

Variación espacial del suelo y el paisaje en la cuenca alta del río Güey, estado Aragua, Venezuela

Jesús Viloria*, Yuolnalit Núñez, Gabriel Machado, Graciano Elizalde y María Pineda

Instituto de Edafología, Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela, Maracay 2101. Aragua, Venezuela.

RESUMEN

Muchas áreas montañosas en Venezuela carecen de información de suelos. La generación de esta información puede ser agilizada por medio de modelos suelo-paisaje, basados en sistemas de información geográfica. En este estudio se aplicó un modelo digital de elevación derivado de hojas cartográficas 1:25 000 para clasificar el paisaje. En un área muestra de aproximadamente 3 ha, se describieron 51 perfiles de suelos y se identificaron cuatro clases predominantes de suelos. Predominan suelos de granulometría francosa gruesa. El relieve está constituido por una secuencia recurrente de crestas, laderas, vallecitos de erosión y vallecitos de acumulación, con fuertes pendientes. En las crestas y vallecitos de erosión los suelos son superficiales (Lithic Ustorthents); en las laderas la profundidad del suelo es variable, con un patrón complejo de distribución espacial (Typic Haplustepts y Lithic Ustorthents); finalmente, en los valles de acumulación dominan suelos profundos de textura media o esquelética (Typic Haplustepts). Se encontró correlación entre la altitud y la profundidad del suelo ($r = 0,54$), pero la variabilidad espacial impuesta por la erosión limita la posibilidad de predecir esta propiedad por medio de modelos de regresión lineal. Las relaciones encontradas fueron incluidas en un modelo cualitativo de relaciones suelo-paisaje como guía para el mapeo de suelo en el área montañosa de la cuenca a escala 1:50 000. La presencia de suelos profundos en laderas altas, con pendientes mayores de 40% y escasa cobertura vegetal, constituye una amenaza de erosión por movimiento en masa.

Palabras clave: cuenca hidrográfica, modelo digital de elevación, clasificación de paisajes, geomorfología, agrupamientos borrosos, formación Las Brisas.

Spatial variation of soil and landscape at the upper watershed of the Güey river, Aragua state, Venezuela

ABSTRACT

Extensive mountain areas in Venezuela lack of soil information. The production of this information can be speeded up by means of soil-landscape models, based upon geographical information systems. In this study the landscape was classified using a digital elevation model generated from cartographic sheets with scale 1:25 000. In a sample area of 3 ha approximately, 51 soil profiles were described and four predominant soil classes were identified. Soil texture is predominantly coarse-loamy. The soil surface consists of a recurrent sequence of ridges, hillsides and narrow valleys of either erosion or accumulation, with stepped slopes. Soil depth is shallow (Lithic Ustorthents) at the ridges and the erosion valleys, but it is variable with a complex pattern of spatial variation at the hillsides (Typic Haplustepts and Lithic Ustorthents). Finally, soils are deep and either loamy or skeletal (Typic Haplustepts) at the accumulation valleys. A moderated correlation was found between altitude and soil depth ($r = 0,54$), but the spatial variability imposed by the erosion process does not allow to predict this

*Autor de correspondencia: Jesús Viloria

E-mail: viloriaj@gmail.com

Recibido: junio 10, 2009

Aceptado: octubre 23, 2009

soil property by means of lineal regression. The observed soil-landscape relationships were included into a model of prediction of soils and landscape conditions as a guide for soil mapping at a scale of 1:50 000. The existence of deep soils at upper hillsides, with over 40% slope and scarce vegetation cover, constitute an erosion threat by mass movement.

Key words: small watershed, digital elevation model, landscape classification, geomorphology, fuzzy clustering, Las Brisas formation.

INTRODUCCIÓN

Muchas áreas montañosas confrontan graves problemas de degradación y carecen de información básica de suelos para apoyar la implantación de programas de gestión ambiental. En estas áreas la realización de levantamientos convencionales de suelos, además de ser lenta y costosa, se dificulta debido a la escasa accesibilidad del terreno. Sin embargo, la obtención de información de suelos puede ser agilizada por medio de sistemas de información geográfica para construir modelos que permitan predecir variaciones significativas de las propiedades del suelo a partir de información más fácilmente obtenible sobre otros atributos del paisaje (Park *et al.*, 2001; Jácome *et al.*, 2001; McBratney *et al.*, 2003; Scull *et al.*, 2003).

Los procesos que ocurren en las posiciones más altas del paisaje pueden tener influencia sobre las propiedades del suelo en las posiciones más bajas. En efecto, materiales y sustancias en solución o suspensión se mueven sobre el suelo y a través de él, a lo largo del paisaje (Hugget, 1975; Conacher y Dalrymple, 1977; Hall, 1983; Elizalde y Jaimes, 1989; Hewitt, 1993). Con base en estas relaciones topográficas se han propuesto muchos modelos para predecir las condiciones del suelo, a partir de la variación conocida de otros elementos del paisaje. Por ejemplo, la representación numérica de la superficie de la tierra por medio de modelos digitales de elevación (MDE) e imágenes de satélite, ha estimulado la formulación de modelos que suponen una variación continua de las condiciones del suelo (Odeh *et al.*, 1992; McBratney *et al.*, 2003; Scull *et al.*, 2003). Estos modelos presumen que en relieves relativamente estables, la principal causa de variación de suelos es la influencia de la forma del terreno sobre los procesos de movimiento y distribución del agua a través del paisaje (Hugget, 1975; Conacher y Dalrymple, 1977; Hall, 1983; Odeh *et al.*, 1992; Hewitt, 1993; Park *et al.*, 2001). Obviamente, esta afirmación requiere uniformidad de los otros factores formadores de suelo, lo cual no se cumple en áreas montañosas complejas como la cuenca alta del río Güey, dada su diversidad de relieve, clima, vegetación, geología y edad del paisaje. En casos como este, la clasificación del paisaje en unidades más homogéneas puede contribuir a crear un modelo discontinuo eficaz para predecir cómo es el suelo, a partir de los valores conocidos de las propiedades edáficas en cada clase de paisaje.

El río Güey suple la demanda de agua de la Universidad Central de Venezuela (núcleo Maracay), del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CENIAP) y de áreas residenciales vecinas. Aunque la cuenca alta es parte del parque nacional Henri Pittier y no es utilizada con fines agrícolas, es sometida a quemas anuales y a procesos fuertes de erosión. Durante la época de sequía, el déficit de agua afecta a la comunidad beneficiaria de la cuenca y, durante la época de lluvias, los desbordamientos del río afectan diversas infraestructuras y el tránsito de vehículos. Los suelos del área plana de la cuenca han sido estudiados por diversos autores, debido a su interés agrícola (Avilán, 1955; Pla, 1964; Arenas *et al.*, 1982; Marco, 1987; Márquez, 1989; Ostos, 1993; Henríquez, 1996; Tortosa, 1997; Viloria *et al.*, 1998). Sin embargo, poco se conoce sobre los suelos del área montañosa.

