

Modelo pedogeomorfológico de un área del Delta Superior del río Orinoco afectada por el cierre del caño Mánamo, Venezuela

Pedogeomorphologic model from an area of the Orinoco river's Upper Delta affected by the closure of the Manamo Canal, Venezuela

Clara RONDÓN DE RODRÍGUEZ ¹✉, Graciano ELIZALDE ² e Iván José MAZA ³

¹Universidad Rómulo Gallegos, Centro de Investigación y Extensión en Suelos y Aguas (CIESA), Sector el Castrero, carretera Camburito, San Juan de los Morros, estado Guárico, Venezuela; ²Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Instituto de Edafología, El Limón, Maracay, estado Aragua, Venezuela y

³Universidad de Oriente, Escuela de Ingeniería Agronómica, Departamento de Agronomía, Avenida Universidad, Campus Los Guaritos, Maturín, estado Monagas, Venezuela. E-mails: clararondon@yahoo.com, gracianoelizalde@yahoo.com, ivanjosemaza@yahoo.es ✉ Autor para correspondencia

Recibido: 07/02/2012 Fin de primer arbitraje: 02/05/2012 Primera revisión recibida: 23/05/2012
Fin de segundo arbitraje: 20/06/2012 Segunda revisión recibida: 03/07/2012 Aceptado: 17/07/2012

RESUMEN

Algunos suelos del delta del río Orinoco, después del represamiento del caño Mánamo, han sufrido salinización y acidificación. A través de un modelo pedogeomorfológico, se evaluaron los procesos pedogenéticos y factores de estado que han generado ambientes de acidez-redox-salinidad en el Delta Superior del río Orinoco. Se caracterizó la morfología, las propiedades físicas, químicas, físico-químicas y mineralógicas de nueve suelos, identificándose cuatro grupos de horizontes: G1, característico de ambientes ácido-oxidante-ligeramente salino, en horizontes aireados de cubetas, aguas abajo de la represa Volcán; G2, ácido-reductor-ligeramente salino, en horizontes profundos de esos mismos suelos; G3, no ácido-oxidante-salinidad baja, en suelos de diques y en horizontes superiores de cubeta, aguas arriba de la represa y, G4, no ácido-reductor-salinidad baja, en horizontes profundos del suelo anterior. Estos ambientes responden a los niveles de inundación, controlados por crecientes fluviales, mareas, relieve y represamiento del caño Mánamo. Se diferencian además, por sus contenidos de iones, materia orgánica total, carbono de ácidos fúlvicos y húmicos y minerales asociados a la condición acidez-redox. Los suelos en posición de cubeta aguas abajo del cierre del caño Mánamo mostraron variabilidad vertical y horizontal y desarrollaron acidificación después del cierre. La intensidad de la acidificación depende de los niveles de inundación, modificados por el cierre del caño Mánamo. Las fluctuaciones del nivel freático favorecen la humificación y óxido-reducción que conduce a la acumulación de pirita en horizontes profundos, así como yeso, oxihidróxidos de hierro y jarosita en los horizontes superficiales de los suelos en posición de cubeta aguas abajo del cierre.

Palabras clave: Suelos deltaicos, acidificación de suelos, salinización de suelos, reacciones redox en suelos, modelo pedogeomorfológico.

ABSTRACT

After the Manamo canal damming, some of the soils of the Orinoco river Delta have suffered salinization and acidification. The pedogenetic processes and the state factors that have generated redox-acidity-salinity environments, were evaluated through a pedogeomorphologic model. The morphological, physical, chemical, physicochemical and mineralogical properties of nine soils were characterized. Four groups of horizons were identified (G1, G2, G3 y G4). G1, characteristic of acid-oxidant-slightly saline environments, in airy horizons of seasonal bayous downstream from the Volcan dam; G2, acid-reducing-slightly saline, in deep horizons of the same soils; G3, not acid-oxidant-low salinity, in soils of levees and in upper horizons of a seasonal bayous upstream from the dam, and G4, not acid-reducing-low salinity, in deep horizons of the soil before mentioned. These environments respond to flood levels, which are driven by the rising river, tides, relief and Manamo Canal damming. They differ also by their content of ions, total organic matter, carbon of fulvic and humic acids, and minerals associated with acid-redox status. The soil in seasonal bayous in downstream of the Manamo Canal damming, showed vertical and horizontal variability and developed an acidification after closure, which is not seen in the upstream seasonal bayous or dikes. The intensity of acidification depends on flood levels that are affected by the closure of Manamo Canal. The water table fluctuations favor humification and oxidation-reduction leading to accumulation of pyrite in deep horizons, as well as gypsum, jarosite and iron oxyhydroxides in the surface horizons of soils in a position downstream of the closed basin.

Key words: Deltaic soils, soil acidification, soil salinization, soil redox reactions, pedogeomorphologic model.

INTRODUCCIÓN

Elizalde y Jaimes (1989) proponen el modelo pedogeomorfológico (MPGM) como una representación simplificada del paisaje o sistema pedogeomorfológico¹. El sistema pedogeomorfológico se define como una parte del ecosistema compuesta por rocas, regolitos, sedimentos, suelos y agua, cuyo ambiente está constituido por la atmósfera, la biósfera y la antropósfera. Sus componentes, aunque cambian a lo largo del tiempo, son más estables que los otros componentes del ecosistema. Cuya evolución y desarrollo son determinados y modificados por la interacción de complejos factores de estado en los que se pueden reconocer sub-factores más específicos. Basados en las cualidades y características de los sedimentos originales, los suelos, el relieve y el clima del sistema deltaico, se puede inferir cómo se han producido y cómo evolucionarán en el tiempo los procesos de acidificación y salinización, y cómo éstos han sido afectados por las acciones antrópicas (Rondón y Elizalde, 1994; Elizalde, 2011).

El sistema del caño Mánamo, después de la construcción de la represa Volcán, ha quedado parcialmente desconectado de la fuente de agua dulce y de los sedimentos del cauce natural del río Orinoco que lo originó. Pasó así a estar más afectado por las fluctuaciones de las mareas y menos por la acción fluvial, de manera que los suelos de la región quedaron expuestos a la salinización y acidificación. Esos procesos resultan de la interacción de los factores determinados por la condición propia del Delta Superior, que genera una dinámica hidrológica particular, según la cual sus componentes están sometidos a variaciones en sus formas químicas como resultado de la oxidación y reducción alternadas y frecuentes.

Las relaciones entre los factores, procesos y propiedades específicas de estos suelos, se evidencian por medio de un MPGM que expone, hipotéticamente, cómo la acción e interacción de diferentes factores conducen al estado actual y evolución de la acidificación y salinización de áreas del Delta Superior afectadas por el cierre del caño Mánamo.

¹El sistema pedogeomorfológico se define como una parte del ecosistema compuesta por rocas, regolitos, sedimentos, suelos y agua, cuyo ambiente está constituido por la atmósfera, la biósfera y la antropósfera. Sus componentes, aunque cambian a lo largo del tiempo, son más estables que los otros componentes del ecosistema.

Existe una literatura relativamente abundante que establece que el sistema del caño Mánamo, después de la construcción de la represa Volcán, ha sufrido salinización y acidificación; una síntesis de los efectos más importantes resultantes de los cambios químicos, físico-químicos, morfológicos e hidráulicos ocurridos, se encuentra en Rodríguez-Altamiranda (1999) y Monente y Colonnello (2004).

Las variaciones en los ambientes redox y en los procesos de salinización y acidificación de los componentes del sistema pedogeomorfológico, y también en los procesos de pérdidas y transformaciones, están condicionadas por los períodos húmedos y secos en las diferentes regiones del delta, así como por las altas temperaturas que se mantienen todo el año. Según Trujillo (1968), la zona estudiada corresponde al piso climático tierra caliente (piso megatérmico, 0 a 1.000 msnm, 28-20 °C). En la clasificación de Köppen la zona se puede ubicar entre tropical de sabana (AW) y tropical lluvioso (AF). Datos de evaporación indican que ésta aumenta en los meses más secos que son febrero, marzo y abril, con 268, 244 y 263 mm, respectivamente (Sánchez y Tocuyo, 2003). El promedio anual acumulado es de 1.900 mm. Estas altas tasas de evaporación, cuando coinciden con los meses de menor precipitación, favorecen el ascenso del agua intersticial de los suelos hacia la atmósfera en forma de vapor, lo que tiene una relación directa con los procesos químicos de salinización superficial que ocurren en el suelo. En la misma época ocurre el máximo estiaje del río Orinoco, lo cual favorece el desecamiento de los suelos y el ascenso capilar de la humedad. Paralelamente, la disminución del caudal fluvial, favorece la penetración más profunda de las mareas, lo cual también favorece la salinización (Colonnello, 2004). Estas variaciones climáticas anuales determinan una dinámica hidrológica específica del área deltaica, que ha sido descrita por Colonnello (2004). La temperatura media del delta de 27 °C, además de mantener activas las reacciones biogeoquímicas, determina la mayor o menor evaporación de las aguas acumuladas en las cubetas y caños, dadas las limitadas condiciones de drenaje motivados por el nivel de la napa freática (Trujillo, 1968). La precipitación anual varía entre 800 y 1600 mm en el Delta Superior y sobre los 1600 mm y 2000 mm en los deltas medio e inferior, respectivamente (Van Andel, 1967).

