

CAPÍTULO 3

DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS SULFATADOS ÁCIDOS DEL VALLE ALTO DEL RÍO CHICAMOCHA

3. DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS SULFATADOS ÁCIDOS DEL VALLE ALTO DEL RÍO CHICAMOCHA

La delimitación y caracterización de suelos sulfatados ácidos (SSA) del valle alto del río Chicamocha fue realizada por Gissat (2006), mediante un estudio semidatallado, escala 1:25000. Se definieron cinco perfiles modales o pedones representativos de condiciones pedogenéticas de SSA, clasificados en la categoría de familia (Soil Survey Staff, 2010). Las descripciones detalladas de los perfiles permitieron definir horizontes diagnósticos genéticos a partir del análisis de los componentes morfológicos, físicos, químicos y mineralógicos.

La clasificación de los perfiles modales de suelos hasta la categoría de familia y la caracterización de horizontes diagnósticos sulfatados, se convierte en la primera información de este tipo para SSA continentales en el país.

3.1 LEVANTAMIENTO DE SUELOS “ESPECIFICACIONES METODOLÓGICAS”

3.1.1 Recolección de la información básica. Se consultaron referencias de información básica sobre estudios de geología, geomorfología, fisiografía y suelos de la zona, las cuales se relacionan a continuación:

- Proyecto Boyacá No. 1. Sistema de adecuación de tierras de los valles Alto Chicamocha y Firavitoba (INCORA, 1965).
- Estudio detallado de los suelos de la parte plana y general del sector quebrado de los municipios de Duitama y Paipa, para fines agrícolas (IGAC, 1968).

-
- Estudio de factibilidad Proyecto Boyacá, Alto Chicamocha y Firavitoba. Vol. III. Estudio de suelos (INCORA, 1975).
 - Estudio de los suelos de la margen izquierda del río Chicamocha, en el noreste de Duitama (IGAC, 1968b).
 - Estudio general de suelos de los municipios de Duitama, Sogamoso, Cuitiva, Firavitoba, Tópaga, Tota, Tibasosa, Iza, Nobsa y Monguí (IGAC, 1980).
 - Geología y geomorfología del valle alto del río Chicamocha (HIMAT, 1985).
 - Registros climáticos (IDEAM, 1994-2009).

3.1.2 Metodología del levantamiento. Con base en los estudios de suelos existentes, principalmente los realizados por el INCORA desde 1975 y el elaborado por FONAT-HIMAT (1985), escala 1:25000, los cuales tuvieron como base espacial la identificación de unidades geomorfológicas, se procedió a la delimitación de las áreas lacustre y coluvio-aluvial que conforman el valle alto del río Chicamocha.

Teniendo en cuenta la cartografía base de estas unidades a escala 1:25000, se realizó una primera inspección de campo con barreno, para verificar la existencia de características sulfatadas ácidas, siguiendo la metodología que describe Poelman (1972), Hicks *et al.*, (1999), Dent y Dawson (2000).

Aprovechando la base cartográfica predial, escala 1:5000, elaborada con la implementación del DRACH en 1996, se transfirieron a dicha cartografía las unidades de suelos del estudio 1:25000 del INCORA, con el fin de construir una franja de muestreo para ser sometida a mapeo libre, empleando la metodología de levantamiento de suelos del IGAC.

Se utilizó una densidad de 16 observaciones cada 100 ha, de las cuales el 20 % correspondió a observaciones de identificación (cajuelas).

La información de campo obtenida sobre cajuelas se registró en formatos elaborados especialmente para describir características de SSA. En el

levantamiento de suelos se trabajó en campo con un rendimiento de 25 ha/día, labor que se complementó con trabajo de oficina para ajustar líneas de suelos. Para definir la distribución espacial de SSA en el área de estudio, se realizaron 576 observaciones distribuidas en 115 cajuelas de observación y 461 chequeos de comprobación con barreno.

A partir de las diferentes observaciones y caracterizaciones realizadas en el levantamiento semidetallado de SSA, se definieron en campo cinco perfiles modales representativos, tomando como referencia las consideraciones reportadas por Dent y Pons (1995) y Dear *et al.*, (2002).

La descripción morfológica en campo de perfiles modales contempló las siguientes características:

- Horizontes maestros (A, B, O, C).
- Propiedades diagnósticas: horizontes sulfúricos, hísticos, cámbicos y materiales sulfídicos que identifican procesos ocurridos (subíndices j, g, w, e, a, i).
- Profundidad de los horizontes sulfúricos y/o materiales sulfídicos.
- Características físicas: textura, estructura, condiciones reduximórficas (cantidad y color), nivel freático (profundidad, salinidad y acidez).
- Características químicas: pH en agua, conductividad eléctrica (CE), potencial redox (Eh), prueba cualitativa de sulfatos (reacción a BaCl₂) y método del pH en peróxido de hidrógeno para determinar materiales sulfídicos (SSAP).

Las muestras de suelos recolectadas en campo se empacaron herméticamente para mantener la humedad de campo, tal como lo muestra la Figura 3.1.

3.1.3 Análisis de laboratorio. Las evaluaciones químicas, físicas, mineralógicas y micromorfológicas relacionadas a continuación, se determinaron bajo las metodologías establecidas en el *Manual de Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos del IGAC* (2006) y el *Handbook of*

Soil Analysis (2006). Otras evaluaciones específicas para SSA se hicieron siguiendo los métodos establecidos por Ahern *et al.* (2004).

Análisis químicos de suelos

- pH por el método potenciométrico, medido en una relación suelo: agua 1:1.



Figura 3.1 Muestreo de horizontes en SSA para pruebas analíticas de laboratorio: el empaque se hizo cuidadosamente, orientando la muestra y recubriéndola con papel aluminio para evitar la oxidación del suelo.

Fuente: Gissat (2006).