Este trabajo corresponde a la fase de investigación que debe preceder al mapeo sistemático en un estudio agrológico. En vista de esta variabilidad de los factores formadores de suelo, en este estudio se combinan modelos continuos y discontinuos de relaciones suelo-paisaje. Este enfoque se fundamenta en el planteamiento de autores como Ibáñez *et al.* (2005) y Park *et al.* (2001), quienes consideran que los modelos discretos y continuos de representación de la variación espacial del suelo son complementarios, en vez de opuestos.

El estudio tuvo como objetivo clasificar sistemáticamente el paisaje de la cuenca alta del río Güey para delimitar unidades relativamente homogéneas que contribuyan a predecir las propiedades del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

La cuenca del río Güey se localiza al norte del lago de Valencia, en el flanco sur de la rama litoral de la cordillera de la Costa, al norte del estado Aragua (Figura 1). Abarca aproximadamente una superficie de 1 922 ha, y forma parte del Parque Nacional Henri Pittier. El 67% de la cuenca corresponde a montañas escarpadas en las que afloran rocas metamórficas de las formaciones geológicas Las Brisas y Las Mercedes. La formación Las Brisas corresponde a una secuencia de esquistos cuarzo-feldespáticos-micáceos y gneises de edad jurásico-cretácico, mientras que la formación

Las Mercedes consiste en una secuencia de esquistos cuarzo moscovíticos-grafíticos-calcareos, con inclusiones de plagioclasas de edad Mesozoica (Urbani, 2002). En general, los suelos derivados de materiales de la formación Las Mercedes son más ricos en bases y materia orgánica y tienen una mayor capacidad de intercambio catiónico que los suelos derivados de materiales de la formación Las Brisas (Marco, 1987; Márquez, 1989).



Figura 1: Ubicación geográfica de la cuenca del río Güey. **Fuente:** Núñez (2007)

El clima es biestacional, con una época seca desde noviembre hasta abril y un período de lluvias de mayo a octubre. La temperatura media anual es 25°C, la precipitación media anual es 1 063 mm y la evaporación media anual es 1 080 mm (Servicio de Climatología Agrícola de la Facultad de Agronomía, UCV). La parte alta de la cuenca corresponde a la zona de vida Bosque Seco Premontano y la parte baja a Bosque Seco Tropical.

El sector correspondiente a la formación Las Brisas está cubierto por herbazales arbustivos, con predominio de gramíneas (*Hyparrhenia rufa* y *Trachypogon spp*) y chaparros (*Curatella americana*), y a lo largo de las quebradas se observan bosques de ribera. En el sector donde aflora la formación Las Mercedes es común la presencia de bosques semidecíduos en las laderas y herbazales en las crestas. En este sector es característica la presencia de las especies *Agave spp* y *Bursera simaruba* (indio desnudo).

Procesamiento de la información cartográfica

Se utilizaron los ortofotomapas y las cartas topográficas 6646INE y 6647IIE a escala 1:25 000 en formato digital del Instituto Geográfico Simón Bolívar. Se realizó la corrección geométrica de las cartas topográficas en la proyección Universal Transversal de Mercator (Huso 19), Datum REGVEN. Se construyó un mosaico de las cartas topográficas y se vectorizaron las curvas de nivel y puntos de control, así como la red hidrográfica en sentido del cauce

natural y el límite de la cuenca, con el software ArcGIS, versión 8.2 (Soeller y Gerrard, 2008).

Una vez realizada la revisión y ajuste de las capas vectoriales se procedió a la interpolación del modelo digital de elevación (MDE), ejecutado en el software ArcGIS, extensión ArcInfo Workstation, versión 8.2 (Soeller y Gerrard, 2008) a través del comando TOPOGRIDTOOL. A partir del MDE se derivaron los siguientes parámetros: elevación, gradiente, azimut, perfil de curvatura, plano de curvatura, área de captación e índice topográfico de humedad, en celdas de 8x8 m.

Clasificación del paisaje

Se realizó una clasificación del paisaje de la cuenca, con el apoyo de la información geológica y climatológica disponible, los ortofotomapas y algunos mapas derivados del MDE (altitud, clases y orientación de pendientes, sombras, perfil de curvatura, plano de curvatura, índice topográfico de humedad, hidrografía) y observaciones de campo. Para este propósito se aplicó el procedimiento propuesto por Elizalde (1983) hasta el nivel categórico 7 en toda la cuenca y hasta el nivel 8 en el área muestra. De acuerdo al procedimiento aplicado, el nivel 8 (forma del terreno) es el más detallado en el análisis de las relaciones suelo-paisaje, expresable cartográficamente a escalas mayores a 1:10 000. Para este nivel, sólo se contó en este estudio con mapas topográficos y ortofotomapas a escala 1: 25 000 y el MDE derivado de ellos, por lo cual las formas de terreno obtenidas son relativamente generales y no corresponden exactamente al nivel de detalle y precisión que debería tener esta categoría.

Muestreo y análisis de suelos

Se realizó un reconocimiento inicial de campo en los sectores oriental, central y occidental del área montañosa donde aflora la formación Las Brisas. En este reconocimiento se constató que el relieve está conformado por una sucesión recurrente de crestas, laderas y vallecitos. Posteriormente, se seleccionó un área muestra de aproximadamente 3 ha que incluyó dos secuencias sucesivas de las formas de terreno mencionadas. En esa área se realizó un muestreo de suelos en transectas, para cubrir toda la variabilidad observada de formas de terreno. Adicionalmente se describieron cinco perfiles de suelo en un vallecito de acumulación con cobertura de bosque, fuera del área muestra. Cada punto de muestreo fue localizado en campo con apoyo de un receptor GPS con precisión de 3 m. En cada punto de muestreo se describió el perfil del suelo y se tomó una muestra del horizonte superficial para determinar las propiedades indicadas en el Cuadro 1. Las determinaciones analíticas fueron realizadas en el Laboratorio General de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela.

Adicionalmente, se describieron perfiles de suelos adicionales fuera del área muestra para cubrir unidades de paisaje no representadas suficientemente en ella.

Análisis cuantitativo de los datos de suelos

El conjunto de datos analizado incluyó, además de las variables indicadas en el Cuadro 1, las variables morfológicas: espesor del horizonte superficial (hor A), profundidad del suelo (prof) y claridad (value) y pureza (croma) del color del horizonte superficial. Solamente se consideró el horizonte superficial del suelo porque algunos perfiles de suelo tenían sólo un horizonte. Se realizó un análisis estadístico descriptivo para examinar el comportamiento de las variables y para identificar valores atípicos. Se consideraron como atípicos los valores mayores o menores que las cercas externas de la distribución de los datos, de acuerdo al procedimiento propuesto por Tukey (1977). Para esto se calculó un paso (P) como 1,5 veces el rango intercuartil ($Q_3 - Q_1$). La cerca externa superior se determinó como $Q_3 + 2P$ y la inferior como $Q_1 - 2P$. Una

Cuadro 1. Propiedades del suelo determinadas en el laboratorio.

