

## GÉNESIS DE UN SUELO SALINO-SÓDICO DE TUCUPIDO, ESTADO GUÁRICO-VENEZUELA<sup>1</sup>

### GENESIS OF A SALINE-SODIC SOIL IN TUCUPIDO (GUÁRICO-VENEZUELA)<sup>1</sup>

José P. Guerrero-Alves\*, Ildefonso Pla-Sentis\*\*, Rafael G. Camacho\*, Ángel Valera\* y Jairo Ferrer\*

<sup>1</sup> Trabajo financiado por la Universidad Rómulo Gallegos, Universidad Central de Venezuela y FONACIT (Proyecto PEM 2001001622).

\*Profesores. Universidad "Rómulo Gallegos". Centro de Investigación y Extensión en Suelos y Aguas (CIESA). San Juan de los Morros 2301, estado Guárico. Venezuela. \*\* Profesor. Universidad Central de Venezuela. Instituto de Edafología. Maracay 2101, estado Aragua. Venezuela.

#### RESUMEN

Este estudio fue conducido para identificar los principales factores y procesos relacionados con la génesis, bajo condiciones naturales, de un suelo salino-sódico (Sodic Haplusterts, fino, esmectítico, isohipertérmico) en Tucupido (Guárico-Venezuela), con clima semiárido. Allí se evaluaron características y propiedades morfológicas, físicas, químicas y mineralógicas. Valores de pH, sodio intercambiable y conductividad eléctrica del extracto de saturación fueron 7,55-8,34; 2-32% y 1,0-8,7 dS m<sup>-1</sup>; respectivamente. El NaCl fue la sal dominante (>66% por debajo de 10 cm). Densidad aparente (Da), macroporosidad y conductividad hidráulica saturada correspondieron respectivamente a 1,8-2,2 Mg m<sup>-3</sup>, 4-5% y 3x10<sup>-7</sup>-1x10<sup>-5</sup> m s<sup>-1</sup>. Esmectitas fueron las arcillas dominantes; con cloritas y micas hidratadas también presentes. Adicionalmente, elevadas cantidades de carbonatos de Ca y Mg se encontraron en el suelo (18%). La conclusión es que estos suelos, probablemente, se originaron de la alteración de rocas terciarias (limolitas arcillosas calcáreas), formadas en ambientes sedimentarios con aguas salinas ricas en sodio, dando lugar a suelos salino-sódicos durante la fase árida pleistocénica. Su pobre permeabilidad limitó el lavado de sales durante el período Holoceno más húmedo. Elevadas conductividades eléctricas y alto contenido de CaCO<sub>3</sub> probablemente restringieron elevados porcentajes Na intercambiable (<32%). Las primeras produjeron el colapso del espacio interlaminar de las esmectitas y los segundos indujeron la formación de silicatos hidratados de Ca-Al que podrían actuar como agentes cementantes en el espacio interlaminar de las esmectitas.

**Palabras Clave:** Vertisoles; carbonato de calcio; esmectitas; densidad aparente elevada.

#### SUMMARY

Saline-sodic soils, which are rich in salts and sodium, are degraded soils common in zones from subhumid to arid climates. This study was carried out to identify factors and processes related with the genesis, under natural conditions, of a saline-sodic soil (Sodic Haplusterts, fine, smectitic, isohyperthermic) in Tucupido (Guárico-Venezuela), under a semiarid climate. There were evaluated morphological, physical, chemical and mineralogical characteristics and properties of the soil. The pH, exchangeable sodium, and electric conductivity (saturation extract) varied between 7.55-8.4; 2-32% and 1.0-8.7 dS m<sup>-1</sup> respectively. NaCl was the dominant salt (> 66% below 0.1-m depth). Bulk density, macroporosity, and saturated hydraulic conductivity varied from 1.8 to 2.2 Mg m<sup>-3</sup>, 4 to 5% and 3x10<sup>-7</sup> to 1x10<sup>-5</sup> m s<sup>-1</sup>, respectively. Smectites were the dominating clays, but chlorites and hydrated micas there were present too. High quantities of Ca- and Mg-carbonates were also found precipitated in the soil (18%). The conclusion was that these soils were probably formed by alteration of calcareous shales, formed in sedimentary environments in contact with saline waters rich in sodium, to produce saline-sodic soils during the arid phase at the end of the Pleistocene period. The very low permeability of these soils limited salts washing during the wetter Holocene period. High electric conductivities probably would allow the collapse of interlayer space of smectites, and the high content of Ca-carbonates the production of Ca-Al silicate compounds which could be acting as cementing agents in the interlayer space of smectites, and these processes probably could prevented the increase of the exchangeable Na% in the soil to values higher than 32%.

**Key Words:** Vertisols; calcium carbonate; smectites, high bulk density.

RECIBIDO: junio 16, 2006

APROBADO: marzo 03, 2007

## INTRODUCCIÓN

La sodificación es uno de los más extendidos y peligrosos procesos de degradación de suelos del mundo, el cual causa efectos negativos sobre la productividad y producción de cultivos. La sodificación puede ser debida a intervención humana o a factores naturales. En ambas situaciones, la teoría de formación de suelos indica que una específica combinación de factores formadores de suelo (clima, material parental, biota, topografía y tiempo) producirían un tipo particular de suelo sódico. En Venezuela, suelos sódicos y salino-sódicos han sido señalados en varias zonas de importancia agrícola con climas que van desde subhúmedo hasta semiárido (Schargel, 1984; Pla, 1985; Schargel *et al.*, 1988; García-Miragaya *et al.*, 1990; Guerrero, 1998; Guerrero *et al.*, 2002; 2004).

Los suelos salino-sódicos se caracterizan por tener un porcentaje de sodio intercambiable (PSI) por encima de 15% y/o una relación de adsorción de sodio (RAS) superior a 13 ( $\text{mmol l}^{-1}$ )<sup>1/2</sup> y una conductividad eléctrica (CE) del extracto de saturación  $> 4,0 \text{ dS m}^{-1}$  (Salinity Laboratory Staff, 1954; Soil Survey Staff, 1999). Además, el Salinity Laboratory Staff (1954) también señala que el pH de una pasta saturada es comúnmente  $< 8,5$  en suelos salino-sódicos. Sin embargo, el pH no es un criterio de diagnóstico para sodicidad (Van Beek y Van Breemen, 1973) porque hay suelos salino-sódicos con valores de pH mayores que 8,5.

Por otra parte, suelos con valores de pH elevados ( $> 8,5$ ) presentan invariablemente grandes contenidos de sodio, lo cual puede ser atribuido a la acumulación de sales de sodio con hidrólisis alcalina (bicarbonatos y carbonatos) como lo señalan varios autores (Cruz-Romero y Coleman, 1975; Gupta y Abrol, 1990; Guerrero *et al.*, 2002; 2004).

Van Beek y Van Breemen (1973) postularon que un inventario de los procesos que pueden determinar la magnitud de la alcalinidad (ALC), y consecuentemente de la alcalinidad residual (ALCR), deberían ser útiles para identificar los factores asociados con la formación de suelos alcalinos. Matemáticamente, la ALCR puede ser expresada en diferentes formas y es totalmente equivalente al carbonato de sodio

residual (CSR) propuesto por Eaton (1950). Una de las formas más útiles es escribirla como sigue:

$$\text{ALCR} = [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] - [\text{Cl}^-] - 2[\text{SO}_4^{2-}] - [\text{NO}_3^-] \quad (1)$$

donde ALCR es la parte de la ALC asociada a los bicarbonatos y carbonatos de iones monovalentes y los corchetes [ ] están referidos a las concentraciones molares de las especies en solución acuosa (Guerrero *et al.*, 2004).

La ecuación (1) indica que cualquier incremento en la ALCR debe venir acompañada por un incremento equivalente en la concentración de  $\text{Na}^+$  y/o  $\text{K}^+$  o en un decrecimiento equivalente en la concentración de aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  ó  $\text{NO}_3^-$ ) diferentes de bicarbonatos y carbonatos. Como el  $\text{K}^+$  es frecuentemente encontrado en bajas cantidades en la solución del suelo, la ALCR podría ser sólo interpretada como la acumulación de sales alcalinas de sodio (bicarbonatos y carbonatos) en el ambiente físico-químico del suelo (Guerrero *et al.*, 2004).

Por tanto, tal como se desprende de la ecuación (1), si en el medio existen incrementos de  $\text{Na}^+$  y los contraiones son  $\text{Cl}^-$  ó  $\text{SO}_4^{2-}$  no hay ganancia neta de ALCR. Por esta razón, suelos que sólo acumulan  $\text{NaCl}$  y  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  no deberían considerarse sódicos (o salino-sódicos), aún teniendo valores de RAS elevados (Pla, 1985; Gupta y Abrol, 1990; Guerrero *et al.*, 2004), porque podrían ser desalinizados (y por tanto desodificados) sin necesidad de enmiendas. Esto sugiere que la producción y acumulación de sales alcalinas de sodio es el proceso más importante de sodificación de suelos con elevados valores de pH (Guerrero *et al.*, 2004). Estas sales pueden surgir no sólo de aportes en las aguas que interaccionan con ellos sino, incluso, de transformaciones o procesos que involucran la fase sólida (orgánica o mineral) del suelo.