- Potencial redox (Eh) a partir del electrodo de platino en pasta de saturación o directamente sobre muestras en campo.
- Acidez intercambiable por el método Yuang modificado, extracción con KCl 1N.
- Carbono orgánico (%C) oxidable por el método Walkley Black o de combustión húmeda.
- Materia orgánica (%MO) mediante el método de ignición a 400 °C.
- Capacidad de intercambio catiónico CIC y bases de cambio se analizaron utilizando el extracto en acetato de Amonio 1N pH 7, determinando Ca, Mg, K y Na por espectrofotometría de absorción atómica.

- Azufre disponible o extractable por el método de fosfato monobásico, determinación por turbidimetría.
- Elementos menores disponibles: Mn, Zn, Cu, y Fe se determinaron por el método de Olsen modificado y cuantificación con absorción atómica.
- Salinidad completa y fracción soluble del suelo en extracto de saturación: pH en pasta de saturación; C.E. cuantificada en el extracto con conductímetro; calcio, magnesio, potasio y sodio, por absorción atómica en el extracto filtrado; sulfatos por turbidimetría, cloruros, carbonatos y bicarbonatos por titulación potenciométrica; relación de adsorción de sodio (RAS); porcentaje de saturación de sodio (PSI); sodio intercambiable; Fe soluble por absorción atómica y Al soluble en el extracto por absorción atómica mediante óxido nitroso.
- Hierro y aluminio extractables con oxalato ácido de amonio (activos), extractables con citrato-ditionito de sodio y extractables con pirofosfato de sodio.
- Sulfato de calcio cuantitativo.
- Análisis elementales totales por digestión ácida, determinación por absorción atómica: silicio, aluminio (óxido nitroso), hierro, calcio, magnesio, azufre, sodio, potasio, cobre, manganeso y cinc (acetileno).

Análisis de aguas

Se llevó a cabo en aguas freáticas tomadas en cada uno de los perfiles modales. Fueron analizadas por la misma metodología de la fase soluble del suelo expuesta anteriormente. Se realizó la clasificación de la calidad del agua de acuerdo con el sistema USDA-University of California (1999). Se efectuaron determinaciones: C.E., RAS, análisis completo de cationes y aniones (calcio, magnesio, potasio, sodio, sulfatos, cloro, carbonatos, bicarbonatos, hierro, aluminio y silicio en agua).

Análisis mineralógicos y micromorfológicos

- Mineralogía de arcillas por difracción rayos X y arenas sin fraccionamiento.
- Elaboración de sección delgada y análisis micromorfológico del suelo.

Análisis físicos

- Color (Tabla Munsell)
- Densidad aparente (método del terrón y/o cilindro).
- COEL método del rodillo y/o método estándar.
- Estabilidad estructural por el método de Yoder.
- Límites de Atterberg (líquido y plástico).
- Módulo de ruptura.
- Porosidad: distribución de poros (intraagregados) y densidad real por el método del picnómetro.
- Textura: método pipeta y Bouyoucos.
- Coeficiente de dispersión (dispersión natural de arcillas).
- Retención de humedad: prueba de tensiones, método del girasol (invernadero), capacidad de campo (campo).
- Infiltración y conductividad hidráulica: infiltrómetro de doble anillo, permeámetro de carga constante en muestras sin perturbar.
- Profundidad efectiva (cm)
- Valor n (grado de madurez del suelo).

Acordes con los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica de perfiles modales, se definieron criterios de manejo de las propiedades más revelantes en SSA, con el fin de concebir integralmente la recuperación del nivel productivo de estos suelos.

Análisis de formas específicas solubles y estimación de sales secundarias en suelos y aguas sulfatadas. Por los efectos de las características sulfatadas ácidas de suelos y aguas de drenaje como factor de formación en SSA (Fitzpatrick et al., 2002; Hicks, 2002; Lamontagne et al., 2004), se determinó la relación entre las aguas freáticas y el perfil modal típico, a partir de parámetros químicos y especiación de sales sulfatadas, ácidos solubles en suelos y iones solubles determinados en las aguas con el método Parkhurst y Appelo (1999).

3.1.4 Delimitación de unidades cartográficas y de manejo. Concluidos los trabajos de campo y laboratorio relacionados con la identificación

y caracterización de los SSA en el área de estudio, se elaboró el mapa final de suelos, a partir de la delineación digital de unidades cartográficas, utilizando el *software* ArcGIS v10.1. Cada delineamiento cartográfico identifica espacialmente un área con contenido de suelos clasificados taxonómicamente hasta la categoría de familia.

Las unidades cartográficas resultantes fueron consociaciones y complejos. Cuando en una unidad cartográfica predomina un suelo en más del 70 % de la superficie, se dice que es una consociación; cuando son dos o más suelos los que se encuentran en la unidad pero no permiten separaciones definidas, se agrupan en complejos; esto se dió a la escala semidetallada del estudio.

Las fases de manejo aparecen definidas por una nomenclatura de limitantes propuesta por el sistema de clasificación especializado para SSA que describe el International Institute for Land Reclamation and Improvement, ILRI Wageningen-The Netherlands (Dent, 1986).

3.2 CRITERIOS UTILIZADOS PARA LA CLASIFICACIÓN Y MANEJO DE SSA

3.2.1 Clasificación taxonómica. La clasificación taxonómica se hizo en la categoría de familia en cada uno de los perfiles modales, de acuerdo con la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2010).

Los parámetros determinados por Hicks *et al.* (1999), Dent y Dawson (2000), y Soil Survey Staff (2010), permitieron diferenciar la clasificación taxonómica de SSA actuales (maduros), y SSA potenciales (inmaduros), teniendo en cuenta criterios de pH, *valor n*, sulfatos solubles y azufre total. Igualmente, la división de SSA de acuerdo con su estado de acidificación (suelos sulfatados ácidos actuales-SSAA; sulfatados ácidos potenciales-SSAP; suelos pseudosulfatados ácidos-SPSA) se tomó como factor que condiciona su manejo y recuperación.

Para determinar la diferencia de las condiciones de SSAA y SSAP se utilizó un diagrama de decisión (Figura 3.2) fundamentado en la experiencia

recolectada en la descripción de los perfiles modales de los SSA en el valle alto del río Chicamocha y de acuerdo con los criterios expresados por Dent y Dawson (2000), Hicks *et al.* (1999), Soil Survey Staff (2010).