Propiedad del Suelo	Símbolo	Unidades	Método de Determinación
Arena		%	Método de Bouyoucos
Limo		%	
Arcilla		%	
Carbono orgánico	CO	%	Método de Walkley y Black
pH	pH		Método potenciométrico en suspensión suelo/agua 1:1.
Fósforo disponible	P	mg/kg	Extraído con la solución de Carolina del Norte y determinado colorimétricamente con el complejo Vanadato-Molibdato
Potasio disponible	K	mg/kg	Extraído con la solución de Carolina del Norte y determinados por espectrofotometría de absorción atómica
Calcio disponible	Ca	mg/kg	
Sodio disponible	Na	mg/kg	
Magnesio disponible	Mg	mg/kg	
Conductividad eléctrica	CE	(dS/m)	Medida con conductímetro en una suspensión suelo/agua 1:1.

Fuente: Machado (2006).

vez identificados y extraídos los valores atípicos, se realizó un análisis de correlación canónica (Webster y Oliver, 1990), seguido por un análisis de correlación simple no paramétrica, para establecer el grado de asociación entre los datos de suelo y algunos parámetros derivados del MDE.

Agrupamiento local de los perfiles de suelos

Los datos de los perfiles de suelo obtenidos en el área muestra fueron agrupados numéricamente, por medio del algoritmo K-medias borroso con el programa FuzME 3.5b (Minasny y McBratney, 2002). Se determinaron los valores óptimos de exponente borroso y número de clases por medio del procedimiento aplicado por Odeh *et al.* (1992) y Morales y Viloria (2006).

Modelo de relaciones suelo-paisaje

Se elaboró un mapa detallado de suelos del área muestra, a escala 1:1 200, con base en la clasificación del paisaje en unidades pedogeomorfológicas (nivel categórico 8) y la clasificación de los perfiles de suelos. En cada unidad pedogeomorfológica se analizaron las relaciones entre el suelo y el paisaje, mediante la aplicación de criterios propuestos por Elizalde y Jaimes (1989). Posteriormente se utilizaron los tipos de paisaje (nivel 6 de la clasificación del paisaje), para proponer una leyenda de un mapa de suelos a escala 1:50 000, del sector de la cuenca alta del río Güey donde aflora la formación Las Brisas. Esta leyenda deberá ser validada en estudios posteriores por medio de un muestreo de suelos diseñado para tal fin.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Clasificación del paisaje

El Cuadro 2 muestra el resultado de la clasificación de los paisajes de la cuenca, hasta el nivel 5 de abstracción. Los primeros cuatro niveles delimitan el ámbito geográfico del área de estudio, pero no lo dividen en unidades menores porque el tamaño de la cuenca es pequeño, con relación a la escala de expresión cartográfica de estos niveles. En el quinto nivel categórico, la cuenca fue dividida en tres unidades litogeomorfológicas. Estas son: el área correspondiente a la formación Las Brisas (unidad OCLRB), la cual abarca 87% del área montañosa (1 109 ha), el área donde aflora la formación Las Mercedes (unidad OCLRM) que cubre 13% restante del área montañosa (168 ha) y el área plana cubierta por sedimentos aluviales (unidad OCLRA) con una superficie de 635 ha.

En el nivel categórico 6 se identificaron ocho tipos de paisaje diferentes, cuyas características fundamentales se resumen en el Cuadro 3. Las tres primeras unidades

Cuadro 2. Unidades de paisaje identificadas en la leyenda descriptiva del mapa geomorfológico de la cuenca del río Güey hasta el nivel 5 de clasificación.

Nivel	Categoría	Simbología	Descripción
1	Megarregión Fisiográfica	O	Zona orogénica
2	Región Fisiográfica	OC	Cordillera de la Costa Central
3	Provincia Fisiográfica	OCL	Serranía del Litoral Central
4	Subprovincia Fisiográfica	OCLR OCLRM	Serranía de Rancho Grande
5	Unidad Litogeomorfológica	OCLRB	Formación Las Mercedes
		OCLRA	Formación Las Brisas Sedimentos aluviales del río Güey

Fuente: Núñez (2007)

pertenecen a tipos de paisaje de montaña, en la unidad litogeomorfológica Las Brisas, con condiciones bioclimáticas de bosque seco premontano, pero con variaciones entre ellas en altitud y grado de pendiente. La cuarta y quinta unidad corresponden al piedemonte y a los vallecitos coluvio-

Cuadro 3. Resumen de los tipos de paisaje desarrollados en la cuenca del río Güey.

Símbolo	Configuración	Pendiente Dominante (%)	Altitud (msnm)		Zona de Vida ¹	Superficie (ha)
			Media	Amplitud		
OCLRBF	Montaña	20-45	1240	1000 - 1480	BSP	192,0
OCLRBG	Montaña	>60	1130	960 - 1300	BSP	224,0
OCLRBC	Montaña	>20	740	480 - 1000	BSP	598,0
OCLRBP	Piedemonte	8-20	470	440 - 500	BST	27,5
OCLR BV	Vallecitos c-a ²	20-45	820	480-1160	BSP	67,5
OCLRMM	Montaña	>60	590	470 - 720	BST	151,0
OCLRMP	Piedemonte	8-20	450	440 - 460	BST	17,0
OCLR AV	Valle aluvial	0-3	450	440 - 460	BST	635,0

¹BSP: bosque seco premontano, BST: bosque seco tropical

²Vallecitos coluvio-aluviales. Fuente: Núñez (2007)

aluviales, respectivamente, en la unidad litogeomorfológica Las Brisas. La sexta y la séptima unidad delimitan los tipos de paisaje de montaña y piedemonte en la unidad litogeomorfológica Las Mercedes, mientras que la octava unidad delimita el tipo de paisaje de valle, relleno por sedimentos aluviales, en el área plana de la cuenca.