El propósito de este trabajo fue caracterizar morfológica, física, química y mineralógicamente un suelo salino-sódico de Tucupido (estado Guárico, Venezuela) e inferir su posible génesis en el ambiente fisiográfico de los llanos altos centrales. Se dirige particular atención a factores y procesos que en el suelo podrían estar involucrados en la acumulación de carbonatos de iones divalentes (Ca-Mg) y sales neutras de sodio.

Por otra parte, también se hace énfasis en los atributos de la fase sólida-líquida del suelo que promueven la incipiente producción de sales alcalinas de sodio y en los que limitan la adsorción de sodio en el complejo de cambio a pesar de los elevados tenores de este elemento en la solución del suelo. El suelo objeto de este estudio ha sido tradicionalmente cultivado con maíz y sorgo, con la soca para consumo animal, obteniéndose en esas áreas muy bajos rendimientos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Características del área de estudio.** El área de estudio (elevación alrededor de 100-150 m) está localizada en Tucupido, llanos ondulados centrales del estado Guárico-Venezuela (9 o 15' N y 65 o 46' W). El pedón, en lo sucesivo denominado Travesía, estaba situado (UTM: 856 466 E, 1 025 452 N; aproximadamente) en el tope de una colina donde la pendiente fue <20% en la dirección O-E. La geología de Tucupido, en el área del pedón, estaría caracterizada por lutitas calcáreas del terciario (Guerrero, 1998), con una gran cantidad de esmectitas, posiblemente representativas de la Formación Quiamare (MMH, 1970). Registros climáticos (1967-1983), provenientes de la estación climatológica de Tucupido, muestran una precipitación media anual de 828 mm. Tradicionalmente, el suelo Travesía ha sido cultivado (maíz/sorgo) o pastoreado.

La ubicación del sitio de muestreo (dirigido) fue seleccionada con base en una caracterización química preliminar (Guerrero, 1998) que reveló, para ese entonces, la presencia de un pedón salino-sódico. El pedón seleccionado para este trabajo (Figura 1) corresponde a un inclusión de la unidad C1417, a nivel de Grandes Grupos (mapa de suelos a escala 1:250 000), que se presenta como una asociación de frecuentes Haplusterts y Haplustalfs (MARN, 1999).

A pesar de que estas inclusiones aparentemente no tienen mayor extensión y representación, el suelo fue seleccionado dentro de un contexto más amplio. Constituyó una situación contrastante dentro de diferentes ambientes edafoclimáticos del estado Guárico y Portuguesa (Guerrero, 1998; Guerrero *et al.*, 2002; Guerrero *et al.*, 2004) donde también se identificaron otros factores y procesos que conllevan

a la formación de suelos con sodio. La comprensión de éstos es fundamental para precisar prácticas de manejo, especialmente en aquellas áreas incorporadas al riego, que eviten su formación y la eventual degradación de los suelos.

**Descripción del suelo en el campo, muestreo y análisis físicos de campo y laboratorio.** La descripción del perfil fue realizada según procedimientos del Soil Conservation Service (1981) y Soil Survey Division Staff (1993). Muestras representativas no disturbadas de suelo (cilindros de suelo) fueron tomadas en superficie con un toma muestra tipo Uhland (Pla, 1983) y en el tope de los restantes horizontes genéticos (calicata escalonada) mediante un procedimiento que permitió esculpir e introducir manualmente un cilindro de suelo en los contenedores metálicos (Guerrero, 1998).

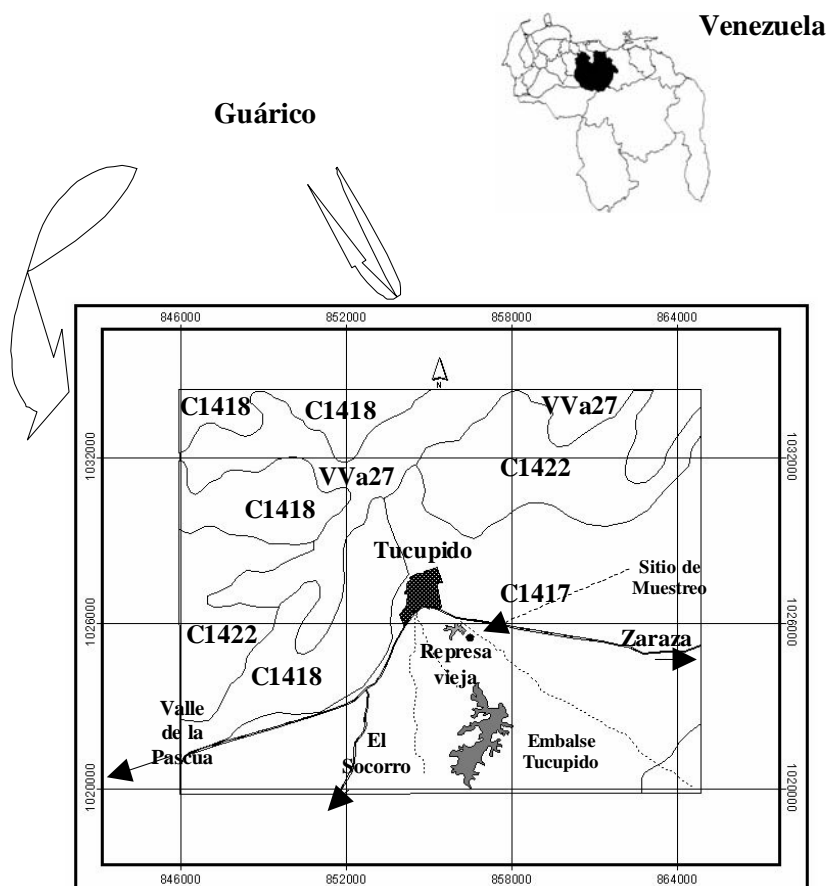
Las muestras no disturbadas se reservaron para análisis físicos de laboratorio (tres determinaciones) que incluyeron conductividad hidráulica en régimen saturado, distribución de macro y microporosidad y densidad aparente ( $D_a$ ) según Pla (1983). Sobre el tope de cada horizonte genético también se realizaron determinaciones de  $D_a$  por el método del hoyo (Pla, 1983).

Las propiedades expansibles del suelo Travesía fueron indirectamente inferidas por la estimación de los coeficientes de extensibilidad lineal (COEL). Los valores de COEL fueron determinados de las diferencias de  $D_a$  (Soil Survey Staff, 1999) del suelo húmedo (cilindros de suelo no disturbado) y seco (método del hoyo). La expresión usada en los cálculos fue:

$$\text{COEL} = (D_{as} / D_{ah})^{1/3} - 1 \quad (2)$$

donde  $D_{as}$  y  $D_{ah}$  son referidas a los valores de  $D_a$  en las condiciones seca y húmeda, respectivamente.

Por otra parte, muestras disturbadas de suelo fueron tomadas desde la superficie, cada 10 cm, hasta los 250 cm. Los detalles del muestreo y del procesamiento de las muestras disturbadas para análisis físico se encuentran en Guerrero *et al.* (2004). En las muestras disturbadas destinadas para análisis físico se determinó distribución de tamaño de partículas (método de Bouyoucos) y fraccionamiento de arena (Pla, 1983).



Símbolo	Paisaje	Grandes Grupos Dominantes
C1417	Colinar	Frecuentes Haplusterts-Haplustalfs; Asociación
C1418	Colinar	Abundantes Ustrolepts; Consociación
C1422	Colinar	Frecuentes Haplusterts-Ustrolepts; Gran Grupo
VVa27	Valle	Abundantes Ustrolepts; Consociación

**FIGURA 1.** Ubicación aproximada del pedón Travesía (UTM: 856 466 E; 1 025 452 N) en el área de estudio (Mapa fuente: MARN, 1999).

**Análisis químicos de laboratorio.** Los detalles del procesamiento de las muestras con fines químicos se encuentran en Guerrero *et al.* (2004). Estas muestras fueron utilizadas para medir pH (relación suelo-agua 1:5 y pasta saturada) y obtener el extracto de saturación para la determinación de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  (iones solubles), relación de adsorción de sodio (RAS) y CE según la (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954).

Las sales solubles [ $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{KCl}$ ] fueron ajustadas de acuerdo a la composición de iones solubles siguiendo un procedimiento sugerido por Guerrero (1998) para garantizar electroneutralidad en los extractos de saturación. Además, también se determinó la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) presentado por la (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954) y carbonatos de

calcio y magnesio (Pla, 1969). Todas las determinaciones químicas representan el promedio de tres determinaciones.

### Mineralogía de las arcillas y de las arenas densas.

Los tratamientos de saturación y calentamiento de las muestras de arcilla orientada se realizaron según Jackson (1969) y los espectros de difracción de rayos X fueron registrados con las condiciones delineadas en Guerrero *et al.* (2004). Los minerales identificados se cuantificaron como porcentaje (relativos al área total) con base en los picos de mayor intensidad (Malagón, 1979).

Las fracciones de las arenas densas se analizaron con un microscopio petrográfico (Malagón, 1979). La preparación de las muestras incluyó los procedimientos de Parfenoff *et al.* (1970) y Aleixandre y Pinilla (1968) y se describen con detalle en Guerrero *et al.* (2004). La cantidad de cada mineral identificado fue expresada en porcentaje con base al total de todos los granos minerales identificados. Por otra parte, la proporción de intemperismo (Malagón, 1979) fue determinada como la relación de minerales resistentes (circón + turmalina) / minerales alterables (anfíboles + piroxenos) y fue usada como criterio para verificar posible uniformidad de materiales parentales.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Características morfológicas y físicas.** El pedón salino sódico Travesía fue clasificado como Sodic Haplusterts, fino, esmectítico, isohipertérmico (Soil Survey Staff, 2006) y exhibió una secuencia de horizontes **Ap-B-C** con un espesor del solum de 117 cm (Cuadro 1). Este solum exhibió gran cantidad de grietas en toda su extensión y la presencia de caras de fricción en los horizontes **Bw2** y **Bw3**.

