
HOMOGENEIDAD PEDOGEOMORFOLÓGICA Y PEDOGÉNESIS EN LA CUENCA DEL RÍO MOTATÁN, TRUJILLO, VENEZUELA

EDGAR J. JAIMES, JOSÉ G. MENDOZA, NEIDA M. PINEDA
e HILDA R. RODRÍGUEZ

El sistema pedogeomorfológico fue definido por Jaimes y Elizalde (1989) como un componente del sistema ecológico compuesto de los subsistemas suelo, regolito, sedimento, roca e hidrológico, en interrelación con su ambiente, formado por la atmósfera, la biosfera y otros sistemas pedogeomorfológicos vecinos. La interfase sólido-líquido-gas-biota que caracteriza al sistema pedogeomorfológico, a través del cual tiene lugar el intercambio de materia, energía e información dentro y entre ecosistemas, puede ser tan pequeña como la superficie de un pedón o polipedón (Dijkerman, 1974; Smeck *et al.*, 1983) o tan grande como la superficie de todo el planeta (Elizalde y Jaimes, 1989).

Dada la complejidad estructural, funcional y evolutiva del sistema pedogeomorfológico, Jaimes (1988) definió el Índice de Homogeneidad Múltiple (IHM) como un valor o cantidad que representa la homogeneidad de un sistema caracterizado por un conjunto de variables o características pedogeomorfológicas (mor-

fológicas, biológicas, químicas y físicas). Según Jaimes y Elizalde (1991a), tal valor permite establecer comparaciones con la finalidad de estudiar la estructura, el funcionamiento, la evolución, la estabilidad y la variabilidad espacial de dichos atributos dentro del sistema y de éste con relación a otros sistemas, incluyendo la totalidad del ambiente circundante.

Entre las aplicaciones del IHM están: a) la delimitación de áreas homogéneas para el cultivo de la uva (Gómez, 1990), b) la definición de unidades cartográficas de alta homogeneidad (Elizalde, 1997), c) la evaluación de la incidencia de las inclusiones de suelos y selección del mejor arreglo espacial de los puntos de observación utilizados para delinear unidades cartográficas a escalas muy detalladas (1:10000; Elizalde, 1995), y d) la definición de tipos de suelos en forma sencilla (Pineda, 1998).

Por su parte, Jaimes *et al.* (1992), Oballos *et al.* (1999), Oballos (1995), y Ochoa y Oballos (2002) utilizaron el IHM para analizar la pedogénesis en

diversas secuencias de suelos. Como técnica de análisis multivariado, Jaimes y Matherano (1996) aplicaron el IHM para evaluar la homogeneidad de dos áreas muestras ubicadas en la subcuenca del río Castán, en el estado Trujillo, Venezuela. También fue utilizado por Jaimes y Arellano (1998) como método de estudio para comprobar que existe una relación directa y consistente entre la producción de biomasa aérea seca y la homogeneidad edáfica, asociada con las características físicas y químicas del epipedón.

Para facilitar el procesamiento de la información, Jaimes *et al.* (1997) propusieron un Sistema de Información Automatizado de Homogeneidad de Tierras (SIAHT) que automatiza el Índice de Homogeneidad Múltiple (IHM) propuesto por Jaimes (1988), a partir del programa IH en lenguaje Turbo-Basic, creado por Daza y Elizalde (1988). Se generó así una herramienta de trabajo versátil para el estudio integrado de la tierra y una metodología de análisis global en términos de la homogeneidad múltiple del sistema.

PALABRAS CLAVE / Índice de Homogeneidad Múltiple (IHM) / Pedogeomorfología / Pedogénesis / Sistema Automatizado de Homogeneidad de Tierras (SIAHT) /

Recibido: 21/02/2004. Modificado: 13/01/2005. Aceptado: 20/01/2005.

Edgar José Jaimes. Ingeniero Agrónomo, La Universidad del Zulia (LUZ), Venezuela. Agrólogo, Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial, Universidad de Los Andes (CIDIAT-ULA), Venezuela. M.Sc. y Doctor en Ciencias del Suelo, Universidad Central de Venezuela (UCV). Profesor, Núcleo Universitario "Rafael Rangel" (NURR-ULA), Venezuela. Coordinador, Grupo de Investigación de Suelos y Aguas (GISA). Dirección: Apartado postal 177. Trujillo, estado Trujillo, Venezuela. e-mail: jaimes@ula.ve

José G. Mendoza. Ingeniero Agrícola, ULA, Venezuela. Agrólogo CIDIAT-ULA. M.Sc. en Manejo de Cuencas Hidrográficas, ULA, Venezuela. Profesor, NURR-ULA. Investigador, GISA, Venezuela. e-mail: jgmendoz@ula.ve

Neida M. Pineda. Ingeniera Agrícola, ULA, Venezuela. M.Sc. en Ciencia del Suelo, UCV, Venezuela. Profesora, NURR-ULA, Venezuela. Investigadora, GISA. e-mail: pineida@ula.ve

Hilda R. Rodríguez. Técnico Superior Agrícola, ULA, Venezuela. Investigadora, GISA, NURR-ULA. e-mail: mandoni500@hotmail.com.

En síntesis, se plantea la necesidad de estudiar unidades de paisaje a escalas de detalle adecuadas ($\geq 1:5000$), que sean útiles para el ordenamiento territorial en cuencas productoras de agua sometidas a usos agropecuarios intensivos. A partir de esta necesidad y de la potencialidad técnica del IHM, se propone como objetivo general de este trabajo determinar la homogeneidad pedogeomorfológica y su relación con la pedogénesis en tres parcelas experimentales de 1,5ha cada una, ubicadas en la cuenca del río Motatán, en el estado Trujillo, Venezuela.

Materiales y Métodos

Las parcelas experimentales seleccionadas están ubicadas en las áreas muestras de Piedra Azul (300msnm), La Loma (1115msnm) y La Ciénega (2400msnm), localizadas en la cuenca del río Motatán, en el estado Trujillo, Venezuela (Figura 1). Los criterios para la selección de estos sitios se basaron en la importancia agroecológica de los mismos, la accesibilidad y representatividad de las parcelas dentro

