur. Lands.* 33: 827-840.
- Julien Y, Sobrino JA (2009) The Yearly Land Cover Dynamics (YLCD) method: An analysis of global vegetation from NDVI and LST parameters. *Rem. Sens. Environ.* 113: 329-334.
- Koutsias N, Karteris M (2003) Classification analyses of vegetation for delineating forest fire fuel complexes in a Mediterranean test site using satellite remote sensing and GIS. *Int J. Rem. Sens.* 24: 3093-3104.
- Krishnaswamy J, Bawa K, Ganeshaiah KN, Kiran MC (2009) Quantifying and mapping biodiversity and ecosystem services: Utility of a multi-season NDVI based Mahalanobis distance surrogate. *Rem. Sens Environ.* 113: 857-867.
- Lunetta RS, Elvidge CD (Eds.) (1998) *Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Methods and Applications*. Ann Arbor Press. Ann Arbor, MI, EEUU. 318 pp.
- Maselli F (2004) Monitoring forest conditions in a protected Mediterranean coastal area by the analysis of multiyear NDVI data. *Rem. Sens. Environ.* 89: 423-433.
- Minnaert JL, Szeicz G (1961) The reciprocity principle in lunar photometry. *Astrophys. J.* 93: 403-410.
- Ochoa J (2003) *Análisis de la Cobertura y Uso de la Tierra a Escala Semi Detallada, a Partir del Procesamiento Visual de una Imagen de Satélite Landsat, en la Cuenca del Río Caramacate*. Instituto de Edafología. Universidad Central de Venezuela. Maracay. Venezuela. 127 pp.
- Pineda MC, Elizalde G, Viloria J (2011a) Determinación de áreas susceptibles a deslizamientos en un sector de la cordillera de la costa central de Venezuela. *Interciencia* 36: 370-377.
- Pineda MC, Elizalde G, Viloria J (2011b) Relación suelo-paisaje en un sector de la cuenca del río Caramacate, Aragua, Venezuela. *Rev. Fac. Agron.* 37: 27-37.
- Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW (1973) Monitoring Vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proc. 3rd ERTS Symposium*. pp. 48-62.
- Ruiz-Gallardo JR, Quintanilla A, Castaño S (2003) Teledetección y SIG en la gestión post incendio forestal. El caso de Almansa (Albacete). *X Cong. de Teledetección y Desarrollo Regional*. Cáceres, España. pp. 183-186.
- 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.