El suelo presenta matices en húmedo que van desde 5Y (gris claro, gris oliváceo claro o gris verdoso) a 10YR (marrón o marrón amarillento) y una textura que fluctuó entre franco limoso (horizontes C1, C2) y franco arcillo limoso (horizontes Ap, Bw3, C3, C4) o arcillo limoso (horizontes Bw1, Bw2).

Los horizontes **B** del suelo Travesía fueron caracterizados por una estructura blocosa subangular (**Bw1**, **Bw2**) o blocosa angular (**Bw3**). Cuando la estructura

blocosa subangular estuvo presente fue media, dura a muy dura y firme, mientras que la estructura blocosa angular fue gruesa, muy dura y extremadamente firme. Con relación a los horizontes **C**, a pesar de que se muestra estructura en el Cuadro 1, hay evidencia para pensar en una condición muy cercana a la masiva y que esta estructura surgió como un “artifact” irreversible por exposición al sol y al aire.

El contenido de arena fue relativamente muy bajo (1-15%) en todo el perfil y elevados porcentajes de limo (> 50%) están presentes en el suelo Travesía desde los 10 cm de profundidad (Cuadro 2). Por otra parte, el contenido de arcilla también fue relativamente alto y generalmente varió entre 23-47%. Aunque el incremento de arcilla en el horizonte **B** es suficiente para un horizonte argílico, la presencia de carbonatos precipitados y la pedoturbación física bajo la forma de caras de fricción en esa zona del perfil, debido a las grandes cantidades de esmectitas (Cuadro 3), excluyen tal posibilidad (Soil Survey Staff, 1975).

Una fuerte correlación lineal, con  $r$  negativo ( $r = -0,8718$ ), se presenta entre el porcentaje de arcilla y el porcentaje de limo en el suelo Travesía (Figura 2). Esto sugiere que parte de la arcilla pudo haberse derivado de la desintegración rápida del limo proveniente de la roca parental; posiblemente limolitas calcáreas (gris verdosas, rojas pardas y gris azuladas) pertenecientes a la Formación Quiamare (MMH, 1970). Ninguna correlación importante ( $r^2$  entre 0,0115 y 0,1548) se observó entre los pares de variables restantes correspondientes a las otras combinaciones de las fracciones granulométricas (%A vs. %a y %L vs. %a).

Valores elevados de  $D_a$  (1,80-2,17  $Mg\ m^{-3}$ ) fueron encontrados en todos los horizontes del suelo Travesía (Cuadro 4). Sin embargo, valores elevados de  $D_a$  asociados a muy bajas macroporosidades (< 5%) y conductividades hidráulicas ( $\leq 1\ mm\ h^{-1} = 3 \times 10^{-7}\ m\ s^{-1}$ ) sólo se presentaron en el horizonte **C** (Cuadro 4). Estos rasgos confieren al suelo Travesía muy baja permeabilidad al agua en esta zona del perfil, posiblemente atribuibles al gran contenido de esmectitas, y han limitado el lavado de sales y sodio en las condiciones de clima actual (relativamente más húmedas con relación a las de su formación).

**CUADRO 1.** Características morfológicas en el suelo Travesía (CM = color Munsell).

Horizonte límite entre horizontes	Profundidad (cm)	CM Matriz (húmedo)	CM Moteados† (húmedo)	a %	A %	Textura‡	Estructura#	Consistencia
Ap §, £	0-12	10YR5/3	10YR5/6 (p, fi, di, ag)	37,3	FAL	2-3, f, bcs	d, fr	claro y onulado
Bw1 ¶, §, £	12-39	5Y6/2	10YR5/4 (p, fi, di, df)	43,0	AL	3, m, bcs	md, fi	gradual e irregular
Bw2 §, £, £	39-79	10YR5/4	5YR5/4 (m, g, di, df)	41,9	AL	3, m, bcs	d, fr-fi	difuso e irregular
Bw3 §, £	79-117	10YR5/4	5YR5/4 (m, g, di, df) 5Y5/2 (p, md, di, cl)	28,5	FAL	3, g, bca	md, efi	gradual y plano
C1	117-146	5Y7/1(seco)	10YR5/6 (p, md, di, ag) 2,5YR5/4 (p, md, di, ag)	25,7	FL	3, mg, bca	ed, efi	claro y plano
C2	146-159	10YR5/4	5Y6/2 (c, md, di, cl) 2,5YR4/4 (p, g, di, cl)	25,7	FL	3, mg, bca	ed, efi	abrupto y plano
C3¶	159-175	10YR5/4	5Y6/2 (c, fi, di, cl) 2,5YR4/4 (m, g, di, cl)	30,1	FAL	1, g, bca	md, fi	abrupto y plano
C4¶	175-200	7,5YR5/4	5Y5/2 (c, fi, di, cl) 2,5YR4/4 (c, md, di, cl)	31,6	FAL	2, mg, bca	md, fi	–

† p: pocos; c: comunes; m: muchos; fi: finos; md: medios; g: grueso; di: distinto; pr: prominente; df: difuso; cl: claro; ag: agudo.

‡ FAL: franco arcillo limoso; AL: arcillo limoso; FL: franco limoso. # 0: sin estructura; 1: débil; 2: moderado; 3: fuerte.

mf: muy fino; f: fino; m: medio; g: grueso; mg: muy grueso; s: grano simple; ma: masivo; p: prismática; bcs: blocosa subangular; bca: blocosa angular su: suelto; ld: ligeramente duro; d: duro; md: muy duro; ed: extremadamente duro; fr: friable; fi: firme; efi: extremadamente firme § Presentan caras de fricción (slikenesides); ¶ Presenta nódulos de Fe-Mn; ¶ Presentan manchas negras con reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; £ Presentan grietas; § Presentan raíces.

**CUADRO 2.** Atributos químicos\* y físicos en el suelo Travesía determinados cada 10-cm de profundidad.

Profundidad (cm)	pH	pH5	CE dS m <sup>-1</sup>	PSI %	RAS (m mol l <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup>	(CaMg)p	CIC	Na <sub>int</sub>	Na <sub>imp</sub>	arena	arcilla	-----c mol <sub>(c)</sub> kg <sup>-1</sup> -----			-----%-----		
												af+amf (libre A)	af+amf	af+amf	af+amf (libre A)	af+amf	af+amf
0-10	7,55	7,65	0,963	1,86	1,09	257,53	24,98	0,47	2,69	14,5	37,4	9,87	15,77	13,12			
10-20	8,03	8,97	1,052	9,13	8,76	244,29	23,69	2,16	2,77	12,8	36,9	8,52	13,50	8,37			
20-30	8,19	9,27	1,480	15,00	14,05	169,41	28,09	4,21	4,74	5,6	44,7	2,83	5,12	7,31			
30-40	8,26	9,34	2,277	19,19	17,99	168,66	29,84	5,73	5,61	3,9	46,6	1,72	3,22	8,93			
40-50	8,34	9,36	3,275	23,11	19,71	72,82	30,23	6,98	7,04	1,4	46,4	1,51	2,82	7,56			
50-60	8,32	9,36	3,986	25,16	24,37	72,78	30,32	7,63	7,46	1,7	41,3	1,06	1,81	4,77			
60-70	8,33	9,39	4,239	28,42	27,60	73,33	29,31	8,33	7,39	3,9	40,2	0,95	1,59	2,59			
70-80	8,27	9,38	4,452	28,99	30,45	31,42	30,39	8,81	7,98	5,0	39,1	1,88	3,09	1,37			
80-90	8,31	9,37	4,595	30,30	28,75	40,19	28,48	8,63	7,48	8,4	30,2	3,33	4,77	1,35			
90-100	8,30	9,35	4,877	30,36	28,70	37,16	28,56	8,67	7,70	7,5	30,7	3,72	5,37	0,80			
100-110	8,21	9,18	5,096	29,45	28,35	4,07	27,71	8,16	7,84	5,9	27,4	4,84	6,67	0,07			
110-120	7,76	8,42	5,001	32,04	28,43	1,32	24,43	7,83	7,07	5,6	22,9	4,52	5,86	0,00			
120-130	7,62	8,27	5,237	31,89	28,35	1,36	23,07	7,36	6,91	2,8	27,4	3,38	4,66	0,00			
130-140	7,66	8,31	5,150	32,37	26,82	2,04	21,74	7,04	6,44	5,6	24,0	4,14	5,45	0,00			
140-150	7,93	8,63	6,460	30,82	27,12	2,91	25,01	7,71	7,94	2,2	27,1	1,34	1,84	0,03			
150-160	8,27	9,29	6,338	31,51	27,32	354,33	20,68	6,52	4,08	12,3	25,1	4,34	5,79	5,63			
160-170	8,29	9,23	7,004	30,79	27,94	151,18	24,64	7,59	7,05	8,9	29,1	2,80	3,95	2,68			
170-180	8,17	9,19	6,982	30,80	26,56	54,07	25,90	7,98	8,12	7,5	33,0	2,40	3,58	2,41			
180-190	8,20	9,21	7,237	31,45	25,24	70,72	26,14	8,22	8,11	7,5	30,2	2,07	2,97	5,61			
190-200	8,03	9,18	7,925	29,98	24,60	62,45	26,26	7,87	8,45	3,4	32,4	1,26	1,86	4,35			
200-210	8,14	9,16	7,840	28,72	26,44	34,74	24,84	7,13	8,50	1,1	29,3	1,05	1,49	1,72			
210-220	8,07	9,12	7,763	29,05	24,87	30,83	24,96	7,25	8,41	1,1	26,3	0,73	0,99	0,78			
220-230	8,10	9,07	8,258	29,11	25,14	45,71	26,81	7,80	8,90	2,2	34,1	0,88	1,34	1,59			
230-240	8,17	9,12	8,702	27,95	25,16	115,32	25,72	7,19	8,33	4,5	31,3	1,04	1,51	5,90			
240-250	8,17	9,18	8,491	29,21	24,75	173,30	24,98	7,30	7,54	4,5	34,6	1,10	1,68	6,61			