De acuerdo a Elizalde (2009 y 2011), los cambios en los atributos y estado de los materiales sólidos y líquidos de la fase superficial de ciclo

geológico ($d(\text{mslfscg})$), son expresados como una función del material de origen o parental (mo), condición del clima (cl), condición del relieve (r), características y actividades de la biota (b), tiempo de evolución (t) y actividades humanas (h), en un intervalo de tiempo (dt); así:

$$d(\text{mslfscg}) = f(\text{mo}, \text{cl}, \text{r}, \text{b}, \text{t}, \text{h}). dt. \quad (1)$$

De esa manera, el suelo, como parte de los materiales sólidos que intervienen en la fase superficial del ciclo geológico, expondrá en cualquier momento condiciones, morfología, características físicas, químicas, mineralógicas y físico-químicas que resultan de la pedogénesis controlada por la acción e interacción de los factores mencionados (Elizalde, 2009). Por otra parte, los factores que constituyen el segundo término de la expresión (1) son interdependientes, por lo cual, los cambios de cada uno de ellos a partir de sus estados iniciales, determinan cambios de todos los demás, como lo plantea Elizalde (2011):

$$d(\text{mo}) = f(\text{cl}, \text{r}, \text{b}, \text{h}). dt = \text{cambios en los materiales de origen} \quad (2)$$

$$d(\text{cl}) = f(\text{mo}, \text{r}, \text{b}, \text{h}). dt = \text{cambios en el clima} \quad (3)$$

$$d(\text{r}) = f(\text{mo}, \text{cl}, \text{b}, \text{h}). dt = \text{cambios en el relieve} \quad (4)$$

$$d(\text{b}) = f(\text{mo}, \text{cl}, \text{r}, \text{h}). dt = \text{cambios en la biota} \quad (5)$$

$$d(\text{h}) = f(\text{mo}, \text{cl}, \text{r}, \text{b}). dt = \text{cambios en las actividades humanas} \quad (6)$$

Las expresiones (2) hasta (6), aplicadas a las condiciones del delta del río Orinoco, permiten comprender que, a consecuencia del cierre del caño Mánamo (factor h), el efecto de las mareas ha llegado en forma más profunda hacia el interior del Delta Superior a través de este caño y sus afluentes inmediatos, donde previamente dominaba la acción fluvial (factor r), produciendo simultáneamente los cambios de los materiales de origen (mo) y biota (b).

Con base a los cambios producidos en las condiciones físicas, químicas, fisicoquímicas, mineralógicas y morfológicas de los suelos, con la consecuente generación de áreas de acidificación y salinización en zonas del Delta Superior del río Orinoco, como consecuencia del cierre del caño Mánamo, el objetivo de esta investigación es proponer un modelo pedogeomorfológico que

evidencie los factores y subfactores de estado que controlan el sistema deltaico y evaluar los procesos y sub-procesos pedogenéticos que han generado ambientes de acidez-redox-salinidad en el Delta Superior del río Orinoco.

MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo pedogeomorfológico del delta (MPGMD) se elaboró siguiendo el enfoque metodológico propuesto por Elizalde (2005), que se fundamenta, en parte, en propuestas de modelos pedogeomorfológicos precedentes (Elizalde y Jaimes, 1989; Fernández, 2001; Ospina, 2003; Elizalde y Daza, 2003a y b, López, 2004), así como en una concepción del suelo incluido dentro de la fase superficial del ciclo geológico (Elizalde *et al.*, 2007; Elizalde 2009 y 2011). Con información de la literatura sobre los diferentes factores de estado, sus interrelaciones y su relevancia en el sistema pedogeomorfológico del Delta Superior del Orinoco, se identificaron los sub-factores de estado relevantes, las cualidades de esos sub-factores y las características que permiten evaluarlos. Para la identificación se consideró el grado de importancia sobre los procesos involucrados en la salinización y acidificación, si existe información sobre esos factores en la zona y si los mismos presentan variabilidad de valores o valores críticos, como se indica en el Cuadro 1.

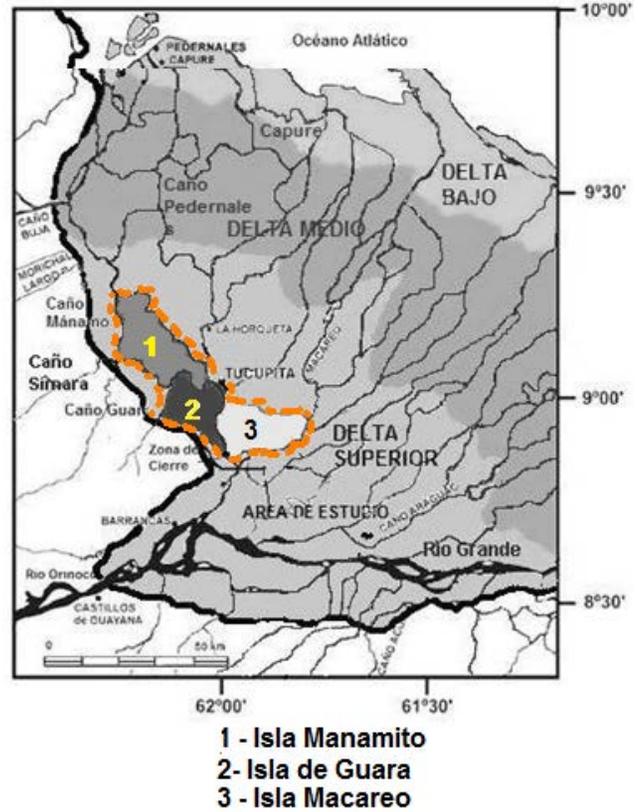
Seguidamente, a partir de la información proveniente de las observaciones en campo y a la caracterización morfológica, física, química y mineralógica de los suelos del área sobre 9 pedones representativos, se identificaron los procesos que explican las características particulares de los suelos y que los definen con un grado de acidez y salinidad en un ambiente dinámico, donde la alteración de un factor puede generar variación en los procesos y, por ende, en las características físicas, químicas y biológicas de los suelos, variando a su vez su acidez y salinidad.

La investigación se realizó en áreas agrícolas adyacentes al caño Mánamo, en el tramo entre Coporito y caño Iglesias, en las islas Manamito, Guara y Macareo, en el Delta Superior del Orinoco, entre las coordenadas: latitud Norte $8^{\circ}45'$ y $9^{\circ}15'$ longitud Oeste $62^{\circ}25'$ y $62^{\circ}00'$ (Figura 1). Se seleccionaron suelos en posiciones de cubeta y dique, aguas abajo y arriba del cierre, con variados niveles de inundación e incidencia de mareas en los períodos lluvioso y seco.

Clasificados los paisajes según Elizalde (2011) hasta las categorías Tipos de relieve y Formas de terreno, se ubicaron los sitios de muestreo, según la topografía y geomorfología antes y después del cierre, así como el análisis de transectas, para ubicación de pedones representativos y selección de las calicatas (Cuadro 2; Figura 2) para la caracterización y muestreo, siguiendo el Manual de Descripción de Perfiles de la FAO (2006).