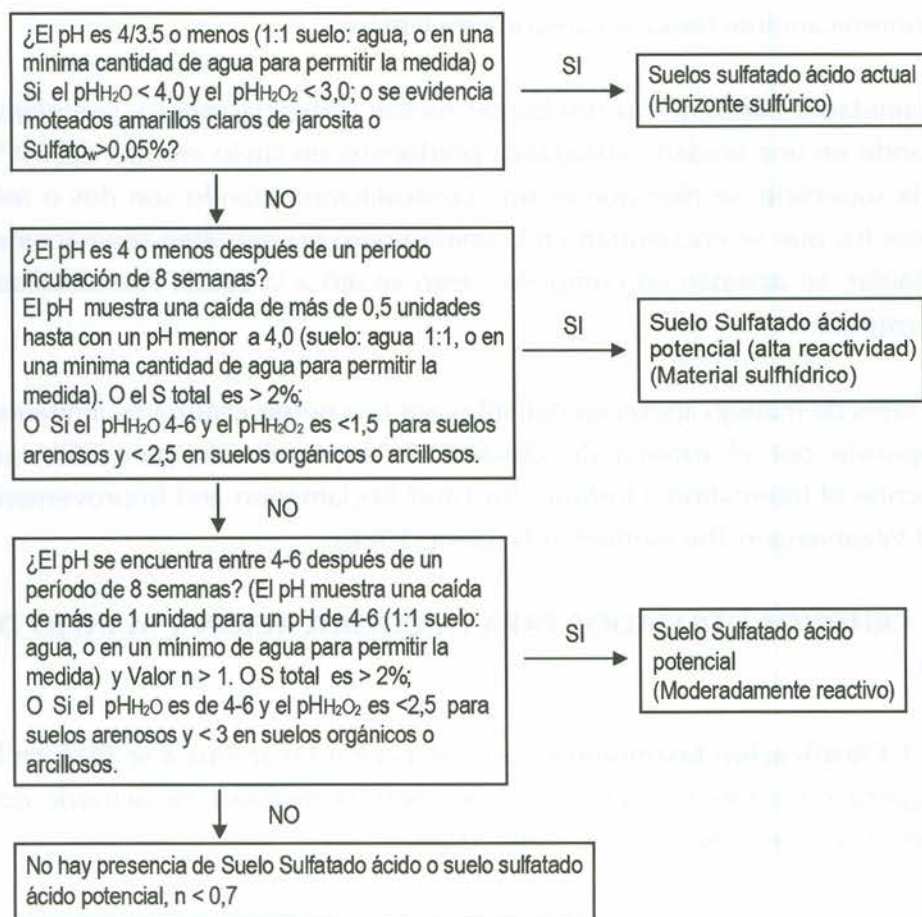


Figura 3.2 Diagrama de decisión para establecer la clasificación de suelos sulfatados en el valle alto del Río Chicamocha.

Fuente: Dent & Dawson (2000), Hicks *et al.*, (1999).

The American Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2010), en niveles de subgrupo y gran grupo, define las siguientes clases de suelos sulfatados ácidos potenciales-SSAP:

Typic Sulfihemists son suelos sulfatados ácidos potenciales, dominados por materiales orgánicos, que presentan materiales sulfídicos dentro de los 100 cm de la superficie del suelo.

Typic Sulfaquents son *Aquents* con materiales sulfídicos minerales dentro de los primeros 50 cm de la superficie del suelo.

Los suelos influidos por sulfurización pero no suficientemente ácidos, pueden ser clasificados como Subgrupos Sulfic, estos han sido llamados suelos pseudosulfatados ácidos-SPSA (Breeman, 1982). Ellos pueden no desarrollarse SSA actuales, debido a la autoneutralización (Bibi, 2012), producto de la presencia de carbonatos de calcio o cationes básicos en el material parental, o representan un estado de postsulfurización, donde una vez fueron SSA actuales y se han venido lavando a lo largo del tiempo (Dent, 1986).

The Soil Survey Staff (2010) en niveles de subgrupo y gran grupo, define las siguientes clases de SSA con características pseudosulfatadas ácidas:

Sulfic Fluvaquents son fluvaquents maduros con una irregular distribución de materiales orgánicos a profundidad e influencia directa de sedimentos fluviales, que presentan materiales sulfídicos dentro de los 50 a 100 cm de profundidad.

Sulfic Hydraquents son suelos minerales inundados o, en áreas pantanosas, inmaduros y medianamente maduros, que presentan materiales sulfídicos dentro de los 50 a 100 cm de profundidad.

Sulfic Endoaquepts son suelos minerales maduros con características redoximórficas propias de condiciones ácuicas con pH entre 3,5 y 4,0 en los primeros 50 cm de superficie, o con moteados de jarosita y pH menores a 3,5 entre 50 y 150 cm de profundidad.

Sulfic Sulfaquerts son suelos vertisoles sulfatados con horizonte sulfúrico en los primeros 75 cm de profundidad.

Los SSA actuales son reconocidos por la presencia de un horizonte sulfúrico dentro de los primeros 50 cm de profundidad, el cual es definido como horizonte mineral u orgánico que muestra pH menor a 3,5, características redoximórficas de jarosita (Hue 2,5 Y; y croma de 6 o más) y sulfato

soluble en agua mayor a 0,05 %, si no hay presencia visible de jarosita. La denominación de horizonte perdisico ha sido utilizada para describir SSA orgánicos u orgánico-minerales sin jarosita, término importante para definir la característica ultraácida de histosoles en categoría de familia. Pueden existir SSA orgánicos u órgano-minerales sin jarosita, término importante para definir la característica ultraácida de histosoles.

The Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2010) define, en el nivel de gran grupo, las siguientes clases de suelos sulfatados ácidos actuales-SSAA:

Sulfohemists son SSA actuales dominados por materiales orgánicos en estado hémico que presentan un horizonte sulfúrico en los primeros 50 cm de la superficie.