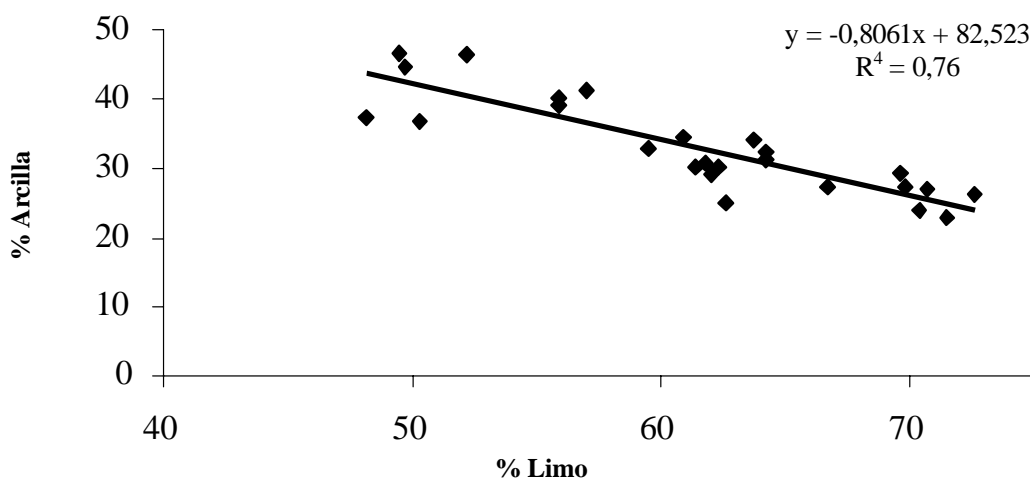
pH = pH para pasta saturada, pH5 = pH para suspensión suelo-agua de relación 1:5, CE = conductividad eléctrica para el extracto de saturación, PSI = porcentaje de sodio intercambiable, RAS = relación de adsorción de sodio, (CaMg)p = carbonatos precipitados de Ca y Mg, CIC = capacidad de intercambio catiónico, Na<sub>int</sub> = sodio intercambiable, Na<sub>imp</sub> = sodio intercambiable estimado por la ecuación 3, af+amf = arena fina + arena muy fina  
 \*Promedio de tres determinaciones para pH, pH5, CE, PSI, RAS, (CaMg)p, CIC y Naint.

**CUADRO 3.** Mineralogía de la arcilla para horizontes seleccionados en el suelo Travesía, obtenidos por difracción de rayos X.

Mineral	Horizontes				
	Ap	Bw1	Bw2	Bw3	C1
	----- % -----				
caolinita	0	0	0	12	12
clorita	17	25	15	6	10
cuarzo	5	6	5	7	3
esmeclitas	61	39	53	44	53
feldespatos	2	4	2	2	3
goetita	t**	1	2	5	1
haloisita	1	2	1	0	0
interestratificado	0	2	0	4	1
10/14c*					
micas	8	18	18	11	10
paligorsquita	0	0	0	2	1
pirofilita	1	2	1	2	2
sepiolita	3	1	1	2	2
talco	2	P***	2	3	3

\*c= clorita; \*\*t = trazas; \*\*\*P = presente

Los valores de COEL en el suelo Travesía oscilan entre 0,01 y 0,13 (Cuadro 4). Según Buol *et al.* (1980), valores de COEL > 0,03 indican que cantidades importantes de esmeclitas están presentes en el suelo. La mayoría de los valores de COEL en el suelo Travesía fueron  $\geq 0,03$ ; excepto en los horizontes Bw1 y C2. El valor máximo de COEL (Cuadro 4) se presenta en la superficie (0,13), precisamente en el horizonte donde se detectó en campo y laboratorio la mayor expresión en las propiedades expansibles de este suelo. Para éste y el resto de los horizontes, los valores de COEL guardan estrecha relación con el contenido de esmeclitas (Cuadros 3 y 4) hasta la profundidad de 117 cm (Bw3), es decir, aumentan o disminuyen de manera proporcional a la cantidad de estos minerales presentes en la fracción arcilla del suelo. Sin embargo, las propiedades expansibles del suelo Travesía, reflejadas en los valores COEL (Cuadro 4), tienden a disminuir con la profundidad a medida que la salinidad se incrementa en ese sentido (Cuadro 2).



**FIGURA 2.** Relación entre el contenido de arcilla y el contenido de limo, con la profundidad, en el suelo Travesía.

**CUADRO 4.** Conductividad hidráulica (K), densidad aparente (Da) por el método del hoyo, macroporosidad (MP), porosidad total (PT) y coeficiente de extensibilidad lineal (COEL) determinada para horizontes genéticos descritos en el suelo Travesía.

Horizonte	Profundidad cm	K* -----mm h <sup>-1</sup> -----	Da --- Mg m <sup>-3</sup> ----	MP* ----- % -----	PT*	COEL
Ap	0-12	50±12	2,05	11,0±0,9	50,2±1,6	0,13
Bw1	12-39	1±1	1,80	6,9±2,6	45,0±2,3	0,02
Bw2	39-79	2±2	2,04	9,0±2,4	45,0±1,6	0,09
Bw3	79-117	3±2	1,99	7,6±0,5	43,5±0,7	0,05
C1	117-146	0,2±0,1	2,03	3,6±0,4	39,2±1,5	0,03
C2	146-159	0,05±0,03	1,92	4,2±1,4	41,0±3,8	0,01
C3	159-175	0,3±0,6	2,17	4,6±1,0	41,1±1,7	0,05
C4	175-200	0,05±0,06	2,07	4,1±1,0	38,8±2,8	0,04

\* Promedio para tres determinaciones + desviación estándar.

**Propiedades químicas.** Los valores de PSI (> 15%) y RAS (> 13) según se observa en el Cuadro 2 están mostrando que el suelo Travesía satisface los requerimientos (Salinity Laboratory Staff 1954; Soil Survey Staff, 1999) para un suelo sódico a profundidades entre 20-50 cm y para un suelo salino-sódico por debajo de los 50 cm (valores de CE entre 4-9 dS m<sup>-1</sup>). Ningún pH en pasta saturada con la profundidad fue superior a 8,5 (Cuadro 2), lo que revela que el suelo Travesía no está acumulando importantes cantidades de sales alcalinas de sodio (bicarbonatos y carbonatos) en ninguna parte del perfil. Sin embargo, gran número de valores de pH para las suspensiones suelo-agua de relación 1:5 fueron mayores que 9,00 (Cuadro 2). Este hecho sugiere que sales alcalinas de sodio (bicarbonatos y carbonatos) pueden producirse en un ambiente con gran cantidad de sales neutras de sodio, carbonatos precipitados de iones divalentes (Ca-Mg) y suficiente humedad en presencia de un intercambiador de iones.

La ecuación de regresión lineal múltiple (3) permite pronosticar el contenido de sodio intercambiable (Na<sub>int</sub>) como función del contenido de carbonatos precipitados de Ca-Mg (CaMg)<sub>p</sub>, del contenido de NaCl (sal predominante) y la CIC:

$$Na_{int} = -0,00800 (CaMg)_p + 0,0736.[NaCl] + 0,2535.CIC - 1,7336 \quad (3)$$

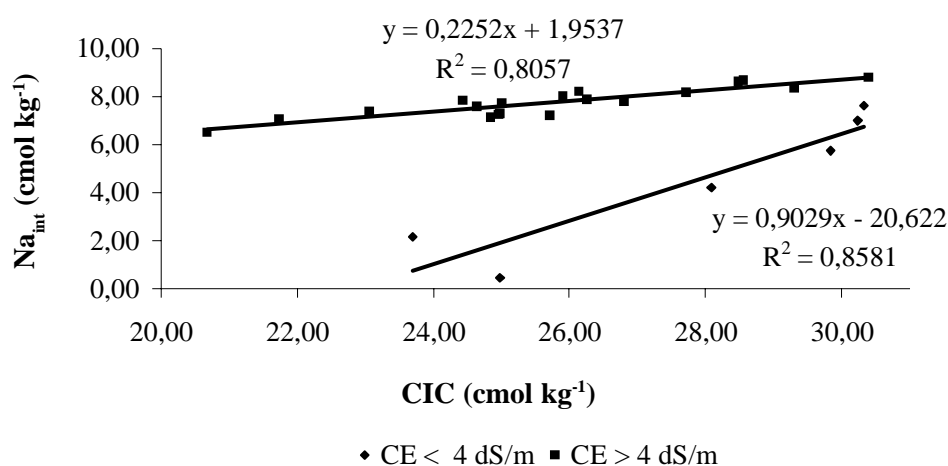
donde los corchetes [ ] hacen referencia a la concentración de NaCl en mmol<sub>(+)</sub> l<sup>-1</sup> y las cantidades de (CaMg)<sub>p</sub> y CIC vienen expresadas en cmol<sub>(+)</sub> kg<sup>-1</sup>. Esta ecuación (r = 0,8676) fue obtenida después de verificar que no existía asociación para los tres pares de combinaciones posibles de las variables regresoras (r<sup>2</sup> entre 0,0705-0,1061).