En el nivel 7 (Figura 2) la cuenca fue dividida en 46 diferentes tipos de relieve, representables cartográficamente

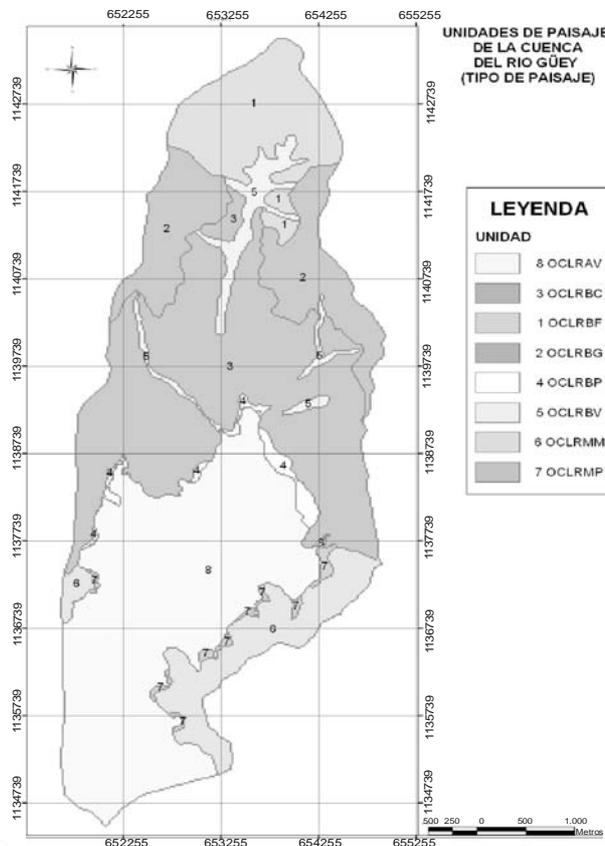


Figura 2. Tipos de paisaje de la cuenca del río Güey (Nivel de abstracción 6 de la clasificación del paisaje). Fuente: Núñez (2007)

a escala 1:10 000 (Núñez, 2007). En este nivel se sumaron nuevas diferencias en configuración del relieve, altitud, patrón de drenaje, gradiente y orientación de la pendiente, a los rasgos distintivos entre estas unidades, heredados de los niveles categóricos superiores.

El área muestra es representativa de las laderas bajas, con alturas comprendidas entre 480 y 660 msnm y del piedemonte adyacente, ambos cubiertos por herbazales gramíneos escasamente arbolados. Ella se encuentra en los paisajes OCLRBC y OCLRBP e incluye tres tipos de relieve: OCLRBCS, OCLRBPB y OCLRBPB. El primero corresponde a laderas de montaña con orientación predominante oeste-suroeste y pendientes fuertes, mientras que el segundo y el tercero corresponden a planos inclinados con pendientes moderadas, orientadas al sur-sureste y oeste-suroeste, respectivamente, en paisaje de piedemonte.

En el área muestra y sus adyacencias se identificaron cuatro formas de terreno principales, distribuidas en un patrón repetitivo: crestas (OCLRBCSC) en una posición relativa dominante, laderas (OCLRBCSL) en una posición de transición y vallecitos de erosión (OCLRBPV) y de acumulación (OCLRBPBV) dominados por las crestas y laderas (Figura 3).

Correlación entre variables de suelo y parámetros del MDE

El análisis exploratorio de los datos indica que existe alta heterogeneidad en las propiedades de suelo, la mayoría de las cuales, con excepción del contenido de arena y el pH, presentaron un coeficiente de variación mayor a 30%. De acuerdo a la prueba de Shapiro y Wilks, solo las variables Ca, CE, CO, Mg, arena y pH se ajustaron a una distribución normal ($p > 0,2$).

Por otra parte, el análisis de correlación canónica entre las variables de suelo y atributos del relieve derivados del MDE reveló que el grado de asociación entre estos dos grupos de variables en toda el área muestra es baja y no significativamente diferente de cero. Sin embargo, al restringir el análisis solo a la posición de laderas, se encontró que la primera correlación canónica fue significativamente mayor que cero ($p < 0,01$) y explica 79% de la relación.

El Cuadro 4 muestra los valores del coeficiente de correlación entre variables del suelo y del relieve, con una probabilidad $< 0,05$ de ser igual a cero. Dado que no todas las variables se distribuyen normalmente, se utilizó la prueba no paramétrica de Spearman. Se observaron algunas correlaciones negativas (-0,40 a -0,56) y otras positivas (0,41 a 0,64), pero estas correlaciones cambian cuando se agrupan

Cuadro 4. Coeficientes de correlación de Spearman entre variables del suelo y del relieve, con una probabilidad $< 0,05$ de ser igual a cero.

	Altura	Pfilcurv	Plancurv	Orient	ITH
pH		-0,56			
P			0,42		
Ca	0,64			0,41	-0,40
Mg		-0,44			
Hor A	0,47				
Prof.	0,54				

Pfilcurv: perfil de curvatura, Plancurv: plano de curvatura, Orient: orientación, ITH: índice topográfico de humedad, Hor A: espesor del horizonte superficial, Prof: profundidad del suelo.

Fuente: Machado (2006).

las muestras según las formas del terreno; por ejemplo, la correlación entre la profundidad del suelo y la altura del terreno (Figura 4) muestra que casi todos los valles de erosión se encuentran relativamente a baja altura (media de 527 msnm) y tienen un espesor promedio de suelo de 7 cm, independiente de la variación de altura. En las laderas se distinguen dos grupos: unas que se encuentran a 540 msnm o menos con suelos poco profundos (23 cm en promedio), y las ubicadas por encima de 540 msnm con 79 cm de profundidad, en promedio. Esta tendencia al aumento de la profundidad del suelo con la altura del terreno es aparentemente contraria a la relación que normalmente se esperaría encontrar a lo largo de una ladera; esto es, suelos más profundos hacia la ladera inferior, debido al transporte de materiales desde la ladera superior. Sin embargo, las cicatrices de desprendimiento observadas en el terreno indican que estas vertientes han estado sometidas a intensos movimientos en masa en épocas recientes. Como las superficies ubicadas por encima de las cicatrices de desprendimiento no han sido afectadas por los deslizamientos, han formado rellanos con suelos más profundos. Por el contrario, los suelos ubicados más abajo se han formado sobre los materiales que han aflorado por efecto de los deslizamientos y, como consecuencia, el substrato de roca se encuentra más cerca de la superficie.

Las relaciones encontradas son útiles para entender la génesis del paisaje y el patrón espacial de distribución de la profundidad del suelo a lo largo de las laderas. Sin embargo, un modelo que prediga la profundidad del suelo a partir de la altitud del terreno por medio de una ecuación de regresión no podría ser extrapolado al resto de la cuenca, porque las cicatrices de desprendimiento no ocurren siempre a la misma altura sobre el nivel del mar.