La distribución de tamaño de partículas se determinó por el método de la pipeta (Loveland y Whalley, 1991). El carbono orgánico total por Anderson e Ingram (1993). El pH se midió con pHmetro en pasta y en extracto de saturación, también se midió el pH en el campo (USDA, 1999). El sodio (Na^+) por absorción atómica, la conductividad eléctrica con conductímetro y el potencial redox con el electrodo de platino. Siguiendo a Richards (1954), se determinó la concentración de sulfatos (SO_4^{2-}) por turbidimetría, calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) con versenato, cloruros (Cl^-) por titulación con nitrato de plata (AgNO_3); carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-) por titulación con ácido sulfúrico (H_2SO_4). El hierro reducido (Fe^{2+}) se analizó por absorción atómica. Se detectó pirita y yeso por observación en campo y lupa de mano. Por difracción de rayos X se determinó la mineralogía de la fracción arcilla y se confirmó la presencia de pirita y yeso. Se realizó la comparación descriptiva de grupos de suelos u horizontes, en cuanto a las características determinadas cuantitativamente, interpretando los parámetros estadísticos como índices de variabilidad. Los rangos de valores altos, medios y bajos de la concentración promedio de cada especie química, se estableció por la significancia estadística de dichos valores. Se determinó, además, la diferencia entre medias, con la prueba t de medias, y con la prueba de

Kruskal-Wallis se estimó la homogeneidad de grupos de suelos u horizontes en cuanto a las características físicas y químicas analizadas. Seguidamente, con base a las descripciones y medidas de campo y los análisis de laboratorio, se estableció el balance pedogeomorfológico cualitativo de cada sitio de muestreo, según la propuesta de Elizalde y Jaimes (1989).



Fuente: Warne *et al.* (2002) con modificaciones de Maza (2010)

Figura 1. Delimitación del área de estudio que comprende las islas Manamito, Guara y Macareo en el Delta Superior del río Orinoco, Venezuela.

Cuadro 1. Criterios para identificar factores relevantes, sub-factores, cualidades relevantes y características o indicadores para evaluar la salinización y acidificación de los suelos deltaicos, Venezuela.

Efecto sobre los procesos estudiados	Hay información disponible o se puede obtener		No existe información y no se puede obtener
	Existencia de gran variabilidad de valores o de valores críticos en la zona estudiada	Relevancia	
Importante	Frecuentes	Muy relevante	
	Poco frecuentes	Relevante	
	Raros o inexistentes	Poco relevante	
Moderado	Frecuentes	Relevante	No relevante
	Poco frecuentes		
	Raros o inexistentes	Poco relevante	
Ligero o no detectable	Frecuentes		
	Poco frecuentes	No relevante	
	Raros o inexistentes		

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De la clasificación de los paisajes del área de estudio, resultó que la zona se encuentra íntegramente en la sub-provincia fisiográfica Delta Superior de Tucupita (Cuadro 3a). El paisaje estudiado a nivel 5 (escala 1: 100.000), corresponde a la unidad litogeomorfológica sedimentaria del caño Mánamo Superior (islas Guara y Manamito) y la unidad litogeomorfológica sedimentaria del caño Macareo Superior (isla Macareo).

Se consideró que, si bien ambos sectores responden a las condiciones hidrodinámicas y sedimentarias del ambiente fluvial deltaico, las características específicas de cada uno de ellos determinadas por los respectivos caudales, orientación y patrón de las ramificaciones, indica que se trata de sistemas sedimentarios distintos. Dentro de ellos se reconocen los relieves de cubetas, napas y diques (nivel 7, escala 1: 25.000) y en las primeras, las formas de terreno altas y bajas (nivel 8, Cuadro 3b). Los suelos de cubeta aguas abajo del cierre mostraron evidente variabilidad vertical y horizontal, alternancia de estratos orgánicos y minerales, agrietamiento en los niveles menos orgánicos y pirita en estratos orgánicos profundos; mientras que los suelos de los diques y de la cubeta aguas arriba del cierre tienen menos variabilidad vertical.

El balance pedogeomorfológico que caracteriza a los paisajes representados por los sitios de muestreo a nivel de formas de terreno (nivel 8 del sistema de clasificación de paisajes) se muestra en el Cuadro 4. De acuerdo a la interpretación de la información de campo y laboratorio recabada, en el área predominan las ganancias y las transformaciones, prevaleciendo las primeras sobre las segundas en las

Cuadro 2. Ubicación e identificación de las calicatas en los suelos estudiados en el Delta Superior del río Orinoco, Venezuela.

Suelos aguas abajo del cierre del caño Mánamo		Suelos aguas arriba del cierre del caño Mánamo	
Posición y ubicación Cubeta	Posición y ubicación Dique	Posición y ubicación Cubeta	Posición y ubicación Dique
1CAGUA: Cubeta alta, San Carlos, Guara. 10 horizontes		8CAMAC: Cubeta alta, Guacasia, Macareo. 6 horizontes	7DMAC: Dique, Guacasia, Macareo. 7 horizontes
2CBGUA: Cubeta baja, San Carlos, Guara. 9 horizontes			
4CAGUA: Cubeta alta, CEIPA, Guara. 10 horizontes	3DGUA: Dique, CEIPA, Guara. 6 horizontes		
5CAMAN: Cubeta alta, San Isidro, Manamito. 9 horizontes	6DMAN: Dique, San Isidro, Manamito. 5 horizontes		
9CBMAN: Cubeta baja, caño Iglesias, Manamito. 9 horizontes			

1 a 9: orden de muestreo de las calicatas; CA, CB y D: suelos de Cubeta Alta, Baja y Dique, respectivamente. GUA, MAN y MAC: Islas Guara, Manamito y Macareo, respectivamente.

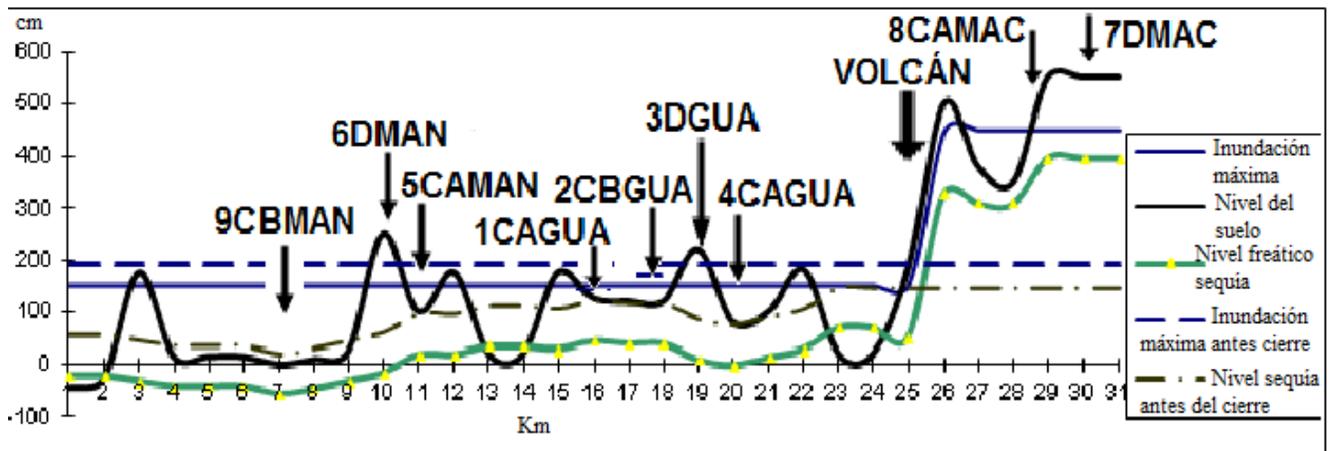


Figura 2. Esquema de la ubicación relativa de los sitios de muestreo.

cubetas ubicadas aguas abajo del cierre y ambas se estiman como de similar importancia en los diques y en la cubeta ubicada aguas arriba de la represa Volcán (Maza, 2010).

La fracción arcilla de todos los suelos es dominada por caolinita, cuarzo, moscovita, clorita, vermiculita y esmectita, por ser suelos muy jóvenes derivados de sedimentos de una cuenca altamente meteorizada. Los suelos de cubeta aguas abajo del cierre presentan jarosita y algunos contienen yeso, bayerita e interstratificaciones de clorita-vermiculita; mientras que la cubeta aguas arriba no presenta ninguno de estos minerales. En los diques, los suelos tienen lepidocrocita, y al igual que la mayoría de los

suelos de cubeta aguas abajo del cierre, tienen clorita.