La ecuación (3) permite estimar el 75% de los valores de Na<sub>int</sub> (Cuadro 2) con errores < 14%. Esta elevada correlación entre Na<sub>int</sub> y las variables regresoras indica un complejo adsorbente muy homogéneo con la profundidad en cuanto a la naturaleza de sus arcillas (dominada por esmectitas). Señala además, que mientras mayor sea la CIC y la concentración de NaCl y menor la concentración de carbonatos de iones divalentes, más elevada será la sustitución por sodio en el complejo de cambio. Sin embargo, la ecuación (3) no permite prever porque la salinidad, en lugar de la presencia de carbonatos de iones divalentes, es el factor principal que limita la adsorción del sodio intercambiable porque pronostica un incremento lineal indefinido del Na<sub>int</sub> (que no ocurre en condiciones naturales) con el aumento del NaCl (y consecuentemente de la salinidad).

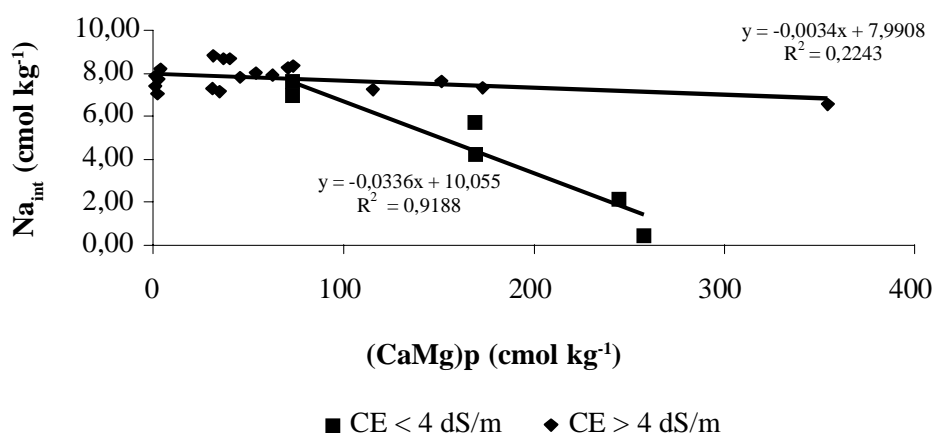
Cuando se establece la relación entre el Na<sub>int</sub> y la CIC se observa una fuerte correlación lineal sólo si se estratifican los valores para CE's menores

( $r^2 = 0,8581$ ) o mayores ( $r^2 = 0,8057$ ) de  $4 \text{ dS m}^{-1}$  (Figura 3). Si se incluyen todos los valores, sin discriminar el efecto salino, la asociación entre las variables ( $\text{Na}_{\text{int}}$  y CIC) es prácticamente nula ( $r^2 = 0,0610$ ). Podría interpretarse que alrededor de  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , existe una disminución apreciable (cambio abrupto de pendiente; Figura 3) de la adsorción del sodio producto del colapso del espacio interlamilar de las esmectitas (Borchardt, 1989) que son predominantes (Cuadro 3) en el complejo de cambio. Por tanto, esto parece indicar que la salinidad modifica fuertemente la CIC del suelo Travesía.

Por otra parte, cuando la relación es entre el  $\text{Na}_{\text{int}}$  y el contenido de carbonatos de Ca-Mg precipitados (Figura 4), la estratificación por salinidad produce una muy buena correlación lineal negativa ( $r^2 = 0,9188$ ) sólo para CE's menores de  $4 \text{ dS m}^{-1}$ . La asociación es bastante pobre ( $r^2 = 0,2243$ ) a salinidades elevadas ( $> 4 \text{ dS m}^{-1}$ ) señalando que los mecanismos de formación de silicatos hidratados de Ca-Al interlamilar (Borchardt, 1989) sólo son importantes en la restricción de la sustitución por sodio en el complejo de cambio cuando las CE's son menores que  $4 \text{ dS m}^{-1}$ .



**FIGURA 3.** Relación entre el contenido de sodio intercambiable ( $\text{Na}_{\text{int}}$ ) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), como función del contenido de sales totales, en el suelo Travesía.



**FIGURA 4.** Relación entre el contenido de sodio intercambiable ( $\text{Na}_{\text{int}}$ ) y la cantidad de carbonatos de Ca-Mg precipitados ( $(\text{CaMg})_p$ ), como función del contenido de sales totales, en el suelo Travesía.

La sal soluble predominante en el pedón Travesía (Cuadro 5) corresponde al cloruro de sodio (NaCl), con valores que superan los  $6 \text{ mmol}_{(+)} \text{ l}^{-1}$  (en los extractos de pasta saturada) a partir de los 10 cm de profundidad. Sin embargo, valores entre  $28\text{-}61 \text{ mmol}_{(+)} \text{ l}^{-1}$  se presentan por debajo de los 50 cm y ésto sólo se traduce en una variación del PSI entre 25-32% (Cuadro 5). La concentración de NaCl para la cual no aumenta significativamente el PSI (más allá de 32%) es a partir de  $32 \text{ mmol}_{(+)} \text{ l}^{-1}$  y se manifiesta alrededor de CEs  $>5 \text{ dS m}^{-1}$ . El sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) es la segunda sal sódica importante (contenidos  $<4 \text{ mmol}_{(+)} \text{ l}^{-1}$ ) y se encuentra ausente por debajo de los 190 cm de profundidad. Por otra parte, concentraciones de  $\text{NaHCO}_3$  (sal alcalina), relativamente bajas ( $<2 \text{ mmol}_{(+)} \text{ l}^{-1}$ ), están sólo presentes entre 10-80 cm de profundidad.

En cuanto a las sales de iones divalentes en los extractos de pasta saturada (Cuadro 5), sus cantidades son relativamente bajas en todos los casos. Los cloruros sólo se encuentran a partir de los 190 cm de profundidad y los sulfatos están ausentes entre los 10-80 cm (porque existe la presencia de bicarbonato de sodio). Cuando el  $\text{CaSO}_4$  está presente su contenido es tan bajo que excluye la presencia de yeso precipitado (solubilidad alrededor de  $30 \text{ mmol}_{(+)} \text{ l}^{-1}$ ) en cualquier zona del perfil.

Para el pedón salino-sódico Travesía, la recta de regresión entre los valores de relación de sodio intercambiable (RSI) y RAS (no se señala en este trabajo) produjo un coeficiente de selectividad de Gapon (KG) de  $0,01673(\text{mmol l}^{-1})^{-1/2}$ , el cual difiere sólo en un 13% del valor de  $0,01475 (\text{mmol l}^{-1})^{-1/2}$  presentado por el Salinity Laboratory Staff (1954). Por esta razón, es posible inferir los valores de PSI directamente a partir de los valores de RAS (Cuadro 2) sugiriendo este hecho, además, la mayor acumulación de sales neutras de sodio en lugar de sus respectivas sales alcalinas. Cuando se acumulan preponderantemente estas últimas, los KG (y por consiguiente los PSI) son sustancialmente mayores (Guerrero *et al.*, 2002) y no se debería estimar el PSI directamente a partir de los valores de RAS (Bohn, 1979; Guerrero *et al.*, 2002).

**Composición mineralógica.** La composición mineralógica del suelo Travesía está resumida en los Cuadros 3 y 6. Los análisis de difracción de rayos X (Cuadro 3) revelaron que la fracción arcilla del suelo

Travesía está dominada por esmectitas. Otros minerales importantes son clorita y micas, respectivamente. Los picos que permitieron identificar y cuantificar la clorita infieren una alta cristalinidad y parecen descartar un origen pedogenético (posiblemente aportada al suelo en sedimentos derivados de la alteración de esquistos cloritosos). Esta composición general está sugiriendo, preliminarmente, que el suelo es de origen reciente. Sin embargo, los horizontes Bw3 y C1 presentan cantidades significativas de caolinita; un filosilicato mineral 1:1 especialmente resistente. Este hecho podría señalar que la caolinita fue heredada del material parental. Sin embargo, Herbert *et al.* (2004), investigando la reacción de una bentonita (esmectita) de Wyoming con NaCl y aguas salobres ricas en  $\text{MgCl}_2$ , a diferentes temperaturas y pHs, concluyeron que cierta proporción de la montmorillonita es probablemente alterada a caolinita o pirofilita bajo esas condiciones.

Por lo tanto, no se descarta que la caolinita tenga un posible origen autigénico en el suelo Travesía si asumimos, tal como se señala más adelante, que sus materiales parentales posiblemente concuerden con los de la Formación Quiamare (MMH, 1970).