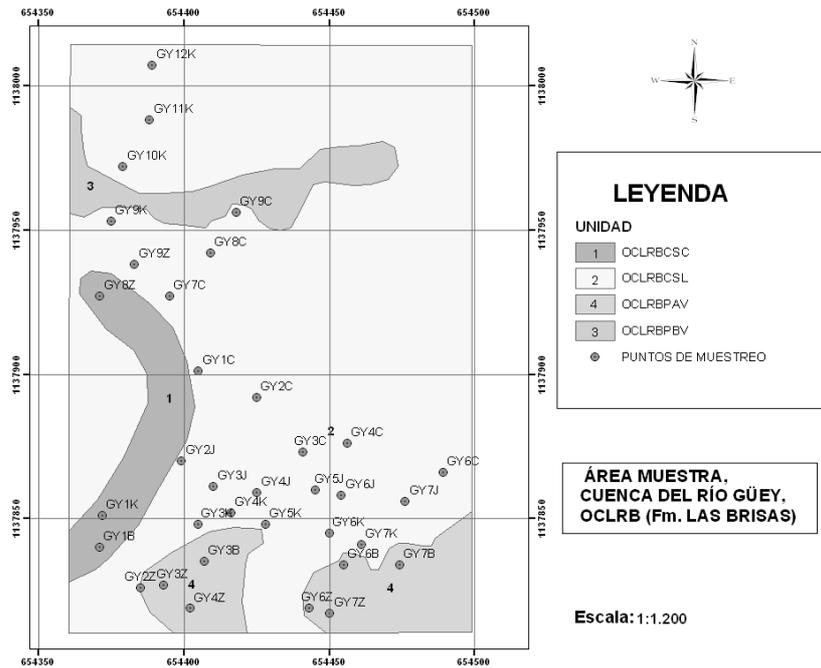


Figura 3. Formas de terreno del área muestra de la cuenca del río Güey (Nivel de abstracción 8 de la clasificación del paisaje). **Fuente:** Núñez (2007).

Clasificación y cartografía de suelos en el área muestra

Los perfiles de suelo descritos en el área muestra fueron agrupados en cinco conjuntos diferentes, por medio del algoritmo k-medias borroso con un coeficiente de borrosidad (ϕ) de 1,4 (Cuadro 5). La clase A agrupa a los suelos más superficiales. Las clases B y C difieren entre sí con relación a la fertilidad química del suelo, pero son muy similares en profundidad del suelo. Dado el carácter determinante de este atributo para la interpretación de la respuesta del suelo al uso y manejo, se decidió reagrupar estas clases en una sola. De igual manera, se reagruparon las clases D y E por su similitud en profundidad del suelo.

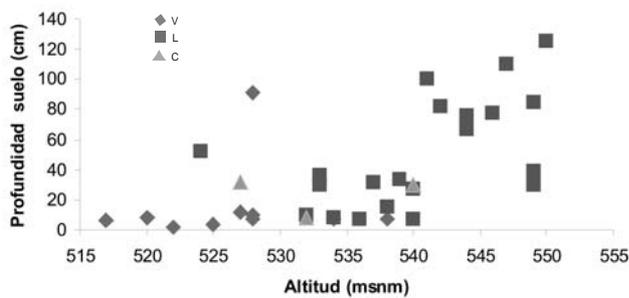


Figura 4. Relación entre la altitud de los sitios de muestreo (msnm) y la profundidad del suelo (cm). V: vallecitos de erosión, L: laderas y C: crestas.

Por otra parte, tomando en cuenta la descripción de los perfiles que se encuentran fuera del área muestra, se agregó una clase adicional correspondiente a los suelos esqueléticos. De esta manera, los suelos del área muestra fueron agrupados finalmente en cuatro clases, como se describe en el Cuadro 6. Cada una de estas clases fue correlacionada con una familia de la Taxonomía de Suelos (USDA, 2006). Se aprecia claramente que las diferencias principales entre estas clases están relacionadas fundamentalmente con la profundidad y la granulometría del suelo, pero también muestran diferencias apreciables en contenido de materia orgánica, fósforo y Mg.

El Cuadro 7 resume las características de las unidades cartográficas del mapa de suelos del área muestreada. Cada unidad cartográfica tiene su propio grado de complejidad. Las laderas y vallecitos de acumulación corresponden a complejos de familias, en los cuales las clases de suelos se encuentran distribuidas en un patrón espacial tan intrincado que, aún a esta escala detallada de trabajo, no han podido ser individualizadas. Los vallecitos de erosión y las vigas constituyen consociaciones de familias, donde predominan los suelos poco desarrollados y muy superficiales.

Cada unidad cartográfica puede ser interpretada como un sistema pedogeomorfológico (Elizalde y Jaimes, 1989), cuyas propiedades son el resultado del balance entre tres tipos de procesos: transformaciones (alteración

Cuadro 5. Centroides de las clases resultantes del agrupamiento de perfiles de suelos en el área muestra por medio del algoritmo Fuzzy-k-medias

Clase	Prof. (cm)	Hor A (cm)	Color (value)	Color croma	Arcilla (%)	Arena (%)	pH	MO (%)	P (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)
A	17	10	3	2	8	54	6	6	75	1780	480
B	25	6	2	1	5	74	5	4	13	798	167
C	23	10	3	3	5	69	6	5	51	1655	339
D	60	18	3	3	10	59	6	4	15	1735	394
E	73	11	4	3	11	51	6	4	22	1223	345

Prof: profundidad del suelo, Hor A: espesor del horizonte superficial, MO: materia orgánica del suelo, P: Fósforo disponible, Ca: Calcio disponible, Mg: Magnesio disponible

y pedogénesis), ganancias (sedimentación) y pérdidas (denudación). La intensidad de estos procesos es afectada, a su vez, por el movimiento del agua a través del sistema, el cual puede ser vertical (Mv) o lateral (Mh) (Elizalde y Jaimes, 1989; Rivas *et al.*, 2005).

Así, en la unidad correspondiente a las crestas, el movimiento lateral del agua es mucho mayor que el movimiento vertical (Mh >> Mv), las pérdidas son mucho

mayores que las transformaciones y éstas a su vez son mayores que las ganancias (P >> T > G). Como consecuencia, la escorrentía es alta, la erosión es severa y los suelos son excesivamente drenados, muy delgados, alternados con afloramientos de la roca *in situ*.