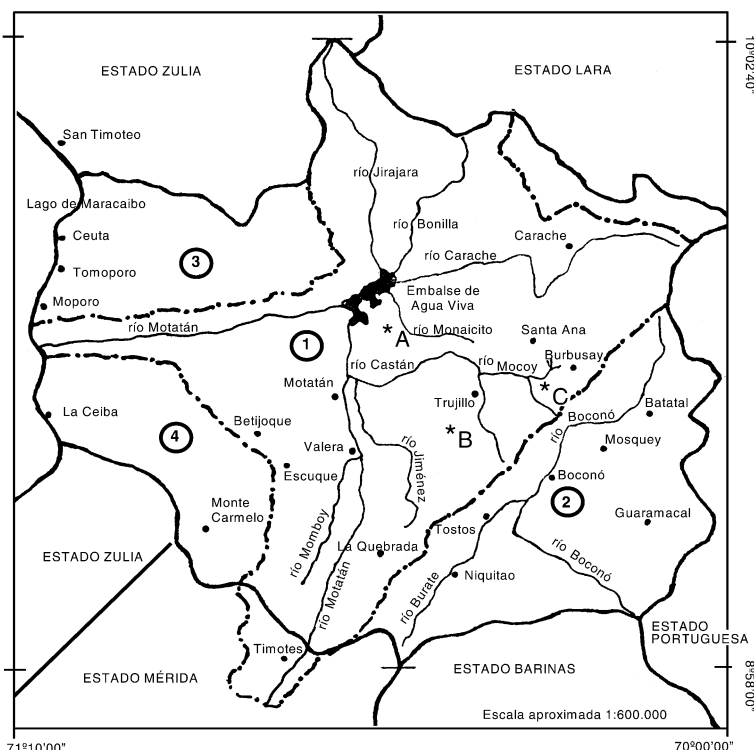


Figura 1: Áreas de estudio seleccionadas: (A) Sector Piedra Azul (Monay); (B) Sector La Loma (Sabanetas); y (C) Sector La Ciénega (La Cristalina).

(*) Localización aproximada de las parcelas demostrativas

(1) Cuenca del Río Motatán; (2) Cuenca del río Boconó; (3) Planicie del río Motatán; (4) Sistema Caus - Pocó

--- Divisoria de Aguas; — Límite de Estado; — Trazado de ríos; ■ Cuerpo de Agua

de cada uno de los sectores. Previo a este ensayo de investigación, Mendoza (2000) llevó a cabo, en las mismas parcelas experimentales, una evaluación agroforestal con el propósito de determinar los grados de aptitud de la tierra, comparando las cualidades o características de los suelos predominantes en dichas parcelas con los requerimientos agroecológicos de especies forestales y frutales adaptadas a las condiciones ambientales imperantes en cada uno de las áreas mencionadas. Esta actividad preliminar contribuyó a tener el apoyo y colaboración del productor para el desarrollo y finalización de este trabajo.

Para realizar la caracterización pedogeomorfológica, se utilizó el diagrama de flujo de datos (DFD) de análisis (Figura 2) propuesto por Pineda *et al.* (2000). De acuerdo con este diagrama, la actividad se inicia con la ubicación y análisis de la información básica disponible, relacionada con los suelos, la geología, la geomorfología, el clima, la hidrología, la ubicación geográfica y los datos agrícolas en cada una de las

TABLA I
CARACTERÍSTICAS PEDOGEO MORFOLÓGICAS DE LAS ÁREAS SELECCIONADAS

Áreas	Característica
Piedra Azul	Precipitación media anual de 1255mm y evapotranspiración media anual de 1644mm, lo que refleja un déficit hídrico anual de 389mm. Temperatura media anual $\sim 27^{\circ}\text{C}$ (Albornoz, 1988). De acuerdo a la clasificación de Zinck (1981) se ubica en una terraza coluvio-aluvial, con una pendiente media de 5%, en un paisaje de piedemonte con una forma de terreno plano-convexa y datación relativa del Q_2 . Su formación geológica contiene detritos transportados pertenecientes a una cobertura sedimentaria proveniente de varias formaciones geológicas (Mucuchachí, La Quinta, Río Negro y Peñas Altas). Está ubicada en el Bosque seco tropical, de acuerdo a las Zonas de Vida definidas por Holdridge en 1975, citado por Ewel <i>et al.</i> , (1976), con vegetación arbórea y arbustiva. Según Jaimes (1988) el balance pedogeomorfológico está dominado por los procesos de transformación ($G < T > P$), con tendencia próxima a una condición de equilibrio morfopedológico ($G \leq P$).
La Loma	Precipitación media anual de 870mm y evapotranspiración media anual de 1162mm, con déficit hídrico anual de 292mm (Albornoz, 1988). La temperatura media anual calculada a partir del gradiente térmico propuesto por Jaimes y Elizalde (1990) es de 23°C . Se localiza en una ladera de montaña con una forma de terreno plano inclinado (rectilínea-rectilínea) y caracterizada por ser una vertiente con una pendiente media de 34% con datación relativa del Q_1 , en la cual se superponen materiales coluviales sobre formas relictas (Zinck, 1981). Predominan pizarras y esquistos alterados "in situ" de la Formación Mucuchachí. Posee una vegetación predominante de helechos y matorrales. Se localiza en un Bosque seco premontano (según Holdridge 1975, citado por Ewel <i>et al.</i> , 1976). El balance pedogeomorfológico (Jaimes, 1988) está caracterizado por el predominio de las ganancias ($G > T < P$), prevaleciendo más una dinámica morfogenética ($G > P$).
La Ciénega	Precipitación media anual de 931mm y evapotranspiración media anual de 730mm, sin déficit hídrico. Temperatura media anual $\sim 13^{\circ}\text{C}$ (Albornoz, 1988). Con base en la clasificación de Zinck (1981), se ubica en una ladera de montaña con una pendiente media de 23%, con una forma de terreno plano inclinado y datación relativa del Q_2 . En el sustrato geológico predominan pizarras y esquistos alterados "in situ" provenientes de la Formación Mucuchachí. La zona de vida fue clasificada como un Bosque subalpino con vegetación de páramo (Frailejón spp) de acuerdo a Ewel <i>et al.</i> (1976). De acuerdo con el modelo de Jaimes (1988), el balance pedogeomorfológico es $G < T > P$. Las ganancias son significativamente más importantes que las pérdidas ($G > P$), estimándose que el sistema está lejano al equilibrio morfopedológico.

áreas muestras (Tabla I). Este procedimiento se identifica en la Figura 2 como P1 (Seleccionar la información básica relevante). Para desarrollar el proceso P2 (Caracterizar el recurso suelo), fue necesario tomar muestras de suelo mediante la descripción de barrenos hasta la profundidad que lo permitiera el estrato pedregoso o rocoso.

También se utilizaron cortes recientes realizados para la construcción de carreteras o vías de penetración agrícola. Las observaciones de suelos se ubicaron en forma de cuadrícula o se ordenaron en transectas, de acuerdo con la forma de las parcelas, cuya superficie aproximada fue de 1,5ha. Se realizaron diez observaciones por cada parcela experimental.