Las esmectitas, en el pedón Travesía, presentan un contenido relativo que en promedio triplica al de la clorita (Cuadro 3). La mayor cantidad porcentual de esmectitas se presenta en el horizonte Ap, donde se manifiestan las propiedades expansibles más elevadas y los mayores valores de COEL (Cuadro 4). Sin embargo, a pesar que todos los horizontes estudiados por debajo del Ap mantienen niveles de esmectitas que superan el 39%, sus propiedades expansibles tienden, más bien, a disminuir con la profundidad (corroborado por observaciones de campo). Este comportamiento tuvo su explicación en el incremento del contenido de sales solubles con la profundidad y en la reacción fuertemente calcárea en la masa del suelo en gran parte del perfil. Estas dos condiciones simultáneamente reprimen la expansión de las esmectitas (Borchardt, 1989).

Por otra parte, los valores de pH y actividad de magnesio en la solución del suelo Travesía (Cuadros 2 y 5) parecen ser suficientemente elevados como para preservar minerales del tipo esmectitas, cloritas, talco, sepiolita y paligorsquita (Borchardt, 1989).

**CUADRO 5.** Iones solubles\* y sales solubles determinadas en los extractos de saturación, cada 10-cm, en el suelo Travesía.

Profund. (cm)	mmol <sup>(+)</sup> l <sup>-1</sup>															
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	CaCl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub>	CaS	MgS	CaB	MgB	NaCl	NaS	NaB
0-10	7,32	2,20	0,44	6,31	1,68	2,17	0,20	0,00	0,00	0,30	0,08	5,90	1,50	2,05	0,08	0,00
10-20	2,84	6,20	0,41	0,89	0,69	7,79	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,89	0,69	6,15	0,41	1,25
20-30	2,84	9,30	0,47	0,69	0,79	12,09	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,76	9,63	0,49	1,53
30-40	2,82	15,20	0,84	0,69	1,18	17,40	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,68	1,17	15,34	0,85	1,01
40-50	3,70	23,00	1,52	0,69	2,52	24,97	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,69	2,52	22,96	1,52	0,49
50-60	3,25	28,50	2,39	0,74	2,47	30,88	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74	2,47	28,45	2,39	0,04
60-70	3,10	31,50	2,99	0,74	2,22	33,58	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	2,25	31,03	2,95	0,06
70-80	3,00	31,50	3,74	0,79	1,68	33,84	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,81	1,73	30,68	3,65	0,39
80-90	2,80	32,00	4,42	0,79	2,17	34,97	0,05	0,00	0,00	0,07	0,19	0,74	2,02	31,45	4,10	0,00
90-100	2,55	35,25	5,17	0,84	2,37	36,36	0,05	0,00	0,00	0,23	0,66	0,65	1,81	33,83	4,08	0,00
100-110	2,50	36,75	5,51	0,89	2,57	37,23	0,05	0,00	0,00	0,32	0,93	0,62	1,78	35,05	4,02	0,00
110-120	0,85	37,25	4,64	0,79	2,42	36,02	0,05	0,00	0,00	0,63	1,91	0,20	0,62	35,69	1,92	0,00
120-130	0,75	40,25	4,19	0,94	2,52	37,23	0,06	0,00	0,00	0,80	2,14	0,19	0,52	38,21	1,05	0,00
130-140	0,95	38,50	3,74	0,94	2,52	35,23	0,06	0,00	0,00	0,75	2,01	0,25	0,66	36,46	0,79	0,00
140-150	2,05	48,00	5,45	1,58	3,85	44,69	0,07	0,00	0,00	1,10	2,67	0,57	1,38	45,63	1,43	0,00
150-160	1,80	47,50	4,99	1,83	3,85	46,00	0,06	0,00	0,00	1,31	2,76	0,57	1,19	46,33	0,81	0,00
160-170	1,75	52,50	5,80	2,32	4,09	50,02	0,07	0,00	0,00	1,78	3,14	0,62	1,09	50,88	0,72	0,00
170-180	1,90	52,75	6,47	2,37	4,54	49,37	0,07	0,00	0,00	1,85	3,54	0,63	1,20	50,62	0,85	0,00
180-190	1,90	53,75	6,67	2,52	5,13	49,37	0,08	0,00	0,00	2,04	4,14	0,60	1,22	51,42	0,21	0,00
190-200	2,00	59,75	6,67	3,01	5,62	51,11	0,08	0,40	0,73	2,18	4,07	0,66	1,22	54,79	0,00	0,00
200-210	1,85	60,75	6,47	2,96	5,67	54,92	0,08	0,35	0,66	2,13	4,09	0,61	1,17	57,27	0,00	0,00
210-220	1,80	60,25	5,89	2,91	5,97	52,41	0,09	0,67	1,37	1,84	3,77	0,56	1,15	55,21	0,00	0,00
220-230	1,95	62,75	6,26	3,31	5,82	53,72	0,09	0,72	1,26	2,14	3,77	0,67	1,17	57,15	0,00	0,00
230-240	1,85	66,50	6,87	3,60	7,01	57,96	0,10	0,94	1,84	2,23	4,34	0,60	1,17	60,73	0,00	0,00
240-250	1,80	64,50	6,55	3,60	6,76	56,33	0,09	0,99	1,85	2,19	4,10	0,60	1,13	58,89	0,00	0,00

\* Promedio de tres determinaciones.

CaS = [CaSO<sub>4</sub>]; MgS = [MgSO<sub>4</sub>]; CaB = [Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]; MgB = [Mg(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]; NaS = [Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>]; NaB = [NaHCO<sub>3</sub>]; [K<sup>+</sup>] ~ [KCl]

Los tres últimos también se observan en la fracción arcilla de este suelo pero sus contenidos son bajos (<3%) o ausentes; especialmente para la paligorsquita (Cuadro 3). Por esta razón, las condiciones de preservación parecen ser sólo favorecidas a grandes profundidades; donde se presentan las mayores actividades de magnesio en la solución del suelo.

En cuanto a la mineralogía de las arenas densas (Cuadro 6), ésta es dominada por la presencia de minerales susceptibles a la alteración (especialmente epidota y micas). En términos generales, la poca concentración de materiales resistentes como circón y turmalina ratifica la naturaleza reciente, pedológicamente hablando, del pedón Travesía.

**CUADRO 6.** Mineralogía de arenas densas y proporción de intemperismo (C+T)/(A+P), para horizontes genéticos del suelo Travesía, obtenidos por microscopía de luz polarizada.

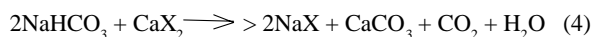
Mineral	Horizontes				
	Ap	Bw1	Bw2	Bw3	C1
	----- % -----				
anatasa	-	-	0,2	-	-
augita	0,6	0,2	-	-	-
biotita	1,8	4,8	0,9	10,4	4,9
circón	11,0	5,5	1,4	1,6	1,0
epidota	54,9	31,3	5,6	0,6	0,9
glaucofana	1,8	2,5	0,5	0,2	1,0
granate	-	0,5	-	0,4	0,1
hornblenda	-	-	1,4	-	-
moscovita	9,0	9,4	69,8	36,8	83,3
opacos	18,4	40,9	18,3	45,0	8,2
rutilo	0,2	-	0,2	0,2	0,1
tremolita	-	-	0,2	-	-
turmalina	0,8	0,2	1,4	0,2	-
zoisita	1,6	4,8	0,2	4,6	0,3
(C+T)/(A+P)	3,0	0,8	1,2	9,0	0,8

(C+T) = Circón + Turmalina; (A+P) = Anfíboles + piroxenos

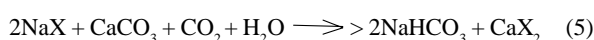
**Procesos pedogenéticos.** Fuertes acumulaciones de carbonatos precipitados de iones divalentes están presentes en los primeros 100 cm del perfil del suelo y a profundidades por debajo de 150 cm (Cuadro 2). En ambas situaciones, el contenido de carbonatos parece decrecer regularmente cuando se incrementa la profundidad. Esta particular distribución de carbonatos sugiere que gran parte de los materiales parentales fueron originalmente calcáreos y los carbonatos precipitados (con mayor cantidad de  $\text{CaCO}_3$ ) ya se encontraban incorporados en los materiales que dieron origen al suelo. Aunque el incremento de arcilla en el horizonte B es suficiente para un horizonte argílico, la naturaleza inicialmente calcárea de los materiales parentales indica que los procesos de translocación de arcilla no serían factibles porque no se ha producido la remoción de agentes cementantes necesaria para la dispersión y posterior migración de las partículas coloidales del suelo (Soil Survey Staff, 1975). Por otra parte, se presentó pedoturbación apreciable bajo la forma de caras de fricción en el horizonte B (Cuadro 1); otra evidencia que señala la imposibilidad de formación del horizonte argílico (Soil Survey Staff, 1975).