En casi todas las muestras el pH determinado *in situ* (Figura 3, línea de triángulos) resultó más bajo que el pH en pasta saturada (línea de rombos) y en el extracto de saturación (línea de cuadrados). En los suelos 1CAGUA, 2CBGUA y 4CAGUA (muestras 1-29, Figura 3) no hay diferencias estadísticas entre las medias; mientras que 5CAMAN, 3DGUA, 6DMAN, 8CAMAC y 7DMAC (muestras 30-38 y 47-70, Figura 3) tienen pH en el extracto, estadísticamente mayor, que en pasta. El suelo 9CBMAN (muestras 39-46, Figura 3), tiene pH en el extracto estadísticamente menor que en pasta, atribuible a que su menor contenido de vermiculita y

Cuadro 3a: Unidades de paisaje en el Delta Superior del Orinoco, categorías 1 hasta 4 del sistema de Elizalde (2011)

Categorías 1 hasta 4	Código de identificación	Unidades de paisajes
1. Megarregión	A	Cuencas Sedimentarias de Venezuela
2. Región Fisiográfica	AD	Región Deltaica
3. Provincia Fisiográfica	ADT	Planicie Deltaica de Tucupita
4. Subprovincia Fisiográfica	ADTS	Delta Superior de Tucupita

Cuadro 3b: Clases de las unidades de paisaje en el Delta Superior del Orinoco, categorías 5 hasta 8 del sistema de Elizalde (2011).

Categorías 5 hasta 8			
5	6	7	8
Unidades Litogeomorfológicas	Tipos de Paisajes	Tipos de Relieves	Formas de terreno
			ADTSMBCA
	ADTSMB Bajíos del caño Mánamo Superior	ADTSMBC Cubetas de Bajíos del caño Mánamo Superior	Cubetas altas de Bajíos del caño Mánamo Superior
			ADTSMBCB
			Cubetas bajas de Bajíos del caño Mánamo Superior
ADTSM Unidad Litogeomorfológica Sedimentaria del caño Mánamo Superior		ADTSMOE Diques fluviales de Bancos del caño Mánamo Superior	
	ADTSMO Bancos del caño Mánamo Superior	ADTSMON Napas fluviales de Bancos del caño Mánamo Superior	
	ADTSCB Bajíos del caño Macareo Superior	ADTSCBC Cubetas de Bajíos del caño Macareo Superior	ADTSCBCA Cubetas altas de Bajíos del caño Macareo Superior
ADTSC Unidad Litogeomorfológica Sedimentaria del caño Macareo Superior		ADTSCOE Diques fluviales de Bancos del caño Macareo Superior	
	ADTSCO Bancos del caño Macareo Superior	ADTSCON napas fluviales de Bancos del caño Macareo Superior	

esmectita, sugiere menor capacidad para retener hidronios que los suelos con mayor diversidad de minerales con carga negativa, como el grupo arriba mencionado. También se encontró que el coeficiente de correlación lineal entre conductividad eléctrica y pH, $r = -0,74$. Es decir, los suelos de mayor salinidad son los de cubeta aguas abajo del cierre, con mayor grado de acidez, respecto a los suelos de dique o cubeta aguas arriba del cierre.

Los resultados sugieren una relación entre las características fisicoquímicas de los suelos y las cantidades de agua que ellos retienen (Maza *et al.*, 2011a,b). El nivel del agua en las cubetas aguas abajo del cierre varía diariamente con las mareas y estacionalmente con el agua fluvial y pluvial. En el período de lluvias la lámina de agua sobre la superficie del suelo varía de 20 a 150 cm, lo cual incide en el tiempo de inundación, generando, independientemente de la textura y la composición mineral u orgánica, Eh (potencial de óxido reducción) negativos que cambian a positivos en los horizontes superiores, que quedan por encima del nivel freático durante la época seca. Así, en ciertos ambientes de los suelos estudiados, se dan las condiciones termodinámicas para la reducción de $Fe(OH)_3$ a Fe^{2+} , SO_4^{2-} a H_2S y CO_2 a CH_4 . En presencia de microorganismos anaeróbicos reductores específicos y los pH adecuados, dichas reacciones ocurrirán en los horizontes con los potenciales redox requeridos.

En el Cuadro 5 se muestran los valores de los potenciales redox del extracto de saturación de los horizontes de los suelos estudiados. La evaluación de las reacciones redox en los suelos deltaicos, según la relación de los parámetros Eh/pH (White, 2007; Schlesinger, 2000, Vorenhout *et al.*, 2004), controlados por los cambios de nivel de las aguas y el

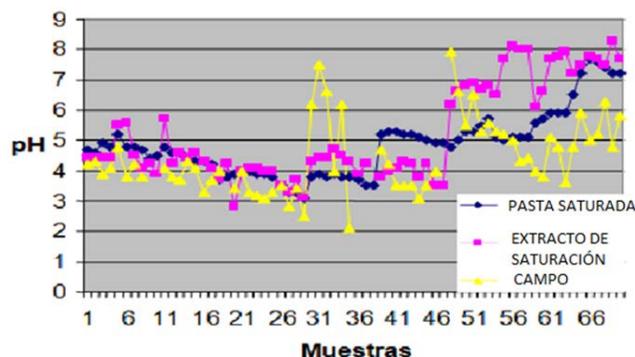


Figura 3. Variación del pH en los suelos en el Delta Superior del río Orinoco, Venezuela.

Cuadro 4. Balance pedogeomorfológico para las formas de terreno consideradas en el Delta Superior del río Orinoco, Venezuela.

Posición geomorfológica (forma de terreno)	Pedones representativos	Balance pedogeomorfológico
ADTSMBCA: Cubeta alta aguas abajo del cierre del caño Mánamo	1CAGUA: Cubeta alta en sector San Carlos, Isla Guara 4CAGUA: Cubeta alta en sector CEIPA, Isla Guara 5CAMAN: Cubeta alta en sector San Isidro, Isla Manamito	$G > T > P$; $G \gg P$
ADTSMBCB: Cubeta baja aguas abajo del cierre del caño Mánamo	2CBGUA: Cubeta baja en sector San Carlos, Isla Guara 9CBMAN: Cubeta baja en sector caño Iglesias, Isla Manamito	$G \gg T > P$; $G \gg \gg P$
ADTSCBCA: Cubeta alta aguas arriba del cierre del caño Mánamo.	8CAMAC: Cubeta alta en sector Guacasia, Isla Macareo	$G \approx T \gg P$
ADTSMOE: Dique aguas abajo del cierre del caño Mánamo.	3DGUA: Dique en sector CEIPA, Isla Guara 6DMAN: Dique en sector San Isidro, Isla Manamito	$G \approx T > P$
ADTSCOEE: Dique aguas arriba del cierre del caño Mánamo.	7DMAC: Dique en sector Guacasia, Isla Macareo	

1 a 9: orden de muestreo de las calicatas; CA, CB y D: suelos de Cubeta Alta, Baja y Dique, respectivamente. GUA, MAN y MAC: Islas Guara, Manamito y Macareo, respectivamente. G, T y P: Ganancias, transformaciones y pérdidas, respectivamente. ADTSMBCA etc. son los códigos de identificación de los paisajes clasificados a los niveles 7 y 8 (Cuadro 3b).

balance entre ingresos de aguas dulces (fluvial y pluvial) y salobres (mareas), conduce a identificar cuatro ambientes con diferentes relaciones de Eh/pH (Cuadro 6). Éstos son: ácido-oxidante (G1), con $\text{pH} < 5$ y $50 < \text{Eh} < 200$ mV; ácido-reductor (G2), también con $\text{pH} < 5,0$ y $-50 > \text{Eh} > -250$ mV; no ácido-oxidante (G3), con $\text{pH} \geq 5,5$ y $100 < \text{Eh} < 200$ mV y no ácido-reductor (G4), con $\text{pH} > 7$ y $-50 > \text{Eh} > -200$ mV. G2 y G4 corresponden respectivamente a los horizontes inferiores de los suelos de cubeta, aguas abajo y arriba del cierre, saturados casi todo el año; mientras que G1 se encuentra en los estratos superiores de los suelos de cubeta aguas abajo del cierre, con variaciones en el año del nivel de la mesa de agua. Los suelos cuyos horizontes homogéneamente pertenecen a G3 son aireados durante el año o gran parte de éste (Maza, *et al.* 2011a,b).