Las características pedogeomorfológicas reconocidas en el campo y determinadas en el laboratorio aparecen indicadas en la Tabla II, en la cual se señalan los símbolos y las unidades empleadas para elaborar la data necesaria con fines de procesamiento computarizado de la misma. La información de suelo recabada en campo y determinada en el laboratorio fue ordenada según los horizontes de suelo identificados en el perfil; es decir, epipedones (horizontes A1 y Ap) y endopedones (horizontes Bt o Bsw). Los horizontes identificados con Ap hacen referencia a los epipedones de labranza producto del mezclado mecánico

los primeros 18cm del suelo superficial o de un espesor menor, por acción de los implementos agrícolas más comunes. Los horizontes simbolizados como Bt son definidos como endopedones texturales originados por la acu-

mulación iluvial de arcilla y otras sustancias coloidales producto de su migración desde el horizonte A1 o Ap suprayacente. Los horizontes subsuperficiales reconocidos como Bsw son endopedones de estructuración y desarrollo de color, relacionados con la incidencia de procesos incipientes de transformaciones pedogenéticas producto del lavado de bases, la pedoturbación y el inicio de procesos de liberación de hierro de formas reducidas (Fe^{2+}) a formas oxidadas (Fe^{3+}). Las características determinadas en el laboratorio (H^+ , CO, P, K, Ca, Mg, a y A en Tabla II) se obtuvieron con base a la metodología del FONAIAP (1990). La información de suelos recopilada permitió conformar una matriz compuesta de 12 variables (columnas) y de 10 observaciones de suelo (filas), realizadas en cada una de las parcelas experimentales.

La función P3 (Generar información básica complementaria) se realizó simultáneamente con la función P2, consistiendo en la definición de aspectos geomorfológicos, utilizando los criterios de Elizalde (1983) y Elizalde y Jaimes (1989). Las características bioclimáticas (Zonas de Vida, Tabla I) se determinaron de acuerdo con los criterios bioclimáticos

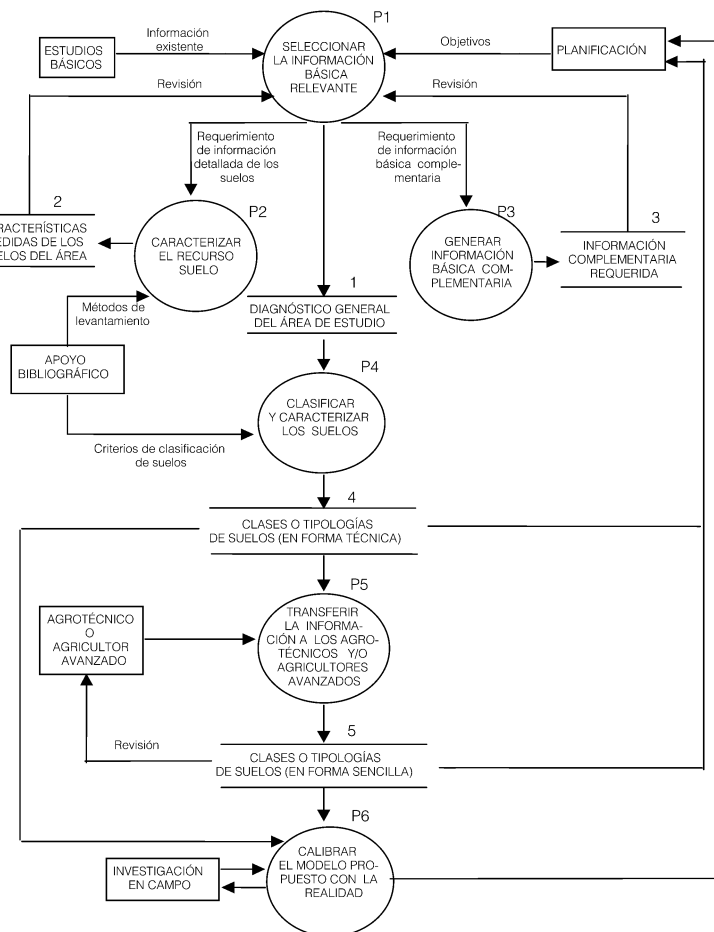


Figura 2. Diagrama de Flujo de Datos de Análisis (Pineda *et al.*, 2000).

TABLA II
CARACTERÍSTICAS Y VARIABLES PEDOGEO MORFOLÓGICAS DESCRITAS EN EL CAMPO Y OBTENIDAS EN EL LABORATORIO

Característica	VARIABLES PEDOGEO MORFOLÓGICAS	Símbolo	Unidad	Método de obtención
Morfológicas	Espesor del epipedón	Esp	cm	Cinta métrica
	Claridad del color en húmedo (Value)	V	Escalar	USDA (1990)
	Pureza del color en húmedo (Chroma)	C	Escalar	
	Fragmento grueso (Pedregosidad interna)	F.G.	%	Gravimétrico (FONAIAP, 1990).
Químicas	Acidez del suelo*	[H ⁺]	Cmol*E ⁻⁵ /l	Potenciométrico - relación 1:2 (FONAIAP, 1990)
	Contenido de C Orgánico	C.O.	%	Combustión húmeda (Walkley-Black, en FONAIAP, 1990).
	Contenido de P extraíble**	P	mg/kg	Olsen (FONAIAP, 1990).
	Contenido de K extraíble **	K	mg/kg	Olsen (FONAIAP, 1990).
	Contenido de Ca extraíble **	Ca	mg/kg	Morgan modificado (FONAIAP, 1990).
	Contenido de Mg extraíble **	Mg	mg/kg	Morgan modificado (FONAIAP, 1990).
Físicas	Contenido de arena	a	%	Análisis granulométrico por densimetría de Bouyoucos (FONAIAP, 1990).
	Contenido de arcilla	A	%	

* Según especialistas en Química de Suelos se debe transformar los valores de pH en unidades de concentración de hidrogeniones para efectos de análisis estadísticos paramétricos multivariados.

** Los valores se expresan en ppm o mg/kg cuando se utilizan estos métodos de obtención. Si el método de extracción es con acetato de amonio, ajustado a pH 7,0 y medido con espectrofotómetro de absorción atómica, normalmente los resultados se expresan en Cmol/Kg. Si se desea convertir una unidad a otra, se recomienda consultar FONAIAP (1990).