Sulfosaprists son SSA actuales dominados por materiales orgánicos en estado sáprico que presentan un horizonte sulfúrico en los primeros 50 cm de la superficie.

Sulfaquepts son suelos minerales con horizonte sulfúrico dentro de los 50 cm de la superficie de suelo mineral y presentan condiciones ácuicas.

Sulfudepts son suelos minerales maduros con horizonte sulfúrico dentro de los 50 cm de la superficie bajo régimen údico.

Interpretando las claves taxonómicas de suelos, se emplearon los siguientes términos para la definición de familias en los suelos estudiados:

Dísica: clase de reacción aplicada a histosoles (*Typic Sulfosaprist*, *Typic Sulfohemist*) que poseen valores de pH en muestras no secadas, menores a 4,5 en CaCl_2 , 0,01 M, tomando una o más capas de materiales orgánicos dentro de la sección control.

Actividad de intercambio catiónico-AIC: (valores de la relación CIC pH 7,0 en AcONH_4 1N dividido en el porcentaje gravimétrico de arcilla): dentro de la clasificación de familias diferentes a histosoles (*Sulfic Endoaquept* y *Typic Sulfaquept*) se tuvieron en cuenta las siguientes clases de actividad:

superactiva: para valores mayores o iguales a 0,6; activa: para valores entre 0,4 y 0,6; semiactiva: para valores entre 0,24 y 0,4; subactiva: para valores menores a 0,24.

Ferrihúmica: término utilizado para clasificar familias de histosoles pertenecientes a los subgrupos Fibrists, Hemists y Saprist. Consta de sesquióxidos de hierro acomplejados con materiales orgánicos. Estos complejos pueden estar dispuestos de forma dispersa o cementada conformando grandes agregados en una capa mineral u orgánica.

Micro: término utilizado para diferenciar clases en la categoría de familia en histosoles que tienen una capa restrictiva a raíces en una profundidad menor de 18 cm con una clase granulométrica pomácea, tefral o fragmental, que lleva a la formación de duripanes, horizontes petrocálcicos, petrogypicos y plácicos, con contactos denses, líticos, paralíticos y petroféricos.

Isomésico: régimen de temperatura media anual del suelo entre 8 y 15 °C a una profundidad promedio de 50 cm, empleado como criterio de clasificación de familia en los suelos estudiados.

3.2.2 Clasificación por fases de manejo

Se determinó de acuerdo con el sistema de clasificación especializado para SSA, que describe el International Institute for Land Reclamation and Improvement, ILRI Wageningen-The Netherlands (Dent, 1986), y complementado con las referencias de Soil Survey Staff (2010). Este sistema incluye características individuales con valores limitantes que determinan el manejo de SSA: estado de acidez, salinidad, grado de madurez definido por la medida de *n*-valor, textura, clase y disposición de los materiales (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Criterios para determinar las características sulfatadas ácidas limitantes y su relación con las fases de manejo y nomenclatura de leyenda.

CRITERIOS QUÍMICOS	MATERIALES CONSTITUTIVOS Y TEXTURA																												
<p>Suelo sulfatado ácido actual Horizonte sulfúrico (pH < 3,5/4 y sulfatos solubles en agua > 0,05 %)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dentro de los 20 cm a₁ • Dentro de los 50 a 60 cm a₂ • Dentro de los 80 a 100 cm a₃ • pH > 4,0 y Sulfato soluble menor a 0,05 % a₄ 	<p>Arcillosos Arcilla lacustre o arcilla aluvial de texturas arcillosas o francoarcillosa con más de 40 cm de espesor. Donde exista un horizonte orgánico en superficie, este debe ser menor de 20 cm de espesor. C</p> <p>Orgánicos Materiales orgánicos con más de 40 cm de espesor. O</p>																												
<p>Suelo sulfatado ácido potencial Materiales sulfídicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dentro de los 20 cm p₁ • Dentro de los 50 a 60 cm p₂ • Dentro de los 80 a 100 cm p₃ 	<p>Arenosos Suelos arenosos o franco arenosos. Donde exista un horizonte orgánico en superficie este debe ser menor de 20 cm de espesor. S</p>																												
<p>Salinidad (CEe ms.cm⁻¹)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 0-2 No salino • 2-4 Ligeramente salino • 4-8 Salino • > 8 Muy salino 	<p>Materiales orgánicos y minerales Materiales ínterestratificados entre materiales orgánicos y minerales a través del perfil.</p> <p>Superficie orgánica O/C Superficie mineral C/O, S/O</p>																												
<ul style="list-style-type: none"> • Dentro de los 40 a 50 cm s₁ • Dentro de los 80 a 100 s₂ 	<p>Madurez del suelo En materiales orgánicos, minerales y organominerales.</p>																												
	<p>n-value</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Nivel de madurez</th> <th colspan="3">Profundidad (cm)</th> <th rowspan="2"></th> </tr> <tr> <th>0-20</th> <th>20-50/60</th> <th>50/60-80/100</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>• Inmaduro</td> <td>> 0,7</td> <td>> 1,4</td> <td></td> <td>w₃</td> </tr> <tr> <td>• Moderadamente maduro</td> <td>> 0,7</td> <td>0,7-1,4</td> <td></td> <td>w₂</td> </tr> <tr> <td>• Maduro con subsuelo inmaduro</td> <td>> 0,7</td> <td>> 0,7</td> <td>y/o >1,0</td> <td>w₁</td> </tr> <tr> <td>• Maduro con subsuelo maduro</td> <td>> 0,7</td> <td>< 0,7</td> <td><1,0</td> <td>w₀</td> </tr> </tbody> </table>	Nivel de madurez	Profundidad (cm)				0-20	20-50/60	50/60-80/100	• Inmaduro	> 0,7	> 1,4		w₃	• Moderadamente maduro	> 0,7	0,7-1,4		w₂	• Maduro con subsuelo inmaduro	> 0,7	> 0,7	y/o >1,0	w₁	• Maduro con subsuelo maduro	> 0,7	< 0,7	<1,0	w₀
Nivel de madurez	Profundidad (cm)																												
	0-20	20-50/60	50/60-80/100																										
• Inmaduro	> 0,7	> 1,4		w₃																									
• Moderadamente maduro	> 0,7	0,7-1,4		w₂																									
• Maduro con subsuelo inmaduro	> 0,7	> 0,7	y/o >1,0	w₁																									
• Maduro con subsuelo maduro	> 0,7	< 0,7	<1,0	w₀																									

Nota: la profundidad para tener en cuenta estos criterios debe estar en los primeros 100 cm.