La estabilidad de los minerales puede ser afectada por las condiciones redox y de acidez del suelo (Cuadro 6). La pirita se encuentra solamente en G2 que permanece en condiciones reductoras casi todo el año, donde este mineral puede mantenerse sin alterarse o incluso puede formarse (Bush y Sullivan, 1999; Hussein y Rabenhorst, 1999). G1, drenado para el momento de la caracterización y muestreo de las calicatas, mientras estuvo sumergido pudo recibir sulfuros movidos en suspensión desde los horizontes profundos a través de las grietas, o G1 pudo ser ambiente para la formación de pirita, pero al drenar y pasar a condiciones aeróbicas, esa pirita pudo oxidarse (White, 2007; Sahrawat, 2005). Formándose así iones Fe^{3+} , SO_4^{2-} , H^+ , que de acuerdo a sus concentraciones relativas formarían suelos sulfato ácidos o reaccionarían con otros iones produciendo en G1

minerales como jarosita ($\text{KFe}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Lepidocrocita ($\gamma\text{-FeO}(\text{OH})$) y goethita ($\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$) se encuentran en G3 por tratarse de oxihidróxidos con hierro en su estado oxidado. Bayerita ($\alpha\text{-Al}(\text{OH})_3$) y gibbsita ($\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$), se encuentran en G1 porque se requieren condiciones ácidas para que se generen iones Al^{3+} para formar estos minerales, aunque su estabilidad no depende del Eh, razón por la cual la bayerita también se encuentra en G2. Los feldspatos ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, KAlSi_3O_8), minerales primarios frecuentes en los suelos, se encuentran en G1 y G3, porque, siendo heredados, no ha transcurrido suficiente tiempo para su alteración.

Baumita ($(\text{Mg},\text{Al},\text{Mn},\text{Zn},\text{Fe})_3(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), sólo se consigue en G1, seguramente debido a características particulares de los sedimentos que allí llegan, por pertenecer a la unidad litogeomorfológica sedimentaria del caño Mánamo Superior. En G1, G3 y G4 se encuentra nimita ($(\text{Ni},\text{Mg},\text{Al})_6(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$), sugiriendo que su estabilidad, a diferencia de la clorita ferrosa, no es muy afectada por la relación Eh/pH. Ello debido quizá a que de los elementos que constituyen la nimita, el níquel es el único de carga variable, pudiendo tener estado de oxidación de +3 en G1 y +2 en G4. Finalmente, birnesita ($(\text{Na},\text{Ca})_{0,5}(\text{Mn}^{+4},\text{Mn}^{+3})_2\text{O}_4 \cdot 1,5 \text{H}_2\text{O}$), presente en G3 donde probablemente el manganeso domina en su estado de oxidación +4. La cantidad de calcita en G2 seguramente es ínfima en razón a su poca estabilidad en medio ácido. De acuerdo a las altas cantidades de pirita en los horizontes orgánicos profundos de los suelos de cubeta y partiendo de la explicación sobre el posible origen de la jarosita en estos suelos, se esperaría una mayor concentración del mineral, pero

Cuadro 5. Potencial redox (mV) en el extracto de saturación en los horizontes de los suelos en el Delta Superior del río Orinoco, Venezuela.

Horizontes	Suelos aguas abajo del cierre del caño Mánamo						Suelos aguas arriba del cierre del caño Mánamo		
	Cubetas			Diques			Cubeta	Dique	
	1CAGUA	2CBGUA	4CAGUA	5CAMAN	9CBMAN	3DGUA	6DMAN	8CAMAC	7DMAC
1	159,8	159,3	66,1	167,8	168,4	201,5	131,5	167,5	145,3
2	140,8	154,2	72,2	169,5	165,2	187,6	127,5	150,1	158,2
3	149,8	150,1	59,1	177,4	158,1	178,9	133,1	-93,1	134,5
4	138,1	155,1	60,1	173,1	152,9	168,1	128,9	-178,1	133,9
5	142,8	173,7	-58,1	-153,2	108,6	167,1	130,1	-119,3	125,6
6	165,8	161,5	-62,3	-147,3	-43,7	154,3	-	-	124,5
7	163,7	-54,6	-70,1	-128,2	-53,2	-	-	-	126,2
8	-219,7	152,3	-55,2	-	-122,3	-	-	-	-
9	-217,6	-	-	-	-249,5	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-

quizá la jarosita no es tan estable para mantenerse en estos ambientes y pudiera evolucionar hacia otros minerales. Otra posible explicación sería que la pirita se forma en cantidades mayores en los horizontes profundos en condiciones reductoras permanentes; luego, en los horizontes superiores, donde se altera a jarosita, las cantidades iniciales de pirita eran bajas, por lo tanto se forman pequeñas cantidades de jarosita a sus expensas. También, si se ha movido pirita en suspensión a los horizontes superiores, por su baja solubilidad, sólo se movería una muy pequeña cantidad de este mineral.

El MPDGD expone cómo la acción e interacción de diferentes factores conduce al estado actual y evolución de la acidificación y salinización en áreas del Delta Superior afectadas por el cierre del caño Mánamo. Se identifican los factores relevantes y muy relevantes, sus cualidades y características o indicadores adecuados, siguiendo los criterios anteriormente señalados (Cuadro 1). El resultado de

ese procedimiento se muestra en el Cuadro 7. Se consideró que la presencia o ausencia de estratos sedimentarios orgánicos, con pirita, porosos y permeables y la composición de esos estratos (contenido de materia orgánica y de pirita) son características relevantes o muy relevantes relacionadas con la estructura, la composición y la permeabilidad de los materiales de origen de los suelos y sedimentos. Del factor relieve se ponderaron como relevantes y muy relevantes los sub-factores forma del terreno y la altura relativa. La identificación de cubetas altas o bajas y de diques, la estimación del balance pedogeomorfológico y la relación entre ambientes confinados o propicios a la lixiviación fueron los indicadores seleccionados para el sub-factor forma del terreno. De las condiciones climáticas, se consideraron relevantes la estacionalidad de las precipitaciones y de la evaporación, mientras que el factor biota se vinculó a la condición redox del ambiente y desarrollo de reacciones biogeoquímicas de oxidación o de reducción. En relación a las

Cuadro 6. Minerales de la fracción arcilla cuya estabilidad depende de la relación Eh/pH del ambiente del suelo en el Delta Superior del río Orinoco, Venezuela.

Horizonte	Suelos aguas abajo del cierre del caño Mánamo								Suelos aguas arriba del cierre del caño Mánamo	
	Cubetas					Diques			Cubeta	Dique
	1CAGUA	2CBGUA	4CAGUA	5CAMAN	9CBMAN	3DGUA	6DMAN	8CAMAC	7DMAC	
1	Jarosita Bayerita Gibbsita					Lepidocrocita Feldespato	Lepidocrocita Feldspatos Jarosita		Lepidocrocita	
2			Jarosita Bayerita Gibbsita Feldespato			Lepidocrocita Feldespato Goethita	Jarosita Feldespato Birnesita Nimita	Nimita		
3		Jarosita Bayerita Gibbsita Baumita	Jarosita Bayerita Gibbsita Feldespato	Jarosita Yeso Feldespato		Feldespato Goethita	Lepidocrocita Birnesita Nimita	Nimita		
4		Jarosita Bayerita Gibbsita Baumita			Nimita Calcita Yeso Jarosita	Goethita	Lepidocrocita Birnesita Nimita	Nimita		
5	Jarosita Bayerita Gibbsita			Jarosita Yeso	Nimita Calcita Yeso Jarosita		Birnesita Nimita			
6	Jarosita			Feldespato Bayerita						
7		Pirita		Pirita	Pirita					
8										
9	Pirita									
G1 ácido oxidante G2 ácido reductor G3 no ácido oxidante G4 no ácido reductor										

actividades humanas, se seleccionó como indicador la ubicación de los sitios en posición aguas arriba o aguas abajo respecto a la represa Volcán. Con respecto al factor tiempo, los indicadores seleccionados fueron si los horizontes están o no expuestos a la acumulación de sedimentos (horizontes superficiales o profundos) y si los sitios corresponden a relieves estables o no.