TABLA III
MATRIZ DE VALORES OBSERVADOS EN LAS ÁREAS DE PIEDRA AZUL, LA LOMA Y LA CIÉNEGA

Obs	HOR	ESP (cm)	COLOR		F.G. (%)	[H ⁺] (Cmol*E-5/L)	C.O. (%)	P (mg/Kg)	K	Ca	Mg	a (%)	A (%)	
			V	C										
ÁREA PIEDRA AZUL	PA-01	Ap	20	4	4	60	2,51	1,5	2	1	80	72	58	10
	Bt	13	4	6	52	7,94	0,7	17	33	120	72	48	24	
	PA-03	Ap	58	4	4	33	7,49	0,2	9	1	40	85	71	7
	Bt	58	4	6	42	5,15	0,2	5	31	71	101	66	12	
	PA-04	Ap	15	3	2	53	1,59	2,4	12	1	240	240	40	10
	Bsw	7	4	4	52	6,31	1,4	4	1	120	96	48	12	
	PA-05	Ap	20	4	3	63	1,26	1,6	1	13	320	144	56	10
	Bt	38	4	4	49	6,74	1,2	2	1	109	78	47	19	
	PA-07	A1	18	4	4	42	10,00	0,4	2	66	80	96	52	10
	Bt	25	5	4	36	15,85	0,4	3	66	40	24	46	16	
	PA-08	A1	10	4	4	25	5,01	1,0	3	1	80	72	72	6
	Bt	43	4	6	36	8,28	0,7	3	6	40	48	69	14	
	PA-09	A1	29	4	4	30	7,10	1,0	3	83	61	72	61	11
	Bt	72	4	4	38	10,16	1,1	1	31	40	48	52	20	
	PA-10	A1	15	3	4	44	3,98	1,6	1	83	200	144	54	12
	Bsw	24	4	4	48	5,61	1,2	1	1	98	109	58	11	
	PA-11	A1	13	4	4	36	7,94	0,2	15	83	40	96	54	10
	Bt	43	4	6	36	7,47	0,3	4	1	72	77	49	15	
	PA-12	A1	48	4	6	45	5,01	1,6	2	66	240	96	38	14
	Bt	69	5	6	49	3,86	1,2	1	20	194	75	32	18	
ÁREA LA LOMA	LL-01	Ap	24	5	4	59	1,59	3,6	16	58	180	240	36	22
	Bsw	16	5	4	59	2,51	2,3	10	39	40	192	36	24	
	LL-02	Ap	10	5	4	44	0,79	1,7	13	37	80	240	60	10
	Bsw	10	5	3	46	2,00	1,9	13	55	40	168	54	12	
	LL-03	Ap	18	5	3	58	1,59	2,7	17	52	680	120	44	14
	Bt	10	5	4	61	2,00	2,5	7	46	80	96	44	18	
	LL-04	Ap	15	5	4	63	1,26	3,5	22	9	400	360	38	14
	Bsw	10	5	3	58	2,51	2,3	10	5	160	264	38	16	
	LL-06	A1	10	5	3	67	1,59	2,8	12	29	400	312	44	16
	Bsw	15	5	3	54	2,00	1,9	6	60	240	288	38	18	
	LL-07	A1	10	5	4	61	3,16	1,2	10	49	200	240	52	14
	Bsw	25	5	3	60	5,01	1,9	8	29	80	144	60	10	
	LL-08	A1	20	4	4	57	3,16	2,7	9	45	200	240	38	18
	Bsw	8	4	4	58	3,16	2,0	11	60	80	312	40	14	
	LL-09	A1	15	3	3	61	0,20	3,8	17	91	720	528	42	8
	Bsw	23	3	3	47	0,06	2,6	8	37	400	312	46	8	
	LL-11	A1	20	3	3	58	1,26	2,7	26	67	240	384	44	14
	Bsw	25	4	3	56	2,00	2,8	18	92	320	336	44	14	
	LL-12	A1	20	3	3	50	3,16	2,5	11	48	200	192	54	10
	Bt	5	4	4	42	3,16	1,7	13	30	40	144	48	14	
ÁREA LA CIÉNEGA	LC-01	A1	43	3	2	46	4,44	4,1	10	50	358	78	24	22
	Bt	83	5	6	51	6,63	0,8	6	10	94	43	17	46	
	LC-03	A1	41	3	2	36	5,80	4,9	13	32	173	44	19	32
	Bsw	53	5	4	61	7,12	1,2	11	5	48	24	17	37	
	LC-04	A1	46	3	2	36	3,34	3,8	6	38	150	66	39	11
	Bt	61	5	6	42	2,79	1,2	2	9	133	67	21	34	
	LC-05	A1	69	3	2	39	4,21	4,6	8	39	108	197	38	7
	Bt	37	5	4	49	2,92	1,0	2	9	135	24	23	22	
	LC-06	A1	16	3	2	57	2,00	4,7	6	28	200	24	52	4
	Bsw	8	4	4	54	1,59	1,9	5	13	160	120	36	8	
	LC-07	A1	34	2	2	37	3,71	3,5	10	41	242	41	41	5
	Bt	52	4	4	43	3,80	0,9	8	7	53	24	29	15	
	LC-08	A1	35	3	2	48	3,04	4,4	8	39	122	64	44	5
	Bt	85	4	4	57	3,51	1,0	3	10	118	28	21	24	
	LC-09	A1	25	3	2	72	7,22	4,1	26	80	125	132	53	4
	Bsw	27	2	2	26	2,57	0,8	5	27	129	54	13	9	
	LC-10	A1	21	3	2	47	7,94	5,2	10	92	451	158	47	6
	Bt	24	4	4	51	6,31	1,9	10	28	135	84	36	15	
	LC-11	A1	12	3	3	62	7,94	4,4	26	42	480	240	36	8
	Bsw	38	4	4	46	5,80	1,2	7	105	137	66	36	10	

definidos por Holdridge, contenidos en Ewel *et al.* (1976).

Luego se procedió a desarrollar la función P4 (Clasificar y caracterizar los suelos), identificando los suelos evolucionados (alfisoles) y los poco evolucionados (inceptisoles), aplicando los criterios de la taxonomía de suelos (USDA, 2003), a nivel de orden de suelos.

Las funciones P5 (Transferir la información a los agrotécnicos y/o agricultores avanzados) y la P6 (Calibrar el modelo propuesto con la realidad) no formaron parte de la metodología por estar fuera de los objetivos del estudio realizado.

El balance pedogeomorfológico se estimó a partir del criterio propuesto por Jaimes (1988), según el cual el origen, estructura, desarrollo y tendencias evolutivas que caracterizan a los sistemas pedogeomorfológicos o “paisajes de suelos”, está definido por la interrelación existente entre tres procesos: las transformaciones (T), que están asociadas con los cambios o alteraciones que sufre la materia, energía e información a lo largo del desarrollo del sistema; las ganancias (G), que están relacionadas con los aportes o ingresos de materia, energía e información durante la formación y desarrollo del sistema; y las pérdidas (P), que son procesos vinculados con las salidas o egresos de materia, energía e información que tienen lugar durante la evolución de los sistemas. La interrelación entre estos procesos, se establece mediante la expresión

$$G \gtrsim T \gtrsim P \quad (1)$$

donde G: procesos de ganancia de materia, energía e información, hacia el interior del sistema; T: procesos de transformación de materia, energía e información, dentro del sistema; y P: procesos de pérdida de materia, energía e información, hacia el exterior del sistema.