Fuente: International Institute for Land Reclamation and Improvement ILRI, citado por Dent (1986).

3.3 DESCRIPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE PERFILES MODALES DE SSA

El Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales, Gissat-UPTC, realizó la delimitación cartográfica de los suelos sulfatados ácidos del distrito de riego del alto Chicamocha (DRACH),

mediante un levantamiento semidetallado, escala 1:25000. Se definieron cinco perfiles modales que representan diferentes estados de evolución de SSA en cuanto a procesos de formación y grado de acidez.

Los resultados del estudio reportaron que cerca al 45 % del área del proyecto DRACH (2.800 ha) se encuentra influida por SSA en diferentes estados de evolución. Dichos suelos se hallan distribuidos en el paisaje de la planicie lacustre de origen halohidrotermal de la cuenca alta del río Chicamocha; se diferencian por su ubicación geomorfológica (cubeta superior, cubeta inferior), características químicas relacionadas con la ocurrencia de horizontes sulfúricos o de materiales sulfídicos, propiedades físicas, mineralógicas, micromorfológicas y composición de materiales, tanto orgánicos como minerales.

Puesto que la zona de estudio ha venido drenándose desde hace 60 años, los SSA del DRACH se caracterizan por ser SSA actuales, oxidados, con el desarrollo principal de horizontes minerales sulfúricos, cámbicos, seguidos por horizontes sulfúricos orgánicos (turbosos) y, en menor proporción, materiales sulfídicos que se encuentran a profundidad.

3.3.1 Sulfic Endoaquepts, familia muy fina sobre orgánica, caolinítica, semiactiva, isomésica, (fase moderadamente profunda). Son los suelos sulfatados más evolucionados de la planicie fluviolacustre, se ubican geomorfológicamente en la posición de cubeta superior, de origen mineral y de texturas finas a muy finas, lo que afecta su condición de drenaje. Se consideran moderadamente profundos por presentar como limitación un horizonte sulfúrico a partir de los 55 cm y aguas freáticas salinas que acompañan la evolución de materiales orgánicos sulfúricos de tipo hémico, a partir de los 80 cm (Figura 3.3). En comparación con los otros SSA evaluados, los *Sulfic Endoaquepts* son los suelos que presentan aptitud mejorada hacia el uso agrícola por disponer de mayor espesor en su capa arable (0-55 cm).

La presencia del horizonte sulfúrico (Bgj) se comprueba en este suelo, porque a profundidad se incrementan los sulfatos solubles con contenidos mayores a 0,05 % y se encuentra un piso lacustre orgánico salino. Las

características físicas, químicas y mineralógicas se describen en la Tabla 3.2, figuras 3.3 y 3.4.

No perfil:	PSMI-05 (Figura 3.3).
Unidad de manejo:	Ml-a₃s₄n₃
Descrito por:	Manuel I. Gómez, Hugo E. Castro F., Germán E. Cely.
Localización:	municipio de Tibasosa; sector Patrocinio; Unidad de Riego Ministerio.
Posición geográfica:	1122135 E, 1128000 N.
Altitud:	2530 msnm
Posición geomorfológica:	paisaje, planicie fluvio-lacustre del río Chicamocha; tipo de relieve, plano de inundación; forma de terreno, cubeta superior.
Relieve:	ligeramente plano, pendiente de 1-3 %.
Profundidad efectiva:	moderadamente profunda (>50 cm), limitante horizonte sulfúrico, nivel freático fluctuante y salino.
Nivel freático:	moderadamente profundo, fluctuante, agua sulfatada salina sódica con reacción fuertemente ácida y fuerte reacción al cloruro de bario.
Encharcamiento:	ocasional
Régimen climático del suelo:	humedad, ácuico; temperatura, isomésico.
Vegetación actual:	pastos, cebolla, hortalizas.
Material parental:	sedimentos aluviales y coluvio aluviales finos sobre turbas lacustres descompuestas.
Área de influencia:	667,53 ha.

Ap 0–10 cm. Color en húmedo, pardo a pardo oscuro (10 YR 4/3), textura al tacto franco arcillosa; estructura en bloques subangulares a angulares medios a gruesos, moderada; consistencia en húmedo, firme; en mojado, ligeramente plástica y pegajosa; resistencia a la ruptura, firme, semideformable, ligeramente fluida; abundantes poros finos y medios, tubulares; raíces vivas abundantes, irregulares en la matriz; pH 5,36, Eh + 329mV, reacción débil al H₂O₂ y negativa al HCl y al NaF; ligeramente salino; límite gradual, ondulado.

Bwg 10–55 cm. Color en húmedo de la matriz, gris pardo oscuro (10 YR 4/2), con características redoximórficas (2,5 YR 3/2) de óxidos e hidróxidos de Fe, abundantes gruesos y abruptos reticulados recubriendo las caras de los pedos,

asociado a los poros, y por los canalículos de las raíces; (5 YR 4/6), pocos, finos, difusos, recubriendo las caras de los pedos y los poros; textura al tacto, arcillosa; estructura prismática que disgrega bloques subangulares medios a gruesos, moderada; consistencia en húmedo, firme; en mojado, pegajosa y plástica; resistencia a la ruptura, firme, semideformable, ligeramente fluida; abundantes poros, muy finos dendríticos tubulares a irregulares discontinuos; raíces muertas, pocas, finas a muy finas localizadas dentríticas entre pedos, superficiales, irregulares; pH 4,23; Eh + 334mV; reacción negativa al H₂O₂, al HCl, y al NaF; ligeramente salino; límite claro, continuo.