En la base del horizonte Bw1 del suelo Travesía, el esqueleto grueso y las fracciones de arena más gruesa presentan gran cantidad de concreciones de sesquióxidos de hierro-manganeso. Esto podría tener una explicación parcial en el fenómeno de ferrólisis (Schargel, 1984; Schargel *et al.*, 1988; Soil Survey Staff, 1999). El proceso total consiste de una sucesiva y alternada secuencia de reacciones de oxidación-reducción. Durante la reducción, el poco soluble  $\text{Fe}^{3+}$  se transforma en el soluble  $\text{Fe}^{2+}$ , el cual es fuertemente adsorbido por las esmectitas (Saejiew *et al.*, 2004) y desplazaría a los cationes intercambiables que son posteriormente removidos por lixiviación. Durante la oxidación, el  $\text{Fe}^{2+}$  se convierte nuevamente en compuestos insolubles de  $\text{Fe}^{3+}$ , que serían incorporados ahora como concreciones y, además, se genera hidrógeno intercambiable ( $\text{H}^+$ ) por el déficit momentáneo de bases cambiables. Sin embargo, la naturaleza intrínsecamente calcárea de Travesía podría neutralizar esta acidez intercambiable evitando la destrucción de los filosilicatos arcillosos y la acidificación del suelo. Esta hipótesis es plausible porque las esmectitas ácidas, al igual que las homoiónicas en Na y Li, son buenos materiales expansibles (Komadel, 2003).

Guerrero *et al.* (2002) propusieron la reacción (4) como una explicación parcial de la génesis de suelos sódicos alcalinos con PSI < 60% y elevados valores de pH producto de la acumulación de NaHCO<sub>3</sub>.



El suelo Travesía tiene NaCl como sal predominante (Cuadro 4) en prácticamente todo el perfil y concentraciones de NaHCO<sub>3</sub>, aunque relativamente bajas, sólo presentes entre 10-80 cm de profundidad. La incipiente producción de NaHCO<sub>3</sub>, en condiciones naturales, podría ser entonces explicada por la ecuación (5); inversa de la ecuación (4):



Sin embargo, en condiciones naturales, la reacción (5) parece ser sólo favorecida cuando se presenta una relativamente baja salinidad total porque no hay NaHCO<sub>3</sub> en los extractos de pasta saturada (Cuadro 5) para profundidades por debajo de 80 cm; donde la salinidad creciente viene reflejada por CEs >4 dS m<sup>-1</sup> en los extractos de saturación (Cuadro 2). Como el exceso de sales limita la expansibilidad de las esmectitas (Borchardt, 1989; Hofmann *et al.*, 2004) se restringe, en consecuencia, el intercambio de sodio por calcio en el intercambiador necesario para la producción de NaHCO<sub>3</sub> y elevados valores de pH (> 8,5).

La reacción (5) sería, quizás, una de las pocas vías alternas para almacenar ion Ca<sup>2+</sup> en un suelo sódico (además de la precipitación de sus carbonatos) porque reacciones de doble descomposición entre el NaCl y el CaCO<sub>3</sub>, postuladas inicialmente por Hilgard (Pla, 1967; Szabolcs, 1969), producirían el muy soluble CaCl<sub>2</sub>. Esta sal es incompatible con la presencia simultánea de CaCO<sub>3</sub> y NaHCO<sub>3</sub>, ya que, sólo estaría permitida una muy baja concentración de Ca<sup>2+</sup> en la solución del suelo (Guerrero *et al.*, 2002). Las inexistentes o muy bajas concentraciones de CaCl<sub>2</sub> en Travesía (Cuadro 5) son evidencia de la imposibilidad de la doble descomposición entre el NaCl y el CaCO<sub>3</sub>.

Por otra parte, el comportamiento (pHs > 9,00) para las suspensiones suelo-agua de relación 1:5 (Cuadro 2) también podría ser explicado con base en la reacción (5). Valores elevados de pH, atribuibles

a la formación de NaHCO<sub>3</sub> (Guerrero *et al.*, 2002), requerirían la presencia simultánea de CaCO<sub>3</sub> y de un intercambiador sódico (generado por la presencia de grandes cantidades de NaCl) en condiciones de alta humedad. Ello se infiere porque en la zona de 110-150 cm, donde están prácticamente ausentes los carbonatos precipitados (Cuadro 2), los pHs relativamente elevados (>9,00) no se presentan.

Fossum *et al.* (2005) señalan que la comprensión del papel que juegan las sales en estabilizar fases densas de arcillas tiene su significado práctico en el contexto de las formaciones de arcillas originalmente sedimentadas en aguas salinas, las cuales pueden ser progresivamente desestabilizadas (dispersadas) por subsecuente lavado con aguas menos salinas. Por otra parte, Hofmann *et al.* (2004), Pérez del Villar *et al.* (2005) y Fernández *et al.* (2005) han encontrado evidencias que sugieren que las esmectitas pueden ser preservadas sin transformaciones minerales (inclusive durante varios millones de años), en ambientes naturales que han sido invadidos por aguas salobres (marinas o evaporíticas); siempre que las condiciones químicas y térmicas sean similares a aquellas de su formación.

En Venezuela, ha sido señalado que en el Alto Apure (Schargel, 1984), en la planicie aluvial del río Portuguesa (Schargel *et al.*, 1988) y en los llanos altos centrales del estado Guárico (Guerrero *et al.*, 2004), los elevados contenidos de sodio intercambiable pueden estar relacionados a la acumulación de aguas, con abundante sodio, que se concentraron por evaporación en áreas depresionales. Esto favoreció la sustitución de los cationes intercambiables por sodio y dio lugar a suelos salino-sódicos durante el período árido que marca el final del Pleistoceno.

Por otra parte, si estas acumulaciones de sodio ocurren con materia orgánica en un ambiente reductor, podría favorecerse la formación de sales alcalinas de sodio (bicarbonatos y carbonatos), altos valores de pH y sustituciones elevadas con sodio en un complejo de cambio dominado por esmectitas (Guerrero, 1998; Guerrero *et al.*, 2004). Posteriormente, el clima más húmedo que caracterizó al Holoceno (Schargel, 1984; Schargel *et al.*, 1988; Guerrero *et al.*, 2004) permitiría el lavado de las sales acumuladas evolucionando los suelos salinos-sódicos a sódicos.

Según el léxico estratigráfico de Venezuela (MMH, 1970), la Formación Quiamare presenta su sección tipo en Anzoátegui nororiental y corresponde a una secuencia de arcilitas gris verdosas, rojas pardas y gris azuladas, con intercalación de areniscas guijarrosas, lutitas carbonáceas y lignito, la cual se extiende hacia el sur pasando lateralmente junto a la Formación Chaguaramas en el estado Guárico.

Esta última ha sido descrita como una alternancia de areniscas, lutitas y lignitos de agua salobre, con desarrollos locales de arcillas de agua fresca y conglomerados de guijarros arcillosos similares a los de la formación Quiamare (MMH, 1970).

A pesar de que el pedón Travesía está situado en Tucupido, al oriente del estado Guárico, la descripción litológica de la Formación Quiamare es más concordante con las características morfológicas, químicas y mineralógicas del pedón Travesía, donde los colores gris verdoso y gris azulado allí descritos, especialmente en el horizonte C, son compatibles con la importante presencia de clorita (filosilicato de color verde) y de materiales calcáreos que se encontraron en este pedón.

Por tanto, si se asume que los materiales parentales del pedón Travesía pertenecen a la Formación Quiamare, posiblemente su ambiente de deposición varió principalmente entre continental y aguas marinas muy llanas, con pocos niveles de agua marinas abiertas, cuya formación reflejó el rápido relleno de una cuenca en donde la tasa de sedimentación se mantenía a la par con la subsidencia (MMH, 1970). Esto podría explicar la salinidad de origen en este suelo salino-sódico.

Con relación a Travesía, los elevados contenidos de sodio intercambiable serían consecuencia de la acumulación de aguas salobres ricas en sodio (mayoritariamente NaCl de origen marino), en contacto con sus materiales parentales, que favorecieron la incorporación parcial de este elemento a las esmectitas por reacciones de intercambio catiónico, culminando en un suelo salino-sódico (con poca diferenciación de horizontes; quizás sólo A sobre C) durante el período árido Pleistocénico.

Por otra parte, el clima holocénico más húmedo, favoreció el lavado de sales solubles aún en aquellas áreas con drenaje restringido local donde también

se evaporaban e infiltraban aguas de desborde de los posibles cursos fluviales existentes en la época. Sin embargo, no fueron suficientes para un lavado efectivo de aquellas sales solubles depositadas a mayores profundidades en el perfil, especialmente por debajo de los 120 cm (Cuadro 2), debido a la muy baja permeabilidad de estos estratos producto de la elevada presencia de materiales esmectíticos naturalmente compactados.

No obstante, el lavado de sales que se produjo en los horizontes superiores permitió que las esmectitas experimentaran ciclos alternos de expansión-contracción y dieran lugar a los rasgos distintivos de los vertisoles en este suelo como lo son las grietas y las caras de fricción de los horizontes Ap y Bw. Finalmente, el efecto modelador de las aguas concluyó en el actual paisaje ondulado en la zona.

Por otra parte, la elevada salinidad del pedón Travesía también ha limitado la expansión de las esmectitas impidiendo sustituciones por sodio más allá del 32% e inhibido la formación de sus sales alcalinas; estas últimas promotoras de una mayor sustitución con sodio en el complejo de cambio y elevados valores de pH (Guerrero *et al.*, 2002). No obstante, la consiguiente evolución del suelo salino-sódico a sódico, si se presentaran condiciones de buen drenaje (poco probable) en profundidad y mayor humedad, podría ser plausible porque la matriz calcárea del suelo hace prever la formación y acumulación de estas sales alcalinas con la presencia de NaCl.