En el MPGMD que se propone (Figuras 4a y 4b) la línea superior contiene los factores de estado y hacia abajo (con fondo gris), los sub-factores, que muestran los aspectos relevantes de las características del sistema modelado. En general son cualidades de los factores que determinan, mediante su interacción, el desarrollo de las condiciones para los procesos fundamentales de los suelos deltaicos. Se plantea que estos factores determinan el nivel de inundación que caracteriza a cada sitio. Este nivel y sus fluctuaciones diarias y estacionales, afectadas por el cierre del caño

Mánamo, constituyen, junto con el relieve, los principales atributos que controlan los procesos que determinan el grado de acidificación y la acumulación de sales que conduce a diferentes clases de salinidad (Porta *et al.*, 1999). Se llega así a suelos o grupos de horizontes, con determinado balance ganancia/pérdida de materia orgánica (MO), contenidos de carbono de los ácidos húmicos (C-AH) y fúlvicos (C-AF) específicos de cada condición, donde predomina una actividad microbiana aeróbica o anaeróbica (según el nivel de inundación) que influye sobre el potencial redox. La interacción de esos factores y los procesos que ellos condicionan explican la existencia de los cuatro ambientes de acidez-redox-salinidad encontrados.

En el ambiente ácido-oxidante G1, de los horizontes superiores de los suelos de cubeta, aguas abajo de la Represa Volcán (Figura 4a), se integran los factores y subfactores de estado que conllevan a la

Cuadro 7. Factores relevantes, sub-factores, cualidades relevantes y características o indicadores para estudiar la salinización y acidificación de los suelos deltaicos, Venezuela.

Factor	Sub-factor	Cualidad	Característica	Rel.
Material de origen	Estructura	Estratificación	Presente/ Ausente	MR
	Composición	Presencia de estratos orgánicos	Presente/ Ausente	MR
		Presencia de pirita	Presente/ Ausente	R
	Permeabilidad	Permeabilidad/ Granulometría/composición	Permeabilidad Alta/moderada/baja	MR
Relieve	Forma del terreno	Cóncava	Cubeta	MR
		Convexa	Dique	MR
		Balance pedogeomorfológico	$G \approx T > P$	R
			$G > T > P / G >> T > P$	R
	Confinamiento/lixiviación	confinamiento < lixiviación	R	
		confinamiento > lixiviación	R	
		confinamiento >> lixiviación	MR	
	Altura relativa	Dominada	Bajas: Ingreso de las mareas importante	MR
			Altas: Ingreso de las mareas poco importante	MR
Dominante		Sin ingreso de mareas	R	
Clima	Precipitación	Estacionalidad	Lluvia presente/ausente	MR
	Evaporación	Estacionalidad	Alta/baja	R
Biota	Micro biota	Condición redox	Oxidación	MR
			Reducción	MR
Actividades humanas	Represa Volcán	Posición del sitio	Aguas arriba/ Aguas abajo	MR
Tiempo	Balance morfodinámico	Acumulación de sedimentos	Expuesto	MR
			No expuesto	R
		Estabilidad del relieve	Estable/ No estable	R

Rel.: relevancia; MR: muy relevante; R: relevante. G, T, P: ganancias, transformaciones y pérdidas, respectivamente.

condición actual de acidez y salinidad de G1. El ingreso de MO es relativamente alto, el potencial redox es positivo y ello explica que se encuentre jarosita y yeso como minerales sintetizados durante la pedogénesis. Se genera un ambiente de suelos con altos contenidos relativos de Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} y Cl^- y muy bajas concentraciones de HCO_3^- , produciéndose un ambiente ácido ligeramente salino, debido a que las fluctuaciones del nivel de agua por efecto fluvial y por la marea, determinan la alternancia de períodos de humedecimiento y secado en un estado de equilibrio después del cierre, que se mantiene en el tiempo, si no se producen fuertes perturbaciones antrópicas.

El ambiente ácido-reductor G2 (Figura 4a) de estructura similar a G1, refiere a los horizontes profundos de los mismos suelos, con baja ganancia/pérdida relativa de MO, altos contenidos

relativos de C-AH y C-AF, predominio de actividad microbiana anaeróbica que favorece la reducción, potencial redox negativo y pirita como mineral característico. Se produce un ambiente de suelos con altos contenidos relativos de iones Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} y Cl^- y muy bajas concentraciones de HCO_3^- , generando, al igual que en G1, acidez alta y salinidad ligera; condiciones estables en el tiempo, si no se producen importantes perturbaciones antrópicas que aceleren la oxidación de la pirita, con el consecuente aumento de la acidez y liberación de sales que aumenten la salinidad.

En el ambiente no ácido-oxidante G3 (Figura 4b), de todos los horizontes de los diques y los horizontes superiores de la cubeta, aguas arriba del cierre, la acción de las mareas es poco importante y la fluctuación estacional del agua por régimen fluvial no conlleva a importantes períodos de inundación, pero sí

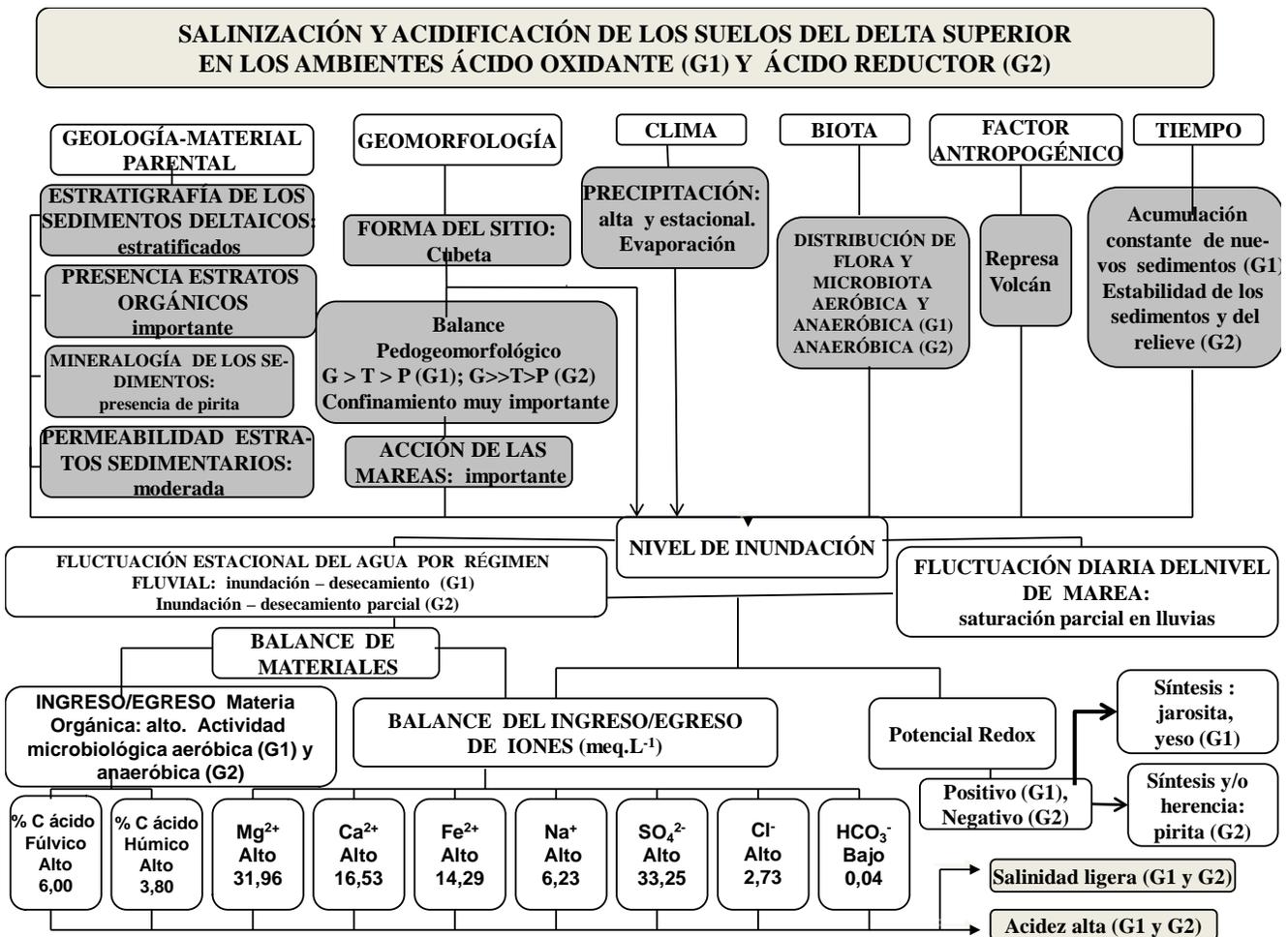


Figura 4a. Modelo pedogeomorfológico en el Delta Superior del río Orinoco, Venezuela, aguas abajo de la Represa Volcán, en ambiente ácido.

a la deposición de nuevos sedimentos gruesos en superficie. Hay bajo ingreso/egreso relativo de MO con moderado y bajo contenido relativo de C-AF y C-AH, respectivamente. La actividad microbiana aeróbica favorece la oxidación, potencial redox positivo y presencia de oxihidróxidos con hierro en su estado oxidado, como lepidocrocita y goethita. Con frecuencia la lepidocrocita ha sido reportada en suelos imperfectamente drenados, pero también se ha encontrado, como en este caso, en suelos bien drenados con Eh positivo y pH cercano a la neutralidad (Schwertmann y Taylor, 1989; Allen y Hajek, 1989). G3 tiene altas concentraciones relativas de iones Na^+ y HCO_3^- , moderada concentración relativa de Mg^{2+} y Ca^{2+} y bajas de Fe^{2+} , SO_4^{2-} y Cl^- . Lo que conduce a un ambiente de suelo no ácido de baja salinidad. Debido a la poca acción de las crecidas fluviales y la escasa o ninguna acción de las mareas; características de acidez y salinidad que deben ser estables en el tiempo.