La homogeneidad pedogeomorfológica en cada una de las parcelas experimentales se determinó con el Índice de Homogeneidad Múltiple (IHM), propuesto por Jaimes (1988), basado en el análisis multivariado por componentes principales (ACP). El IHM se define como el producto acumulado de los valores propios mayores o iguales a uno ($\lambda_j \geq 1,0000$). Esta definición es concordante con los criterios propuestos por Kaiser en 1962 y Guttman en 1955, citados por Morrison (2004). Para este cálculo se multiplica el primer valor propio por el segundo, el producto obtenido se multiplica por el tercero y así sucesivamente hasta utilizar todos los valores propios mayores o iguales a uno (Jaimes y Elizalde, 1991b). Algebraicamente se representa como

$$IHM = \prod_{j=1}^m \pi \lambda_j \quad (2)$$

donde π : producto acumulado de los valores de λ_j ; λ_j : valor propio del j-ésimo componente principal cuya magnitud es $\geq 1,0000$; y m: número de componentes principales cuyos valores propios son $\geq 1,0000$.

Para el procesamiento de la matriz de datos provenientes del reconocimiento de campo y del análisis del laboratorio, se utilizó el Sistema de Información Automatizado de Homogeneidad de Tierras (SIAHT, Versión 2.1) de Elizalde y Daza (2001), el cual automatiza el IHM.

Resultados y Discusión

Caracterización pedogeomorfológica

Con base en los resultados obtenidos durante las fases de campo y laboratorio se construyó una base de datos originales, la que sirvió para elaborar una matriz de variables cuantitativas. Esta matriz corresponde a las características medidas y los atributos descritos en cada uno de los horizontes que se separaron en los perfiles de suelo observados y colectados en cada área de estudio. Luego, se realizó una selección de las variables que permitió la conformación de las matrices de datos definitivas para aplicar el SIAHT. Tal selección se realizó considerando el grado de importancia de los factores formadores de suelo y los procesos que condicionan algunos atributos. Así, en la Tabla III aparecen los valores de las variables pedogeomorfológicas correspondientes a los perfiles completos (n= 20), representados por diez epipedones e igual número de endopedones.

De esta matriz fueron excluidas las observaciones PA-02 y PA-06, de Piedra Azul; LL-05 y la LL-10, de La Loma y LC-02 y LC-12 de La Ciénega, debido a que en ellas el horizonte A (epipedón) suprayace a un horizonte Cr (saprolita), mientras que las restantes tienen como perfil la secuencia A/B/Cr. De esta forma, 10 observaciones contendrán un epipedón (horizonte A) y un endopedón (horizonte B), para un total de 20 horizontes (epipedones + endopedones).

Respecto al desarrollo pedogenético de los suelos descritos y muestreados, aquellos perfiles de suelo que presentan endopedones argílicos (Bt), producto de la migración de arcilla coloidal, son considerados como suelos evolucionados, a diferencia de los perfiles que no exhiben dichos horizontes argílicos, que son considerados como suelos poco evolucionados, que tienen un Bsw como endopedón.

En las áreas de estudio, los suelos que muestran la secuencia de horizontes A1/Bt o Ap/Bt clasifican taxonómicamente en el orden de los Alfisoles (USDA, 2003), ya que no presentan una

alta lixiviación o lavado de bases (35 a 50% de saturación básica). Por otro lado, los suelos que tienen la secuencia A1/Bsw ó Ap/Bsw son suelos que exhiben poca evolución pedogenética, expresada en la formación de un endopedón de estructuración y desarrollo de color (horizonte cámbico), lo cual permite clasificar dichos suelos en el orden de los Inceptisoles (USDA, 2003).

De acuerdo con estas premisas, se infiere que en el área de Piedra Azul fueron reconocidos ocho perfiles de suelos evolucionados (PA-01, 03, 05, 07, 08, 09, 11 y 12) y tan solo dos suelos son poco evolucionados (PA-04 y 10). En la parcela experimental ubicada en el área de La Loma, ocho perfiles fueron identificados como poco evolucionados (LL-01, 02, 04, 06, 07, 08, 09 y 11) y solo 2 clasificaron como suelos evolucionados (LL-03 y 12). Por último, en el área muestra de La Ciénega, seis perfiles corresponden a suelos evolucionados (LC-01, 04, 05, 07, 08 y 10) y los cuatro restantes (LC-03, 06, 09 y 11) a suelos poco evolucionados.

En la Tabla IV se presenta una comparación entre las cantidades de suelos evolucionados y poco evolucionados que fueron identificados y caracterizados en cada una de las áreas antes referidas, y su relación con algunas características del paisaje y su balance pedogeomorfológico. Del análisis de la Tabla IV se infiere:

- Los sistemas pedogeomorfológicos estudiados en cada uno de los sectores seleccionados poseen poblaciones de suelos poco evolucionados y evolucionados, cuyas frecuencias son diferentes. En efecto, en el sector Piedra Azul hay un evidente predominio de suelos evolucionados, situación que se repite en el sector La Ciénega. Por el contrario, en el sector La Loma es clara el predominio de los suelos poco evolucionados.

- La combinación de factores y procesos pedogenéticos es distinta en cada una de las áreas en estudio. Esto quedó evidenciado al estimar el balance pedogeomorfológico en cada área, observándose que en Piedra Azul y La Ciénega dicho balance está caracterizado por el predominio de los procesos de transformación (pedogénesis), en comparación con las ganancias y pérdidas ($G < T > P$), significando que en estas áreas los sistemas tienen tendencia hacia el equilibrio morfopedológico ($G \leq P$), lo que es más claro en Piedra Azul en comparación con La Ciénega ($G > P$).

- En el caso de los suelos contenidos en el sector La Loma, el balance pedogeomorfológico está caracterizado por los procesos de ganancia los cuales son mayores a las transformaciones ($G > T < P$), de

TABLA IV
BALANCE DE PROCESOS PEDOGEOMORFOLÓGICOS Y SU RELACIÓN CON LA PEDOGÉNESIS
EN LAS ÁREAS MUESTRAS SELECCIONADAS

Sector	Tipo de Paisaje	Edad relativa	Población de suelos		Balance pedogeomorfológico	
			Evolucionados	Poco evolucionados	Relación de procesos	Descripción
Piedra Azul	Terraza coluvio – aluvial	Q ₂	8	2	G<T>P G≤P	Predominio de los procesos de transformación (pedogénesis) con tendencia cercana al equilibrio morfopedológico
La Loma	Ladera de montaña alterada “in situ”, con superposición de materiales coluviales	Q ₁	2	8	G>T<P G>P	Predominio de los procesos de ganancias con énfasis en la dinámica morfogenética
La Ciénega	Ladera de montaña alterada “in situ”	Q ₂	6	4	G<T>P G>P	Predominio de los procesos de transformación (pedogénesis), aun lejano del punto de equilibrio morfopedológico

allí que predominen los suelos poco evolucionados, lo que es típico de las áreas con una dinámica morfogenética (G>P), asociada con los paisajes de laderas muy inclinadas en las que se superponen materiales detríticos y heterométricos provenientes de las partes más altas de las laderas, de mayor inestabilidad, y depositados por efectos de la gravedad y del escurrimiento superficial, en las partes más altas del paisaje de suelos.