Bgj 55-80 cm. Color en húmedo de la matriz, gris pardo (10 YR 5/2), con características redoximórficas, rojo amarillentos (5 YR 4/8), difusos, abundantes finos a medios prominentes en masas irregulares recubriendo las caras de los pedos, los poros y canalículos de las raíces; color amarillo pálido (2,5 Y 8/4) de n-jarosita, comunes finos a medios y prominentes en masas irregulares, recubriendo superficialmente las caras de los pedos y los poros, y asociados a los canalículos de las raíces, abruptos; rojos muy oscuros (2,5 YR 2,5/3) pocos, difusos entre pedos; textura al tacto, arcillosa; estructura de bloques subangulares medios a gruesos, moderada; consistencia en húmedo, firme; en mojado, pegajosa y plástica; resistencia a la ruptura, firme, semideformable, no fluida; abundantes poros muy finos tubulares a irregulares discontinuos; raíces muertas, pocas, finas a muy finas, localizadas dentríticas entre pedos, superficiales, irregulares; pH 3,69, Eh + 458mV; reacción leve al H₂O₂ y negativa al HCl y al NaF; moderadamente salino; límite gradual, continuo.

Oeg 80-110x. Color en húmedo, negro (10 YR 2/1); textura al tacto, franco arcillo limosa; estructura de bloques subangulares disgrega gránulos medios a finos, moderada; consistencia

en húmedo, friable; en mojado, pegajosa y no plástica; poros comunes finos y medianos irregulares discontinuos; no hay raíces; pH 4,3, Eh 122; reacción moderada al H_2O_2 y negativa al HCl y NaF; moderadamente salino; límite abrupto, ondulado, olor moderado a sulfuro de hidrógeno.

El componente mineralógico de la fracción fina (arcilla) se encuentra dominado principalmente por la caolinita y, en menor, proporción por micas e interestratificados. Características que se relacionan con la mayor evolución y la baja capacidad de intercambio (Figura 3.4).

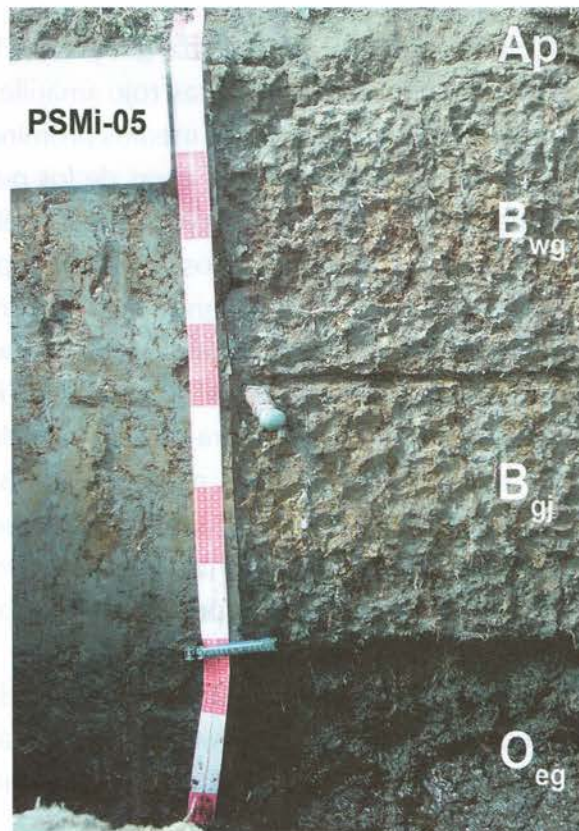


Figura 3.3 Perfil modal de los *Sulfic Endoaquepts*, familia muy fina sobre orgánica, caolinítica, semiactiva, isomésica (fase moderadamente profunda).

Fuente: Gissat (2006).

Tabla 3.2 Características fisicoquímicas de los *Sulfic Endoaquepts*, familia muy fina sobre orgánica, caolinítica, semiactiva, isomésica (fase moderadamente profunda).

Horizonte espesor (cm)	Da g cm ³	% Ar	% MO	Valor n	² Eh mV	³ pH	Al ³⁺ Cmol+ Kg ⁻¹	Fe mg. Kg ⁻¹	CE dSm ⁻¹	PSI %	% SO ₄ ²⁻ soluble	% S total	⁴ AIC
Ap 0-10	1,2	32,7	19,1	0,3	329	5,4	0,05	556	1,6	1,6	0,029	0,40	1,44
Bwg 10-55	1,3	66,3	2,9	0,2	334	4,2	5,4	133	0,7	2,3	0,024	0,33	0,33
Bgj 55-80	1,3	55,6	6,8	0,2	458	3,7	6,2	247	3,5	3,8	0,214	0,27	0,38
Oeg 80-110x	0,8	22,7	51,0	0,8	122	4,3	4	531	4,1	9,5	0,175	1,90	3,23

¹Valor n: grado de madurez del suelo (>0,7 suelo inmaduro, subsidencia;<0,7 suelo maduro).²Eh (potencial redox) medido en campo. ³pH (suelo: agua 1:1).⁴AIC actividad de intercambio catiónico para definir criterios de familia (>0,6 superactiva; 0,4-0,6 activa; 0,24-0,4 semiactiva, <0,24 subactiva). PSI (saturación de Na). Ar (arcilla). Da (densidad aparente). MO (materia orgánica).

Fuente: Gissat (2006).