En G4 (Figura 4b), formado por los horizontes profundos del suelo de cubeta aguas arriba del cierre, la acción de las mareas es poco importante por la fuerte corriente fluvial que genera períodos de inundación en un suelo que no era inundable antes del cierre del caño Mánamo. Hay bajo ingreso/egreso relativo de MO con alto y bajo contenido de C-AF y C-AH, respectivamente. La actividad microbiana anaeróbica favorece la reducción y un potencial redox negativo. Se encuentran concentraciones altas relativas de Na^+ y HCO_3^- , moderada de Mg^{2+} y Ca^{2+} y bajas de Fe^{2+} , SO_4^{2-} y Cl^- . Lo que conduce a un ambiente de suelo no ácido de baja salinidad, estable en el tiempo, por ser horizontes profundos que permanecen inundados buena parte del año, donde aún ocurriendo perturbaciones profundas, no se esperarían cambios importantes debido a la ausencia de minerales que conlleven a una alteración fisicoquímica del ambiente.

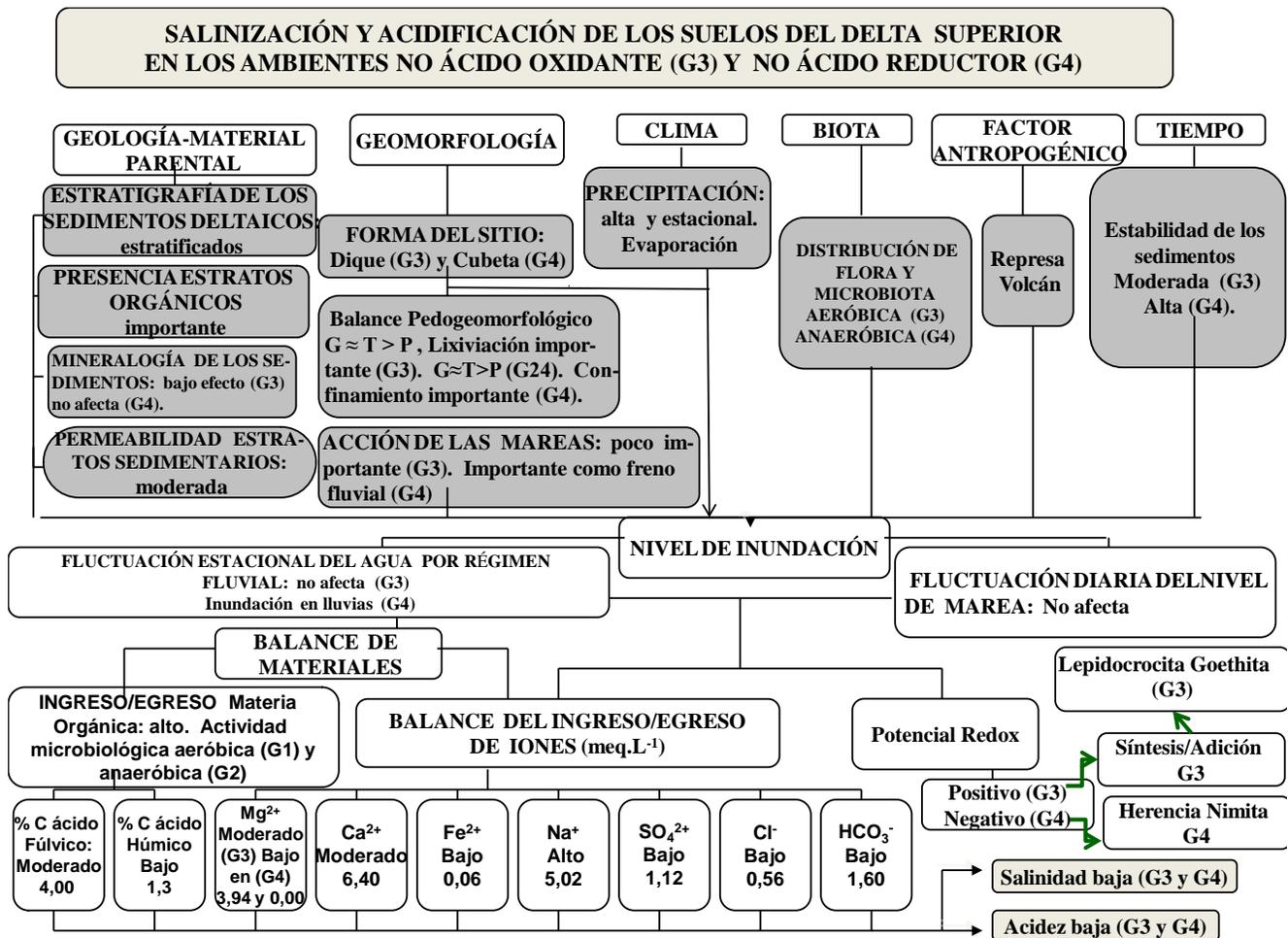


Figura 4b. Modelo pedogeomorfológico en el Delta Superior del río Orinoco, Venezuela, aguas abajo y arriba de la Represa Volcán, en ambientes no ácidos.

El modelo evidencia que los principales procesos que determinan las características distintivas de estos cuatro ambientes se relacionan con el nivel de las inundaciones diarias y estacionales producidas por flujo fluvial, la alternancia de las mareas y la naturaleza mineral y orgánica de los materiales sedimentarios que originaron los suelos. La separación de los ambientes de acidez-redox-salinidad se fundamenta en la relación pH/Eh y conductividad eléctrica; determinados por los procesos antes referidos, como resultado de la acción e interacción de los factores y subfactores de estado mencionados. Si el suelo es homogéneo respecto a estas características a través del perfil, mostrará el mismo ambiente de acidez-redox-salinidad en todos sus horizontes. Si el suelo muestra variabilidad significativa de las características fisicoquímicas referidas, con la profundidad, se diferenciarán ambientes en un mismo suelo y entre suelos.

CONCLUSIONES

El MPGM del Delta Superior del Orinoco, evidencia los factores y sub-factores de estado que controlan el sistema deltaico e identifica cuatro ambientes de acidez-redox-salinidad en las áreas afectadas por el cierre del caño Mánamo. Se infiere cómo han ocurrido los procesos de acidificación y salinización y se pronostica su evolución en el tiempo. Aguas abajo del cierre del caño Mánamo, se identifican las cubetas constituidas por los ambientes de salinidad ligera, ácido-oxidante (G1) y ácido-reductor (G2).

La condición de estas zonas sólo podría alterarse por manejos profundos que liberen piritita a los ambientes aeróbicos de los suelos. Las otras zonas, formadas por los ambientes de baja salinidad, no ácido-oxidante (G3) y no ácido-reductor (G4), corresponden a los suelos de dique aguas arriba y abajo del cierre, así como la cubeta aguas arriba. Su condición es estable en el tiempo. Las variaciones constatadas en la intensidad de los procesos de acidificación dependen de los niveles de inundación, del contenido de materia orgánica superficial, los que han sido modificados por el cierre del caño Mánamo y también dependen de los materiales originarios.