Determinación de la homogeneidad múltiple (IHM)

Mediante la utilización del SIAHT se realizó un primer ensayo con las matrices de datos, considerando la totalidad de la información cuantificada en cada uno de los perfiles de suelos, incluyendo epipedones y endopedones. El propósito de este análisis es determinar la homogeneidad pedogeomorfológica y su relación con la pedogénesis en cada uno de los sectores en estudio. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla V y en la Figura 3, observándose que existe una estrecha vinculación entre la homogeneidad pedogeomorfológica y la pedogénesis en cada uno de los sectores evaluados; es

decir, a mayor homogeneidad mayor presencia de suelos evolucionados. Esta relación es clara cuando se comparan los IHM calculados a partir de los datos provenientes de los perfiles de suelo completos y los del endopedón, pero no así con las matrices correspondientes al epipedón. La diferencia puede explicarse en razón a que los epipedones son los horizontes del suelo que mayor variabilidad espacial y temporal exhiben, en virtud a los cambios de intensidad y frecuencia que tienen todos los factores ambientales o externos que inciden directamente sobre él; es decir, variaciones de algunos elementos climáticos (temperatura, radiación, lluvia, evapotranspiración e insolación, entre otros), cambios en el uso de la tierra y diferencias asociadas con distintas prácticas o tipos de manejo de tierras. Por el contrario, los endopedones, por ser horizontes subsuperficiales, no están sometidos a esta amplia variabilidad de los factores formadores de suelo, constituyéndose en las partes o secciones del cuerpo de suelo que son muy útiles para confirmar o corroborar los análisis de homogeneidad pedogeomorfológica y el desarrollo evolutivo de los suelos contenidos en una unidad de paisaje determinada.

TABLA V
HOMOGENEIDAD PEDOGEOMORFOLÓGICA DETERMINADA A PARTIR
DE TRES FORMAS DE AGRUPAMIENTO Y SU COMPARACIÓN CON
LA CANTIDAD DE SUELOS EVOLUCIONADOS Y POCO EVOLUCIONADOS,
DESCRITOS EN CADA UNA DE LAS ÁREAS MUESTRAS

Áreas muestras	Homogeneidad pedogeomorfológica (IHM)			Estimación de la pedogénesis	
	Perfiles completos (n= 20)	Epipedones (n= 10)	Endopedones (n= 10)	Nº de suelos evolucionados	Nº de suelos poco evolucionados
Piedra Azul	16,23	23,21	36,16	8	2
La Loma	12,93	23,95	24,13	2	8
La Ciénega	14,95	20,38	28,75	6	4

En el caso específico de La Loma, probablemente podría estar asociada con la incidencia diferencial de ciertos procesos formadores; es decir, existen puntos de observación con un predominio de pedregosidad interna (horizontes C). En otros se evidencian procesos de argilización (horizontes Bt) con abundancia de pedregosidad, y en otras observaciones se pudo apreciar, además de la abundante pedregosidad interna, la formación de estructura de suelo y desarrollo de color (horizontes Bsw), siendo estos últimos los procesos pedogenéticos que predominan en esta área.

En síntesis, la mayor homogeneidad de los endopedones en los suelos ubicados en las áreas de Piedra Azul y La Ciénega está relacionada al predominio de suelos evolucionados, a diferencia del sector La Loma, en la cual se incrementa el número de suelos con poca evolución pedológica (Figura 3). Parece obvio que los suelos poco evolucionados son, en términos generales, más cambiantes o variables por ser más inestables.

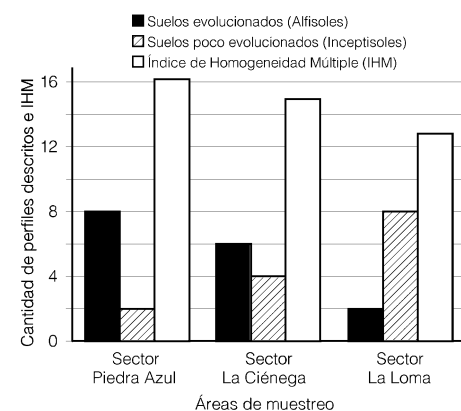


Figura 3. Relación entre la homogeneidad pedogeomorfológica y el grado de evolución de los suelos identificados y descritos en cada área de muestreo.

Considerando los resultados antes discutidos, se confirma la hipótesis formulada por Jaimes (1988), según la cual los cambios que siguen los suelos durante su evolución están en función de las de las ganancias, transformaciones y pérdidas de la materia, la energía y la información dentro del sistema, y desde y hacia el exterior del mismo; es decir, que en la medida en que un suelo exhiba mayor desarrollo pedogenético tendrá un balance de intercambio energético que se aproximará a un estado de equilibrio morfopedológico, caracterizado por el predominio de los procesos de transformación y un balance entre las ganancias y las pérdidas, el cual es evidente en el área de Piedra Azul y menos en el área de La Ciénega, manifestándose un mayor desequilibrio o inestabilidad en el área de La Loma. Según Ibáñez *et al.* (1990), el estado de equilibrio implica un aumento en la entropía del suelo o del sistema. De acuerdo con esta premisa, se estima que entre las tres áreas muestras estudiadas, la de mayor entropía es Piedra Azul. Desde esta perspectiva, el IHM propuesto por Jaimes (1988) es una función proporcional al valor de la entropía propia del sistema, cuestión que fue observada por Ochoa y Oballos (2002), quienes determinaron que los valores del IHM tienden a ser más elevados en los suelos evolucionados que en los poco evolucionados, tendencia que ha sido verificada y validada con los resultados discutidos en este trabajo.

Utilidad técnica y científica del IHM y del SIAHT

Como interpretación global de los resultados obtenidos es pertinente acotar que el IHM es un parámetro multivariado efectivo y eficiente para determinar el grado de homogeneidad de sistemas tan complejos como el suelo, el paisaje de suelos o el ecológico, independientemente de sus escalas de expresión. Adicionalmente, el balance de procesos pedogeomorfológicos, en términos del intercambio de materia, energía e información que se manifiesta mediante las ganancias, transformaciones y pérdidas dentro y entre los sistemas complejos antes indicados, es una estimación que contribuye eficazmente a entender y explicar la homogeneidad pedogeomorfológica y su relación con la pedogénesis de unidades de paisaje.

Por su parte, el SIAHT, como prototipo de *software* que automatiza el cálculo del IHM, constituye un instrumento potenciador de las aplicaciones del IHM en diferentes campos de la ingeniería agronómica, agrícola, forestal, ambiental y de los recursos naturales y, más particularmente, en la ciencia del suelo.