En las laderas el movimiento lateral del agua también es mucho mayor al movimiento vertical (Mh >> Mv) y las pérdidas son mayores a las

Cuadro 6. Descripción y frecuencia de las clases de suelo identificadas en el área muestra

Clase de suelos	Propiedades
Suelos superficiales Lithic Ustorthents, francosa gruesa, 41%	Su profundidad a la roca consolidada varía entre 2 y 24 cm y en 50% de los perfiles varía entre 7 y 15 cm. Presentan un horizonte A (epipedón Ócrico) muy delgado, con alto contenido de materia orgánica, con el más alto contenido de P y Mg en la zona, franco-arenoso con abundante grava, marrón amarillento (10YR 5/4) en seco y marrón grisáceo muy oscuro en húmedo (10YR 3/2), de estructura blocosa subangular, fina, débil.
Suelos moderadamente superficiales Lithic Haplustepts, francosa gruesa, 20%	Su profundidad a la roca consolidada varía entre 25 y 49 cm y en 50% de los perfiles varía entre 25 y 33 cm. El horizonte A (epipedón Ócrico) es muy delgado, contenido de materia orgánica mediano, bajo contenido de Mg, franco arenoso con abundantes fragmentos de grava, marrón amarillento oscuro (10YR 4/4) en seco y marrón muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo, de estructura blocosa subangular, media, moderada y consistencia ligeramente dura (seco) y muy friable (húmedo). El horizonte B (Cámbico) es franco arenoso con abundantes fragmentos de grava, marrón amarillento (10YR 5/6) en seco y marrón oscuro (10YR 3/3) en húmedo, de estructura blocosa subangular, media, moderada y consistencia ligeramente dura y muy friable.
Suelos Profundos Typic Haplustepts, francosa gruesa, 30%	Su profundidad a la roca consolidada es > 50 cm y en 50% de los perfiles varía entre 70 y 100 cm. El horizonte A (epipedón Ócrico) es delgado, pero es el más grueso de los que se presentan en el área, su contenido de materia orgánica y fósforo son bajos, franco arenoso con abundantes fragmentos de grava, marrón amarillento (10YR 5/4) en seco y marrón oscuro (10YR 3/3) en húmedo, de estructura blocosa subangular, media, moderada y consistencia ligeramente dura y muy friable. El horizonte B (Cámbico) es franco arenoso con abundantes fragmentos de grava, marrón amarillento (10YR 5/6) en seco y marrón oscuro (10YR 3/3) en húmedo, de estructura blocosa subangular, fina, débil y consistencia ligeramente dura (seco), friable (húmedo) y moderadamente plástica. El horizonte C es de color oliva (5Y 5/3) en seco y gris oscuro (5Y 4/1) en húmedo.
Suelos esqueléticos Typic Haplustepts, esquelética francosa, 4%	El horizonte A (epipedón Ócrico) es delgado, franco con muy abundantes fragmentos de bloques y grava, marrón amarillento (10YR 5/4) en seco y marrón oscuro (10YR 3/3) en húmedo de estructura blocosa subangular, media, moderada y consistencia ligeramente dura en seco y muy friable. El horizonte B (Cámbico) es moderadamente delgado, franco arenoso con abundantes fragmentos de grava, de color marrón fuerte (7,5YR 5/8) en seco y marrón fuerte (7,5YR 4/6) en húmedo, de estructura blocosa subangular, fina, débil y consistencia ligeramente dura, friable y moderadamente plástica. El horizonte C presenta una proporción muy abundante (>35% por volumen) de fragmentos gruesos (gravas, guijarros y piedras) englobados en una matriz de tierra fina de textura media a gruesa.

Cuadro 7. Unidades cartográficas del mapa de suelos del área muestra

Unidad Cartográfica	Composición		Características Generales
	Familia de suelos	%	
Crestas OCLRBCSC 1 885 m ²	Lithic Ustorthents francosa gruesa	55	Posición relativa alta, que domina a las laderas y vallecitos entre laderas. Forma de topografía convexa, altura máxima > 550 m, pendiente > 50% en sentido longitudinal, pero relativamente plana en sentido transversal. Vegetación escasa. Inclusiones de Lithic Haplustepts francosa gruesa (20%), afloramiento rocoso (15%) y Litic Haplustepts francosa gruesa (10%).
Laderas OCLRBCSL22 148 m ²	Typic Haplustepts francosa gruesa	55	Posición relativa de transición, dominada por la cresta y dominando a los vallecitos entre laderas. Forma de topografía convexo-lineal. Altura máxima > 540 m y pendiente > 60%. Vegetación escasa limitada a chaparros y gramíneas (<i>Hypparrena rufa</i> , predominantemente y <i>Trachypogon spp.</i> , donde aparecen afloramientos de cuarzo). Inclusiones de Lithic Haplustepts francosa gruesa (15%)
	Lithic Ustorthents francosa gruesa	30	
Vallecitos de erosión OCLRBPV 2 724 m ²	Lithic Ustorthents francosa gruesa	80	Posición relativa baja, dominada por las crestas y las laderas. Forma de topografía lineal-cóncava, altura máxima > 480 m, pendiente > 40%. Vegetación escasa limitada a chaparros y gramíneas. Inclusiones de Typic Haplustepts francosa gruesa (20%).
Vallecitos de acumulación OCLRBPBV 1 503 m ²	Typic Haplustepts francosa gruesa	60	Posición relativa baja, dominada por las crestas y las laderas. Forma de topografía lineal-cóncava, altura máxima > 480 m, pendiente > 40%. Vegetación abundante y concentrada, en forma de bosquitos ribereños. Localmente, pueden estar cubiertos por herbazales.
	Typic Haplustepts esquelética francosa	40	

Fuente: Núñez (2007).

transformaciones y éstas a su vez son mayores o iguales a las ganancias ($P > T \geq G$). Comparada con la posición anterior, en las laderas las pérdidas son parcialmente compensadas por los materiales acarreados desde las partes altas. En esta unidad predominan los suelos superficiales o moderadamente superficiales, como consecuencia de los procesos de denudación. Sin embargo, persisten relictos de superficies más altas, menos erosionadas, en forma de rellanos, donde los suelos son relativamente profundos. Cabe destacar que en las laderas se observaron terracetas de soliflucción, pero no se encontraron diferencias en las propiedades del suelo entre el plano y el talud de cada terraceta.

En los vallecitos de erosión el movimiento lateral de agua es mayor que el vertical ($M_h > M_v$) y las transformaciones son similares a las ganancias y mucho menores que las pérdidas ($P > G = T$). La escorrentía es alta, sin inundación ni encharcamiento. Los suelos son delgados y no proveen un sustrato adecuado para el desarrollo de una vegetación boscosa. La ausencia de una cobertura vegetal protectora y la tendencia a la concentración del flujo de agua en estas depresiones contribuyen a la intensificación de los procesos de erosión, que conducen a la profundización de los cauces hasta alcanzar en parte el sustrato rocoso y el ascenso de la erosión regresiva, ocasionando derrumbes y otros tipos de erosión en masa en las cabeceras y márgenes del vallecito.

Finalmente, en los vallecitos de acumulación el movimiento vertical del agua es mayor o igual que el lateral ($M_v > M_h$). Las transformaciones son tan intensas como las ganancias y tienden a ser mayores que las pérdidas ($P < G = T$). La escorrentía es alta, sin inundación ni encharcamiento, pero constituyen canales naturales de drenaje. Estos vallecitos son receptores de agua y sedimentos provenientes de posiciones más altas en el paisaje. La granulometría de los sedimentos varía de acuerdo a las características del proceso de erosión y acumulación que les dio lugar. Como resultado, los suelos en general tienden a ser profundos (francos o esqueléticos) y con suficiente disponibilidad de agua, para permitir el desarrollo de una vegetación boscosa.