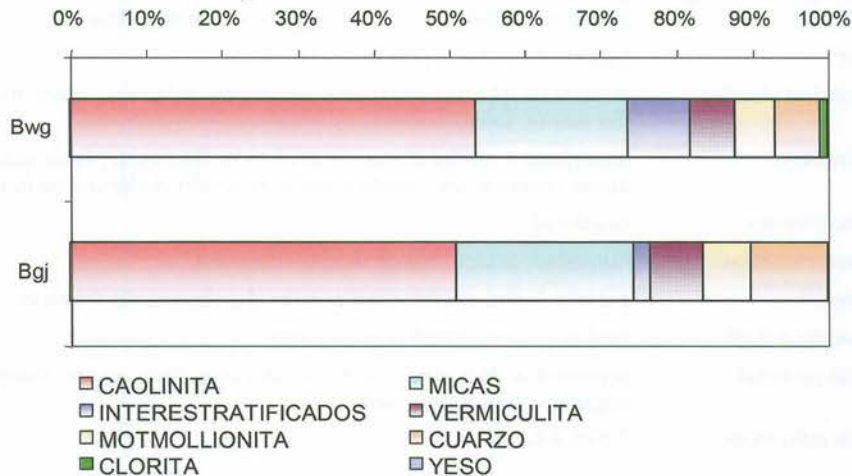


Figura 3.4 Representación semicuantitativa de la fracción mineral arcillosa (difracción de rayos X) del *Sulfic Endoaquepts*, familia muy fina sobre orgánica, caolinítica, semiactiva, isomésica, fase moderadamente profunda.

Fuente: Gissat (2006).

3.3.2 Typic Sulfaquepts, familia muy fina sobre orgánica, caolinítica, semiactiva, isomésica, (fase superficial). Son SSA típicos con menor evolución genética que el *Sulfic Endoaquepts*, aunque con mayor expresión en los procesos de sulfatación. Corresponden a un suelo mineral de textura fina, con contenido medio de carbono orgánico en su capa arable, bajo contenido de bases y predominio de Al³⁺ de cambio. Su diferencia con los *Sulfic Endoaquepts* radica en que el horizonte sulfúrico (Bgj) se

encuentra a partir de los 30 cm, limitando la profundidad efectiva y la productividad agrícola. La presencia del horizonte sulfúrico se comprueba por el incremento de sulfatos solubles (>0,05 %) y porque, a su vez, este horizonte descansa sobre un piso lacustre orgánico ligeramente salino. Las características físicas, químicas y mineralógicas se describen en la Tabla 3.3, figuras 3.5 y 3.6.

No Perfil:	PSDU-01(Figura 3.5)
Unidad de manejo:	DU-a₂s₄n₃
Descrito por:	Manuel I. Gómez S., Hugo E. Castro F., Germán E. Cely.
Localización:	municipio de Duitama; Sector Cebadero; Unidad de Riego Duitama
Posición geográfica:	111690 E - 1112275 N.
Altitud:	2530 msnm
Posición geomorfológica:	paisaje, planicie fluvio-lacustre río Chicamocha; tipo de relieve, plano de inundación; forma de terreno, cubeta superior.
Relieve:	ligeramente plano, pendiente de 1-3 %.
Profundidad efectiva:	superficial (12cm), limitante horizonte sulfúrico, nivel freático fluctuante, salino-ácido.
Nivel freático:	superficial a moderadamente profundo, fluctuante, agua sulfatada ácida, reacción ultra-ácida y fuerte reacción al cloruro de bario.
Encharcamiento:	ocasional.
Régimen climático:	humedad, ácuico; temperatura, isomésico.
Drenaje:	externo lento; interno medio; natural pobremente drenado.
Vegetación actual:	pastos con restringido crecimiento.
Material parental:	sedimentos aluviales y coluvio aluviales finos sobre materiales orgánicos descompuestos.
Área de influencia:	1.098,4 ha

Ap 0-12 cm. Color en húmedo de la matriz, pardo gris oscuro (10 YR 4/2), con características redoximórficas de color rojo muy oscuro (2,5 YR 2,5/4) de óxidos e hidróxidos de Fe; pocas, finas y prominentes en masas irregulares recubriendo los poros, entre pedos y por los canalículos de las raíces; nódulos de Fe (2,5 YR 2,5/4), pocos y prominentes en la matriz; textura al tacto, franco arcillosa; modificador de la textura, materiales orgánicos y nódulos de Fe; estructura en bloques subangulares medios a gruesos, moderada; consistencia en húmedo, firme; en mojado,

ligeramente plástica y pegajosa; resistencia a la ruptura, firme, semideformable, ligeramente fluida; abundantes poros finos, tubulares; raíces vivas, pocas, irregulares, superficiales; pH 3,9, Eh + 366mV, reacción fuerte al H_2O_2 y negativa al HCl y al NaF; no salino; límite gradual, ondulado.

Bwg 12–30 cm. Color en húmedo de la matriz, gris rojizo oscuro (2,5 YR 4/1), con características redoximórficas de color rojo muy oscuro (10 R 2,5/2) de óxidos e hidróxidos de Fe; abundantes gruesos y abruptos reticulados recubriendo las caras de los peds, asociados a los poros, y por los canalículos de las raíces (7,5 YR 6/8), difusos, pocos, recubriendo las caras de los peds y los poros; textura al tacto, arcillosa; estructura prismática y disgrega bloques subangulares medios a gruesos, moderada; consistencia en húmedo, firme; en mojado, pegajosa y plástica; resistencia a la ruptura, firme, semideformable, ligeramente fluida; abundantes poros muy finos, dendríticos tubulares a irregulares discontinuos; raíces muertas, pocas, finas a muy finas, localizadas entre peds dendríticas, superficiales, irregulares; pH 3,8, Eh + 494mV; reacción negativa al H_2O_2 , al HCl, y al NaF; no salino; límite claro, ondulado.

Bgj 30-70 cm. Color en húmedo de la matriz, gris oscuro (7,5 YR 4/1), con características redoximórficas de color amarillo pálido (2,5 Y 8/4) de n-jarrosita, comunes finos a medios y prominentes en masas irregulares, recubriendo superficialmente las caras de los peds, los poros, y asociado a los canalículos de las raíces, abruptos; pardo amarillentos (10 YR 5/8), difusos, pocos, recubriendo las caras de los peds y los poros; rojos muy oscuros (2,5 YR 2,5/3) pocos, difusos entre peds; textura al tacto arcillosa; estructura bloques subangulares medios a gruesos, moderada; consistencia en húmedo, firme; en mojado, pegajosa y plástica; resistencia a la ruptura,

firme, semideformable, no fluida; abundantes poros muy finos tubulares a irregulares discontinuos; raíces muertas, pocas, finas a muy finas, localizadas entre pedos dendríticas, superficiales, irregulares; pH 3,5, Eh + 565mV; reacción leve al H_2O_2 y negativa al HCl y al NaF; moderadamente salino; límite claro, continuo.