En este sentido, es oportuno complementar el análisis desarrollado por Blum (2002), en relación con los desafíos que encara la ciencia del suelo en el tercer milenio, toda vez que el suelo y su entorno conforman el contexto dentro del cual debe garantizarse la sostenibilidad eco-social. Estos retos son:

- 1- Estudiar el suelo en su contexto espacial y temporal.
- 2- Analizar la relación existente entre procesos y propiedades del suelo.
- 3- Interpretar adecuadamente los estudios básicos de suelos para definir sus mejores usos y establecer prácticas potenciadoras del manejo sostenible de los agroecosistemas.

El primer desafío tiene que ver con la definición y análisis de los patrones de distribución espacial de las características pedológicas y pedogeomorfológicas y, en general, con los tipos de suelos y de paisaje que caracterizan la totalidad del ambiente físico natural y/o antrópico, a una escala determinada. Desde esta perspectiva, el IHM es uno de los mejores parámetros para definir unidades cartográficas del máximo grado de homogeneidad posible en mapas detallados de ecosistemas; es decir, agrupamientos en los cuales las variables presentan las más altas correlaciones y los menores coeficientes de variación (Elizalde, 1997). Adicionalmente, al comienzo del presente trabajo se citan otras aplicaciones del IHM relacionadas con el estudio de la variabilidad geográfica de los atributos pedogeomorfológicos con la finalidad de delinear unidades homogéneas de tierra bajo usos agrícolas.

En segundo lugar, Blum (2002) llama la atención en cuanto a la necesidad de comprender, como un todo, la complejidad del sistema pedológico y pedogeomorfológico, a partir de la amplia gama de procesos que se activan permanentemente dentro y entre los sistemas, en respuesta a la acción combinada de los factores involucrados en su formación. En este sentido, el IHM también posee una adecuada calidad analítica y predictiva como parámetro multivariado para contribuir en el abordaje de este reto, más aún si se combina con el modelo del balance pedogeomorfológico propuesto por Jaimes (1988), ya que las cantidades, intensidades y tasas de cambio de las propiedades o atributos físicos, químicos, biológicos y mineralógicos, así como las fases en que ellos se expresan (sólido, gas y líquido), pueden ser estimadas mediante las ganancias, las pérdidas y las transformaciones de materia, energía e información, que es como se cuantifican todas las características pedométricas. De allí que el análisis termodinámico, aplicado al sistema pedo-

geomorfológico con la finalidad de explicar su origen, auto-organización, funcionamiento y tendencias evolutivas, es una vertiente muy significativa para contribuir en el manejo de este segundo desafío de la ciencia del suelo. De hecho, en la bibliografía citada y en los resultados presentados en este trabajo se muestran datos e información que permiten validar tendencias evolutivas correlativas con la creciente homogeneidad pedogeomorfológica observadas por otros investigadores.

Con respecto al tercer reto, todavía no se han llevado a cabo aplicaciones del IHM y del SIAHT. No obstante, en la actualidad se realizan experiencias en algunas cuencas hidrográficas de Venezuela, entre las que se destacan las partes altas de las cuencas de los ríos Guárico y Motatán, en las que estas herramientas metodológicas servirán de base para determinar e interpretar correctamente la homogeneidad multivariada propia de los sistemas pedogeomorfológicos y su relación con los tipos y condiciones de estado que exhiben distintos usos (agrícolas, forestales y agroforestales), la capacidad e intensidad de uso en función a la productividad de las tierras rurales y periurbanas, así como en el estudio, análisis y discusión del conjunto de prácticas de manejo requeridas para el mejoramiento de dicha productividad (riego, drenaje, utilización de abonos orgánicos o biofertilizantes, bioremediación, laboreo mínimo del suelo y biotecnología, entre otros), con la finalidad de reducir o controlar los impactos que afectan la estabilidad, elasticidad, resiliencia y adaptabilidad de los agroecosistemas auto-sostenibles (Mäsera *et al.*, 1999).

En síntesis, sobre la base del análisis efectuado, se recomienda la utilización del IHM, el SIAHT y la ecuación del balance pedogeomorfológico como métodos para el análisis holístico e integral de cualquier ecosistema, toda vez que son métodos eficaces y eficientes para interpretar datos e información, básica y aplicada, pertinente en la toma de decisiones orientadas al desarrollo sostenible de los recursos naturales, con especial énfasis en las cuencas productoras de agua de Venezuela.

Conclusiones y Recomendación

En virtud de los resultados discutidos se llega a las siguientes conclusiones:

- El balance de procesos pedogeomorfológicos es un buen estimador del grado evolutivo de los suelos contenidos en una unidad de paisaje determinada. En efecto, se observó que en las áreas de Piedra Azul y La Ciénega dicho balance está caracterizado por el predominio de las transformaciones, como expresión de la

pedogénesis, en comparación con las ganancias y las pérdidas.

- Se comprobó y validó una relación consistente entre homogeneidad pedogeomorfológica y el grado de desarrollo de los suelos en las áreas bajo estudio, estableciéndose que a mayor homogeneidad del paisaje de suelos, mayor es el contenido de suelos evolucionados, lo que contribuyó a la definición de una secuencia evolutiva decreciente de las áreas muestras que tienen el siguiente orden: Piedra Azul>La Ciénega>La Loma; la cual es correlativa con los valores de IHM de cada una de ellas y con sus balances pedogeomorfológicos.

- El IHM, el SIAHT y la ecuación del balance pedogeomorfológico son herramientas muy útiles para entender y explicar, no solo la homogeneidad pedogeomorfológica y su relación con la pedogénesis de unidades de paisaje, independientemente de su complejidad y escala de expresión, sino que también puede ser aplicada como metodología de análisis multivariado para estudiar el suelo en su contexto espacial y temporal, analizar las relaciones entre procesos pedogenéticos y propiedades del suelo e interpretar, adecuadamente, los estudios básicos de suelos para definir sus mejores usos y establecer prácticas potenciadoras del manejo sostenible de los agroecosistemas.

Considerando estas conclusiones, se recomienda la utilización del IHM, el SIAHT y la ecuación del balance pedogeomorfológico como metodologías útiles para el análisis holístico e integral de cualquier ecosistema, toda vez que son métodos eficaces y eficientes para interpretar datos e información, básica y aplicada, pertinente en la toma de decisiones orientadas al desarrollo sostenible de los recursos naturales, con especial énfasis en las cuencas productoras de agua de Venezuela.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Nelson Troconis y José Luis Maldonado, propietarios de las unidades de producción en las que se seleccionaron las parcelas demostrativas, a Juan C. Becerra P. por el apoyo para la ejecución del trabajo de campo, a Erick Brown por su revisión del resumen en inglés, a la Empresa Regional Sistema Hidráulico Trujillano, y al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico, de la Universidad de Los Andes, por el financiamiento de este trabajo (proyecto NURR-C-366-01-04-AA).