En las áreas aguas abajo del cierre existe alta potencialidad para la formación de suelos sulfato ácidos con valores de pH muy bajos y donde también es posible la acidificación de la superficie del suelo al elevarse la mesa de agua. La fuente de acidez en G1,

proviene de la descomposición de la materia orgánica y de la oxidación de la piritita y/o sulfuros de hierro; mientras que en G2, la acidez proviene de la acumulación de H₂S y materia orgánica, por la lenta descomposición de ésta por agentes oxidantes como sulfatos e hidróxidos férricos. Es decir, que la acidez de G2, se relaciona más con la composición de sus estratos que con los efectos del cierre, que no son muy marcados a esa profundidad. Este sistema de separación de ambientes de suelos, resulta útil para estudios de pedogénesis, manejo de suelos con diferentes fines y caracterización de suelos con dinámicas hidromórficas variables en el año.

LITERATURA CITADA

- Allen, B. L. and B. F. Hajek. 1989. Mineral occurrence in soil environments. *In*: J. B. Dixon y S. B. Weed (ed.). Minerals in soil environments. SSSA Book Ser. 1. Madison, Wisconsin, USA. p. 200-278.
- Anderson, J. M. and J. S. Ingram. 1993. Tropical soil biology and fertility: A Handbook of methods. CAB International. Wallingford, United Kingdom. 62 p.
- Bush, R. T. and L. A. Sullivan. 1999. Pyrite micromorphology in three Australian Holocene sediments. *Australian Journal of Soil Research* 37 (4): 637-654.
- Colonnello, G. 2004. Las planicies deltaicas del Río Orinoco y Golfo de Paria: aspectos físicos y vegetación. Capítulo 1. *In*: C. A. Lasso, L. E. Alonso, A. L. Flores y G. Love. (eds.). Evaluación rápida de la biodiversidad y aspectos sociales de los ecosistemas acuáticos del delta del Río Orinoco y Golfo de Paria, Venezuela. Boletín RAP de Evaluación Biológica 37. Conservación Internacional. Washington DC, USA. P. 37-54.
- Elizalde, G. 2005. Desarrollo de un enfoque metodológico para el estudio de sistemas pedogeomorfológicos y de los suelos como componentes de los paisajes. Trabajo de ascenso a la categoría de profesor Titular, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, 50 p.
- Elizalde, G. 2009. El suelo en la fase superficial del ciclo geológico. *Geoenseñanza* 14 (2): 265-292.
- Elizalde, G. 2011. Clasificación sistemática de categorías de paisajes. Propuesta de un marco conceptual. *Venezuelos* 19 (1): 23-43.

- Elizalde, G. y E. Jaimes. 1989. Propuesta de un modelo pedogeomorfológico. *Revista Geográfica Venezolana* 30: 5-35.
- Elizalde, G. y M. Daza. 2003a. Procedimiento para evaluar amenazas de movimientos en masa con información restringida en paisajes montañosos. *Rev. Fac. Agronomía* 29 (2): 197-208.
- Elizalde, G. y M. Daza. 2003b. Evaluación de amenazas de movimientos en masa en paisajes montañosos. Ejemplos en el Estado Vargas (Venezuela). *Venesuelos* 8 (1-2): 29-41.
- Elizalde, G.; J. Vilorio y A. Rosales. 2007. Geografía de suelos de Venezuela. *In: GeoVenezuela*, Tomo 2, Medio Físico y Recursos Ambientales, Cap 15. Fundación Empresas Polar. Caracas, Venezuela. p. 402-537.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2006. Guidelines for soil description. Rome, Italy. 109 p.
- Fernández, L. 2001. Procedimiento metodológico para determinar grados de susceptibilidad a la erosión hídrica en la cuenca del río Tucutunemo. Tesis doctoral en Ciencia del Suelo, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay, Venezuela. 286 p.
- Hussein, A. H. And M. C. Rabenhorst. 1999. Modeling of sulfur sequestration in coastal marsh soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1954-1963.
- López, C. 2004. Estudio de riesgo de erosión por movimientos en masa en la subcuenca de la quebrada Guamita, vertiente sur del parque nacional "Henry Pittier". Trabajo de grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Maracay, Venezuela. 113 p.
- Loveland, P. J. and W. R. Whalley. 1991. Particle size analysis. *In: K. A. Smith y Ch. E. Mullis. Soil analysis. Physical methods.* Marcel Dekker, New York, USA. p. 271-328.
- Maza, I. J. 2010. Evaluación del impacto del cierre del caño Mánamo sobre la salinización y acidificación de los suelos del Delta Superior del Orinoco. Tesis doctoral en Ciencia del Suelo, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay, Venezuela. 317 p.
- Maza, I. J.; G. Elizalde y Rondón de R., C. 2011a. Modelo pedogeomorfológico de la evolución de la salinización y acidificación en el Delta del Orinoco. Cartel presentado en el XIX Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo, Calabozo, 21 al 25 de noviembre.
- Maza, I. J.; Rondón de R., C. y G. Elizalde. 2011b. Efecto del cierre del caño Mánamo sobre la acidificación de los suelos del Delta Superior del Orinoco. Cartel presentado en el XIX Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo, Calabozo, 21 al 25 de noviembre.
- Monente, J. A. y G. Colonnello. 2004. Consecuencias ambientales de la intervención del Delta del Orinoco. Capítulo 7. *In: C. A. Lasso, L. E. Alonso, A. L. Flores y G. Love (eds.). Evaluación rápida de la biodiversidad y aspectos sociales de los ecosistemas acuáticos del delta del Río Orinoco y Golfo de Paria, Venezuela.* Boletín RAP de Evaluación Biológica 37. Conservación Internacional. Washington DC, USA. p. 114-124.
- Ospina, A. 2003. Aplicación de un modelo de evaluación de tierras en la Cuenca Alta del Río Guárico, mediante el uso de indicadores de calidad de suelos. Trabajo Especial de grado de MSc. en Ciencia del Suelo, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay, 230 p.
- Porta, J.; M. López y C. Roquero. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi Prensa. Barcelona, España, 850 p.
- Richards, L. A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. United States Department of Agriculture, Agriculture Handbook 60, Government Printing Office, Washington. Disponible en: <http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=10158&page=2>
- Rodríguez Altamiranda, R. 1999. Conservación de humedales en Venezuela: Inventario, diagnóstico ambiental y estrategia. Comité Venezolano de la IUCN. Caracas, Venezuela. 110p.
- Rondón de R., C. y G. Elizalde. 1994. Propuesta de un modelo de sistema de suelos formado por nueve subsistemas. *Venesuelos* 2 (1): 32-36.

- Sahrawat, K. L. 2005. Fertility and organic matter in submerged rice soils. *Current Science* 88 (5): 735-739.
- Sánchez, C. y A. Tocuyo, 2003. Evaluación de tierras para una agricultura de secano en isla de Guara. Estado Monagas. Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería Agronómica, Universidad de Oriente. 163 p.
- Schlesinger, W. H. 2000. Biogeoquímica. Un análisis del cambio global. Editorial Ariel Ciencia. Barcelona, España. 577 p.
- Schwertmann, U. and R. M. Taylor. 1989. Iron oxides. *In: Minerals in Soil Environments*, 2nd ed. J. B. Dixon y S. B. Weed (Eds.). Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, USA. p. 379-438.
- Trujillo, J. 1968. Estudio detallado y semidetallado y agrológico y con fines de riego de la isla de Guara, distrito Sotillo, estado Monagas. C.V.G. Venezuela. 392 p.
- United State Department of Agriculture USDA. 1999. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. 82 p.
- Van Andel, T. H. 1967. The Orinoco Delta. *Journal of Sedimentary Petrology* 37 (2): 297-310.
- Vorenhout, M.; H. G. Van Der Geest, D. Van Marum, K. Wattel and H. Eijsackers. 2004. Automated and continuous redox potential measurements in soil, *J. Environ. Qual.* 33:1562-1567.
- Warne, A. G.; R. H. Meade, W. A. White, E. H. Guevara, J. Gibeaut, R. C. Smith, A. Aslan and T. Tremblay. 2002. Regional controls on geomorphology, hydrology and ecosystem integrity in the Orinoco Delta, Venezuela. *Geomorphology* 44 (3-4): 273-307.
- White, W. M. 2007. *Geochemistry*, 701p. Capítulo 3, 61-113p. Capítulo 14, 589-644p. Disponible en: <http://www.imwa.info/white-geochemistry.html>