La Figura 5 ilustra gráficamente las relaciones entre el suelo y las formas de terreno en el área muestra.

Relaciones suelo-paisaje en la cuenca alta del río Güey

El Cuadro 8 muestra los resultados de generalizar las relaciones suelo-paisaje encontradas en el área muestra, para su extrapolación dentro del sector donde aflora la formación Las Brisas, en la cuenca alta del río Güey, a escala 1: 50 000 y nivel 6 de abstracción.

El tipo de paisaje más extenso corresponde a montañas que varían entre sí en altitud, pendiente dominante

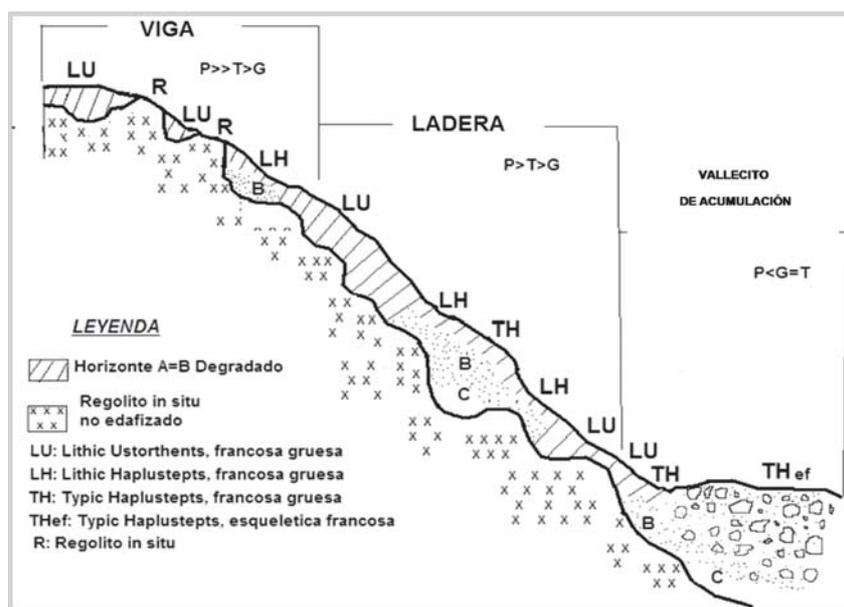


Figura 5. Perfil esquemático de clases de suelos y unidades de paisaje identificadas en el área muestra de la cuenca alta del río Güey. Fuente: Núñez (2007).

y condiciones bioclimáticas. Las formas dominantes revelan la acción combinada de diversos procesos de erosión. Así, los procesos de deslizamiento han dado lugar a una secuencia de hondonadas alargadas en sentido de la pendiente (vallecitos de erosión), alternadas con interfluvios (crestas y laderas), formando un patrón de drenaje paralelo. Estas formas se combinan con terracetas que revelan la ocurrencia de procesos de soliflución. La erosión tiende a rejuvenecer los suelos, los cuales, por lo general, son superficiales o moderadamente superficiales, pero existen rellanos donde los suelos son más profundos. En resumen,

los suelos en este tipo de paisaje se han desarrollado sobre los mantos de alteración *in situ* y su variación espacial es producto de diferencias en el tipo e intensidad de los procesos de erosión.

Los vallecitos coluvio-aluviales son depresiones alargadas y estrechas, con pendientes predominantes entre 20-45%, que actúan como canales naturales de drenaje. Los suelos del fondo de los vallecitos se han formado a partir de sedimentos arrastrados de las laderas, los cuales, aunque tienen un contenido abundante de esqueleto grueso (grava, guijarros y piedras) retienen suficiente humedad y

Cuadro 8. Síntesis de modelo de relaciones suelo-paisaje en la Formación Las Brisas

Tipo de paisaje	Relieve	Vegetación	Material parental	Balance pedo-geomorfológico	Suelos predominantes
Montaña OCLRBC OCLRBF OCLRBG	Laderas con pendientes >20% 20-45% >60%	Herbazales con chaparros	Predominantemente residual	$P \gg G < T$	Superficiales (Lithic Ustorthents, Lithic Haplustepts) con inclusiones de suelos profundos (Typic Haplustepts) en rellanos
Piedemonte OCLRBP	Plano inclinado con pendientes 8-20%	Herbazal, Bosque Semideciduo, y áreas cultivadas	Coluvio-aluvial	$P < G < T$	Suelos esqueléticos y suelos profundos (Typic Haplustepts)
Vallecitos coluvio-aluviales OCRLBV	Planos inclinados de vallecitos con pendientes 20-45%	Bosques ribereños	Coluvio-aluvial	$P \ll G > T$	Suelos esqueléticos y suelos profundos (Typic Haplustepts)

Fuente: Núñez (2007).

nutrientes para permitir la formación de bosques ribereños. Estos a su vez le proporcionan materia orgánica al suelo y lo protegen de la erosión. Estos ambientes juegan un papel muy importante en la regulación de los flujos de agua y en la preservación de la biodiversidad en la cuenca.

El piedemonte está constituido por planos inclinados con 8-20% de pendiente, formados por sedimentos depositados al pie de las vertientes en forma de abanicos. Los sedimentos son mayormente recientes (Q0-Q1), de texturas medias (Fa, F, FA, FAL), mezclados con proporciones variables de fragmentos gruesos. Es común encontrar un estrato de granzón, en el cual los fragmentos gruesos ocupan más de 35% del volumen del suelo. De acuerdo a la proporción relativa de fragmentos gruesos en el perfil, los suelos serán esqueléticos o profundos.

CONCLUSIONES

El análisis de las relaciones entre parámetros de relieve y propiedades del suelo, realizado en el área muestra, reveló que la configuración predominante del relieve es una secuencia recurrente de crestas, laderas, vallecitos de erosión y vallecitos de acumulación, con fuertes pendientes. En las crestas y vallecitos de erosión predominan suelos superficiales, en las laderas ocurren suelos superficiales, moderadamente profundos y profundos distribuidos en un patrón complejo, mientras que en los valles de acumulación dominan suelos profundos y esqueléticos. Esta variación espacial del suelo y el paisaje es producto de las superposiciones de distintos tipos y grados de erosión hídrica y por gravedad, favorecidas por las altas pendientes, estacionalidad de las lluvias y escasa cobertura vegetal.

La configuración predominante del relieve en la cuenca alta es similar a la del área muestra, por lo cual es de esperar que en ambas ocurran los mismos procesos geodinámicos. Sobre la base de esta analogía, se utilizó la clasificación sistemática del paisaje para elaborar un modelo discontinuo de relaciones suelo-paisaje, como guía al mapeo de suelos en el área montañosa de la cuenca donde aflora la formación Las Brisas (cerca del 90 % de la cuenca alta).