REFERENCIAS

- Albornoz SJJ (1988) *Estudio semidetallado de suelos de la cuenca alta y media del río Castán*. Informe Técnico. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Zona 19. Trujillo. Venezuela.
- Blum WEH (2002) The role of soils in sustaining society and the environment: realities and challenges for the 21st century. En *Keynote Lectures*. World Congress of Soil Science. Bangkok, Tailandia. pp. 65-86.
- Daza M, Elizalde G (1988) *Programa IH para la determinación del índice de homogeneidad múltiple mediante microcomputadoras*. Instituto de Edafología, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 20 pp.
- Dijkerman JC (1974) Pedology as a science: The role of data, models and theories in the study of natural soil systems. *Geoderma* 11: 73-93.
- Elizalde G (1983) *Ensayo de clasificación sistemática de paisajes- 1era aproximación*. Instituto de Edafología, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 43 pp.
- Elizalde G (1995) *Ensayos del índice de homogeneidad múltiple en la cartografía detallada de suelos*. Instituto de Edafología, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 15 pp.
- Elizalde G (1997) El índice de homogeneidad múltiple y su utilidad para la cartografía detallada del sistema pedogeomorfológico. *Rev. Fac. Agron.* (Maracay) 23: 187-206.
- Elizalde G, Jaimes E (1989) Propuesta de un modelo pedogeomorfológico. *Rev. Geog. Venez.* 30: 5-35.
- Elizalde G, Daza M (2001) *Sistema de información automatizado de homogeneidad de tierras*. (SIAHT, Versión 2.1).
- Ewel J, Madriz A, Tosi JA (1976) *Zonas de vida de Venezuela. Memoria explicativa sobre el mapa ecológico*. 2^a ed. Editorial Sucre. Caracas, Venezuela. 270 pp.
- FONAIAP (1990) *Manual de métodos y procedimientos de referencia. Análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad*. Brito J, López I, Pérez R (Comps.) Fondo Nacional para la Investigación AgroPecuaría. Maracay, Venezuela. 190 pp.
- Gómez J (1990) *Variabilidad espacial de los suelos de la Estación Experimental del Instituto de la UVA de la UCLA, El Tocuyo-Estado Lara*. Tesis. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. 103 pp.
- Ibáñez J, Jiménez BR, García A (1990) Sistemología y termodinámica en edafogénesis. Los suelos y el estado de equilibrio termodinámico. *Rev. Ecol. Biol. Sol*: 277-331.
- Jaimes CE (1988) *Determinación de índices de homogeneidad múltiples globales en sistemas pedogeomorfológicos de la Cordillera de la Costa, Serranía del Litoral Central*. Tesis. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. 226 pp.
- Jaimes E, Matherano J (1996) Homogeneidad edafogeomorfológica en dos áreas muestras. Subcuenca del río Castán, estado Trujillo, Venezuela. *Rev. Fac. Agron.* (LUZ) 13: 711-723.
- Jaimes E, Elizalde G (1990) Contenido de materia orgánica de epipedones de suelos venezolanos de acuerdo a gradientes altotérmicos. *Rev. Agri. And.* 5: 25-38.
- Jaimes E, Elizalde G (1991a) Determinación de un índice de homogeneidad múltiple en sistemas pedogeomorfológicos montañosos. *Rev. Agri. And.* 6: 25-46.
- Jaimes E, Elizalde G (1991b) Procedimiento para calcular el índice de homogeneidad múltiple en sistemas pedogeomorfológicos. *Rev. Agri. And.* 6: 47-64.
- Jaimes E, Arellano R (1998) Homogeneidad edáfica relacionada con la biomasa herbácea, subcuenca baja del río Castán, estado Trujillo, Venezuela. *Agronomía Tropical* 48: 305-333.
- Jaimes E, Daza M, Elizalde G (1997) *Sistema de información automatizado de homogeneidad de tierras (SIAHT). Versión PT 1.5. Manual del usuario y Software*. Instituto de Edafología, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 20 pp.
- Jaimes E, Oballos J, Ochoa G (1992) Determinación de la homogeneidad múltiple utilizando diferentes niveles de taxones en perfiles de suelos de la cuenca media y alta del río Motatán. Estados Mérida y Trujillo. Venezuela. *Revista Suelo Planta* 2: 433-446.
- Macara O, Astier M, López-Ridaura S (1999) *Sustentabilidad y manejo de recursos naturales. El marco de evaluación MESMIS*. GIRA / Mundi-Prensa. México. 109 pp.
- Mendoza JG (2000) *Evaluación física de tierras con fines de adaptabilidad de especies agroforestales en áreas pilotos localizadas en tres pisos altitudinales de la cuenca del río Motatán, Trujillo, Venezuela*. Tesis. Universidad de Los Andes, Venezuela. 122 pp.
- Morrison DF (2004) *Multivariate Statistical Methods*. 4^a ed. Brooks Cole Thomson. Belmont, Cal., EEUU. 469 pp.
- Oballos J (1995) *Caractérisation des sols de la région de Las Cruces-Santa Elena de Arenales (Mérida, Venezuela). Contribution à la connaissance de la pédogenèse en montagne tropicale humide*. Tesis. Universidad de Toulouse-Le Mirail, Francia. 204 pp.
- Oballos J, Ochoa G, Jaimes E (1999) Homogeneidad múltiple de los suelos de la región de Las Cruces-Santa Elena de Arenales, Mérida, Venezuela. *Agronomía Tropical* 49: 413-433.
- Ochoa G, Oballos J (2002) La homogeneidad múltiple y la evolución de los suelos en la región de Socopó-Barinas, Venezuela. *Agrochimica* 46: 220-230.
- Pineda N (1998) *Definición de tipologías de suelos para la evaluación de tierras de la planicie aluvial del río Motatán, estado Trujillo*. Tesis. Universidad Central de Venezuela. Maracay. 109 pp.
- Pineda N, Elizalde G, Ochoa G, Jaimes E (2000) Validación de una metodología para definir tipos de suelos en forma sencilla I. *Agronomía Tropical* 50: 477-498.
- Smeck NE, Runge ECA, E. E. Mackintosh EE (1983) Dynamics and genetic modeling of soil systems. En Wilding LP, Smeck NC, Hall GF (Eds.). *Pedogenesis and soil taxonomy I. Concepts and interactions*. Elsevier. Amsterdam, Holanda. pp. 51-88.
- USDA (1990) *Munsell Soil Colors Chart. Handbook 18*. Macbeth Division. Kollmorgen Instruments Corp. Baltimore, Maryland, EEUU. 4 pp + anexos.
- USDA (2003) *Keys to Soil Taxonomy*. 9^a ed. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture. Washington DC, EEUU. 432 pp.
- Zinck A (1981) *Definición del ambiente geomorfológico con fines de descripción de suelos*. CIDIAT. SC-46. Mérida, Venezuela. 114 pp.