## CONCLUSIONES

- Se infiere que el suelo es producto de la desintegración e intemperización de rocas sedimentarias del terciario (posiblemente limolitas arcillosas calcáreas pertenecientes a la Formación Quiamare) que interaccionaron con aguas salobres ricas en sodio en áreas de sedimentación de los llanos centrales del estado Guárico. Esto favoreció la sustitución de los cationes intercambiables por sodio en las esmectitas y dio lugar a un suelo salino-sódico durante el período árido de finales del Pleistoceno. La pobre permeabilidad intrínseca del suelo, especialmente a profundidades mayores de 117 cm, ha limitado el lavado de sales aún durante el período Holoceno más

húmedo y ha impedido la evolución del suelo salino-sódico a sódico. Sin embargo, este clima más húmedo ha permitido la acción de procesos erosivos que dieron lugar al paisaje ondulado en la zona que actualmente ocupa el pedón y donde su posición en el tope de una colina, posiblemente, se deba a su naturaleza más densa que la de los materiales circundantes.

- Si existiesen condiciones de intenso lavado y buena permeabilidad, la hipotética evolución hacia un suelo sódico Travesía es posible a pesar de la fuerte acumulación de sales neutras de sodio que harían pensar en una desalinización y desodificación completa. Esto se basa en que las sales neutras de este elemento, en presencia de un intercambiador de iones,  $\text{CaCO}_3$  y suficiente humedad, podrían producir sus sales alcalinas y, por tanto, degradación ulterior de la estructura del suelo y elevados valores de pH ( $> 8,5$ ).
- Por otra parte, CES y contenidos de  $\text{CaCO}_3$  conjuntamente elevados pueden estar restringiendo PSIS  $> 32\%$  en el complejo de intercambio del suelo Travesía a pesar de los grandes contenidos de NaCl. Ello puede ser debido al efecto salino y a la producción de silicatos hidratados de Ca-Al interlaminares (agentes cementantes en condiciones de baja salinidad). Respectivamente ambos factores limitarían la expansibilidad de las esmectitas y, en consecuencia, el intercambio catiónico.

### AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Dr. Graciano Elizalde por su colaboración en la interpretación de los espectros de difracción de rayos X y en la identificación de los minerales de las arenas densas, al Dr. Richard Schargel por la clasificación taxonómica del perfil.

### BIBLIOGRAFÍA

- Aleixandre, T. y A. Pinilla. 1968. Algunas modificaciones a las técnicas aplicadas al estudio mineralógico de fracciones gruesas o arenas. *Anales de Edafología y Agrología*. Tomo XXVII. Número 7-8, pp. 563-567.
- Bohn, H. L., B. L. Mcneal and G. E. O'connor. 1979. *Soil Chemistry*. 1ra ed. John Wiley & Sons, New York, 329 pp.
- Borchardt, G. 1989. Smectites. **In:** 'Minerals in Soil Environments' (Dixon y Weed ed), Cap. 14, pp. 675-727, 2da ed. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- Buol, S. W., F. D. Hole and R. J. Mccracken. 1980. *Soil genesis and classification*, 2nd ed. Iowa State Univ. Press, Ames, Iowa.
- Cruz-Romero, G. and N. T Coleman. 1975. Reactions Responsible for High pH of Na-saturated Soils and Clays. *J. Soil Sci.* 26 (2):169-175.
- Eaton, F. M. 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil Sci.* 69:123-133.
- Fernandez, A. M., D. Arcos, M. Pelayo, M. Tsige, J. M. Fernandez-Soler, P. Rivas and L. Pérez del Villar. 2005. Natural analogues in performance assessment of a nuclear waste disposal: the Cortijo de Archidona deposit and the salinity effect. **In:** *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, Tours, France, pp. 391-392.
- Fossum, J. O., E. Gudding, D. D. M. Fonseca, Y. Meheust, E. Dimasi, T Gog and C. Venkataraman, C. 2005. Observations of orientational ordering in aqueous suspensions of a nano-layered silicate. *Energy* 30:873-883.
- García-Miragaya, J., R. Schargel, M. Ramia and L. Martín. 1990. Chemical Properties of soils where Palm Trees Grow in Venezuela. *Commun. in Soil Sci. Plant Anal.* 21:337-349.
- Guerrero, J. 1998. Génesis de Suelos Sódicos en Diferentes Ambientes Edafoclimáticos de Venezuela. Tesis Doctoral, Aragua, Venezuela. Universidad Central de Venezuela, Maracay.
- Guerrero-Alves, J., I. Pla-Sentís and R. Camacho. 2002. A model to explain high values of pH in an alkali sodic soil. *Scientia Agricola* 59 (4):763-770.

- Guerrero-Alves, J., I. Pla-Sentís y R. Camacho. 2004. Génesis de un suelo sódico alcalino en Chaguaramas, estado Guárico, Venezuela. *Agro-nomía Trop.* 54(4):433-459.
- Gupta, R. K. and I. P. Abrol. 1990. Reclamation and management of alkali soils. *Indian J. Agric. Sci.* 60(1):1-16.
- Herbert, H. J., J. Kasbohm, H. C. Moog and K. H. Henning. 2004. Long-term behavior of the Wyoming bentonite MX-80 in high saline solutions. *Applied Clay Science* 26:275-291.
- Hofmann, H., A. Bauer and L. N. Warr. 2004. Behavior of smectite in strong salt brines under conditions relevant to the disposal of low- to medium-grade nuclear waste. *Clays and Clay Minerals* 52:14-24.
- Jackson, M. L. 1969. Soil chemical analysis advanced course. 2 da ed. M.L. Jackson, USA.
- Komadell, P. 2003. Chemically modified smectites. *Clay Minerals* 38:127-138.
- Malagón, D. 1979. Fundamentos de Mineralogía de Suelos. Ira ed. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT), Mérida (Venezuela). 747 pp.
- Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN). 1999. Mapa de Suelos 1:250.000. Servicio Autónomo de Conservación de Suelos y Cuencas Hidrográficas, Dirección de Suelos y Aguas, Caracas.
- Ministerio de Minas e Hidrocarburos (MMH). 1970. Léxico estratigráfico de Venezuela. Boletín de Geología, Publicación Especial N° 4. 2da. Edición. Ed. Sucre. Caracas, Venezuela. 756 p.
- Parfenoff, A., C. Pomerol ex J. Tourenq. 1970. Les Minéraux en Grains. Méthodes d' étude et détermination. 6ta ed. Masson et Cie, éditeurs, París (Francia). 578 pp.
- Pérez del Villar, L., M. Pelayo, A. M. Fernandez, J. S. Cozar, A. Delgado, E. Reyes, J. M. Fernandez-Soler and M. Tsige. 2005. Na-smectites in the Cala de Tomate bentonite deposit (Spain): a natural analogue of the salinity effect on the bentonite barrier of a radwaste disposal. **In:** *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, Tours, France, pp. 387-388.
- Pla Sentís, I. 1967. Evaluación cuantitativa de los efectos de los bicarbonatos en el agua de riego sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos y factores que influyen sobre la magnitud de tales efectos. *Revista Facultad de Agronomía. Instituto de Edafología. Maracay.* 88 pp.
- Pla Sentís, I. 1969. Metodología de Laboratorio recomendada para el diagnóstico de salinidad y alcalinidad en suelos, aguas, y plantas. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Instituto de Edafología. Maracay 94 pp.
- Pla Sentís, I. 1983. Metodología para la Caracterización Física con fines de Diagnóstico de Problemas de Manejo y Conservación de Suelos en Condiciones Tropicales. *Revista Alcance* N° 32. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Maracay.
- Pla Sentís, I. 1985. Origen, Distribución y Diagnóstico de Suelos Afectados por Sales en Venezuela. *Rev. Fac. Agron. (Maracay)* XIV (1-2):125-150.
- Saejiew, A., O. Grunberger, S. Arunin, F. Favre, D. Tessier and P. Boivin. 2004. Critical Coagulation Concentration of Paddy Soil Clays in Sodium-Ferrous Iron Electrolyte. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:789-794.
- Salinity Laboratory Staff. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. United States Department of Agriculture (USDA), Agriculture Handbook Nro 60. Washington.
- Schargel, R. 1984. Características y Génesis de Suelos con Horizontes Nátricos en el Alto Apure. *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología*, 5:85-89. (Serie Producción Agrícola).

- Schargel, R.; P. Arrieta y R. Sequera. 1988. Características y Manejo de una Asociación de Tropaqualfs, Haplustalfs y Natraqualfs en el Estado Portuguesa, Venezuela. *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología* 6(1-2):9-16.
- Soil Conservation Service. 1981. *Soil Survey Manual*, Chapter 4. Examination and description of soils in the field. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 105 pp.
- Soil Survey Division Staff. 1993. *Soil Survey Manual USDA Handbook 18*. United States department of Agriculture Soil Management Support Services. SMSS Technical Monograph Nº 19 Four Edition. Virginia Polytechnic Institute and State University. 436 pp.
- Soil Survey Staff. 1975. *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. United States Department of Agriculture. Soil Conservation Service, 744 pp.
- Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. United States Department of Agriculture. Soil Conservation Service, 2nd ed.
- Soil Survey Staff. . 2006. *Keys to Soil Taxonomy*. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Tenth Edition. 341pp.
- Szabolcs, I. 1969. The Influence of Sodium Carbonate on Soil Forming Processes and Soil Properties. *Agrokémia és Talajtan* 18:37-68.
- Van beek, C. G. and N. Van Breemen. 1973. The Alkalinity of Alkali Soils. *J. Soil Sci.* 24:129-136.