Se debe destacar que el modelo predice que sólo 30% de la superficie del área tiene rellanos con suelos relativamente profundos, lo cual demuestra el alto grado de degradación que presenta ese sector de la Serranía del Litoral. Por otra parte, esos relictos de suelos profundos, en partes altas de las laderas con pendientes mayores de 40% y expuestos a los factores desencadenantes de la erosión, constituyen una amenaza de movimiento en masa, que debe ser tomada en cuenta en los planes de conservación de la cuenca.

AGRADECIMIENTO

Los autores desean expresar su agradecimiento por el apoyo financiero para la realización de esta investigación al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela (CDCH-UCV).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arenas, S.; A. Zinck; J. Uzcátegui. 1982. Depresión del lago de Valencia clasificación de tierras con fines de riego, Bloques de levantamiento N° 15, 16 y 26, Sector Maracay. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Dirección General Sectorial de Información e Investigación del Ambiente. Dirección de Suelos Vegetación y Fauna. Zona 2. Maracay, Venezuela.
- Avilán, J. 1955. Estudio agrológico detallado de los campos experimentales de los centros de investigaciones agronómicas. Ministerio de Agricultura y Cría, Dirección de Agricultura, Centro de Investigaciones Agronómicas, Sección de Suelos. Maracay, Venezuela.
- Conacher, A.J; J.B. Dalrymple. 1977. The nine unit model: an approach to pedogeomorphic research. *Geoderma* 18: 1-154.
- Elizalde, G. 1983. Ensayo de clasificación sistemática de categorías de paisaje. Primera Aproximación. Instituto de Edafología. Mimeografiado. Facultad de Agronomía, UCV. Maracay, Venezuela.
- Elizalde, G.; E. Jaimes. 1989. Propuesta de un modelo pedogeomorfológico. *Rev. Geog. Ven.* 30: 5-35.
- Hall, G.F. 1983. Pedology and geomorphology. *In*: L.P. Wilding, N.E. Smeck; G.F. Hall (Eds.), *Pedogenesis and Soil Taxonomy, I: Concepts and Interactions*, Elsevier, Amsterdam, pp. 117-140.
- Henríquez, M. 1996. Procedimiento complementario al levantamiento de suelos convencional a escalas detalladas. Trabajo grado. Postgrado en Ciencia del Suelo. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela.
- Hewitt, A. 1993. Predictive modeling in soil survey. *Soils* 56: 305-314.
- Hugget, R.J. 1975. Soil landscape systems: A model of soil genesis. *Geoderma* 13: 1-22.
- Ibáñez, J.J.; R. Ruiz; J.A. Zinck; A. Brú. 2005. Classical pedology questioned and defended. *Eurasian Soil Sci.* 38: 575-580.
- Jácome, A.; J.A. Viloria; G. Elizalde. 2001. Separabilidad de unidades pedo-geomorfológicas en un sector del sur del estado Aragua (Venezuela), por medio del análisis digital de imágenes de satélite y un modelo digital de terreno. *Agron. Trop.* 51: 49-63.
- Machado, G. 2006. Predicción de características del suelo a partir de un modelo digital de elevación (MDE) de la cuenca del río Güey. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela.

- Marco, F. 1987. Diferencias físicas, químicas y mineralógicas de suelos provenientes de fuentes geológicas distintas. Trabajo de grado Lic. Biología. Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- Márquez, O. 1989. Caracterización mineralógica y génesis de suelos de dos ambientes geoquímicos en la cuenca del río Güey. Trabajo de grado. Postgrado en Ciencia del Suelo. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela.
- McBratney, A.B.; Mendonga Santos, M.L.; Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117: 3-52.
- Minasny, B.; A.B. McBratney. 2002. FuzME version 3.5. Australian Centre for Precision Agriculture. The University of Sydney, Australia. Disponible en <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>. (Consulta: 6/05/2009)
- Morales, A.; J.A. Viloria. 2006. Aplicabilidad del enfoque de conjuntos borrosos a la clasificación de suelos de la depresión del Lago de Valencia. *Interciencia* 31: 598-604.
- Núñez, Y. 2007. Relación suelo-paisaje en un sector de la cuenca alta del río Güey, correspondiente a la formación geológica Las Brisas. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela.
- Odeh, I.O.A.; A.B. McBratney; D.J. Chittleborough. 1992. Fuzzy-c-means and kriging for mapping soil as a continuous system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1848-1854.
- Ostos, A. 1993. Diagnóstico de las propiedades del suelo que afectan el desarrollo de plantas de cítricas en el Lote E, sector Este del campo experimental de la Facultad de Agronomía, UCV, Maracay. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela.
- Park, S.J.; K. McSweeney; B. Lowery. 2001. Identification of the spatial distribution of soils using a process-based terrain characterization. *Geoderma* 103: 249-272.
- Pla, I. 1964. Estudio de las condiciones de drenaje y salinidad en los suelos de los Campos Experimentales de la Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Instituto de Edafología. Maracay, Venezuela.
- Rivas, S.; J. Oballos; G. Ochoa y J. Santiago. 2005. Ensayo metodológico de evaluación de tierras para la captación de agua en dos microcuencas del río Santo Domingo, Mérida, Venezuela. *Interciencia* 30: 347-355.
- Scull, P.; J. Franklin; O.A. Chadwick; D. McArthur. 2003. Predictive soil mapping: a review. *Prog. Phy. Geog.* 27: 171-197.
- Soeller, T.; K. Gerrard. 2008. Introduction to ArcGIS 8.2. Kay Collins Main Library. University of California, Irvine. EUA. Disponible en: http://www.nacs.uci.edu/rcs/gis/class_notes/Intro%20to%20ArcGIS%20Class%202.pdf (Consulta: 19-11-2009).
- USDA. 2006. Keys to Soil Taxonomy. Soil Survey Staff. 10^{ma} ed. Natural Resources Conservation Service U.S. Department of Agriculture. Washington, EUA.
- Tortosa, A. 1997. Variabilidad natural e inducida del suelo bajo diferentes sistemas de producción agrícola en un lote de terreno del campo experimental de la Facultad de Agronomía de la UCV, Maracay. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela.
- Tukey, J. 1977. *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley Pub. Reading, EUA.
- Urbani, F. 2002. Nomenclatura de las unidades de rocas ígneas y metamórficas de la Cordillera de la Costa, Venezuela. *Geos* 35 (versión en CD).
- Viloria, J.; C. Estrada; J.C. Rey. 1998. SISDELAV: Sistema de información de suelos de la depresión del lago de Valencia. *Venesuelos* 6:2-9.
- Webster, R.; M.A. Oliver. 1990. *Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey*. Oxford University Press. New York, EUA.