Oe 70-110x. Color en húmedo, negro (10 YR 2/1); textura al tacto, franco arcillolimoso; estructura de bloques subangulares que disgregan a gránulos medios a finos, moderada; consistencia en húmedo, friable; en mojado, pegajosa y no plástica; poros comunes finos y medianos irregulares discontinuos; no hay raíces; pH 3,5, Eh + 366mV; reacción negativa al H_2O_2 , negativa al HCl y NaF; salino; límite abrupto, ondulado. Olor moderado a sulfuro de hidrógeno.

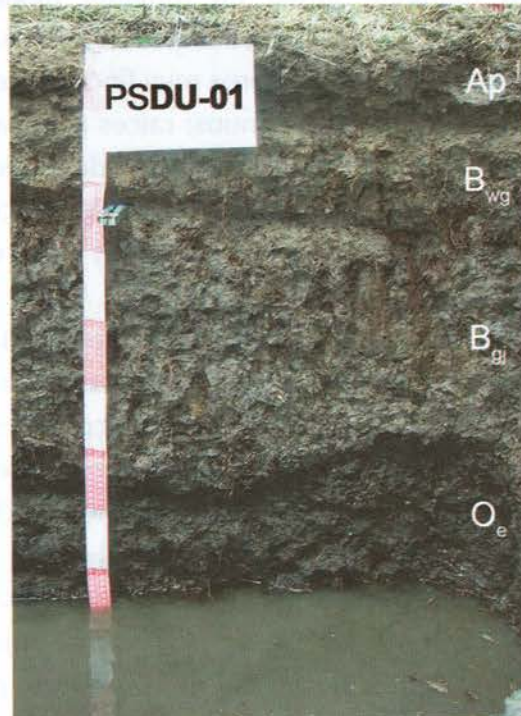


Figura 3.5 Perfil modal de los *Typic Sulfaquepts*, familia muy fina sobre orgánica, caolinítica, semiactiva, isomésica (fase superficial). Unidad de riego Duitama-DRCH.

Fuente: Gissat (2006).

Tabla 3.3 Características físicoquímicas de *Typic Sulfaquepts* familia muy fina sobre orgánica, caolinitica, semiactiva, isomésica (fase superficial).

Horizonte espesor (cm)	Da g cm ³	% Ar	% MO	Valor ¹ n	² Eh mV	³ pH	Al ³⁺ Cmol+ Kg ⁻¹	Fe mg. kg ⁻¹	CE dS. m ⁻¹	PSI %	% SO ₄ ²⁻ soluble	% S Total	⁴ AIC
Ap 0-12	1,07	76,9	5,6	0,4	366	3,9	12,1	380	0,4	0,2	0,013	0,68	0,54
Bwg 12-30	1,25	68,6	5,9	0,3	494	3,8	12,3	98,7	0,6	0,4	0,020	0,65	0,37
Bgj 30-70	1,29	77,34	5,9	0,2	565	3,5	9,7	214	2,7	0,3	0,184	0,70	0,35
Oe 70-110x	0,7	42,42	36,0	0,8	366	3,5	18,8	223	4,4	6,8	0,262	0,64	1,34

¹Valor n: grado de madurez del suelo (>0,7 suelo inmaduro, subsidencia;<0,7 suelo maduro).²Eh (potencial redox) medido en campo. ³pH (suelo: agua 1:1). ⁴AIC Actividad de Intercambio Catiónico para definir criterios de familia (>0,6 superactiva; 0,4-0,6 activa; 0,24-0,4 semiactiva, <0,24 subactiva). PSI (saturación de Na). Ar (arcilla).Da (densidad aparente).MO (materia orgánica).

Fuente: Gissat (2006).

Respecto al componente mineralógico, la fracción fina (arcilla) está dominada por la caolinita y, en menor proporción, por micas e interestratificados. Características que se relacionan con la mayor evolución y baja capacidad de intercambio (Figura 3.6).

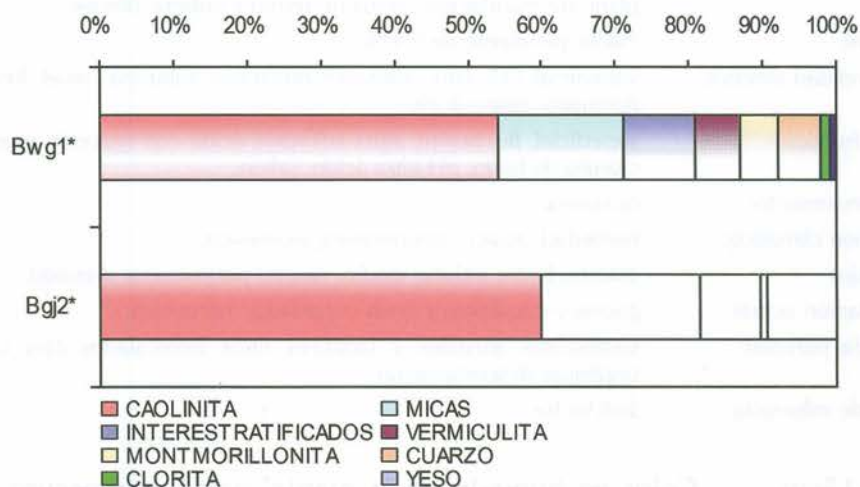


Figura 3.6 Representación semicuantitativa de la fracción mineral arcillosa (difracción de rayos X) del *Typic Sulfaquepts**, familia muy fina sobre orgánica, caolinitica, semiactiva, isomésica. (Fase superficial).

Fuente: Gissat (2006).

3.3.3 Typic Sulfosaprists, familia ferrihúmica, dísica, isomésica, micro, (fase ultraácida, ligeramente salina). Corresponde a un perfil de SSA de génesis policíclica, donde se detecta hasta los 60 cm la evolución de horizontes

sulfúricos jarosíticos, producto de la oxidación de materiales orgánicos de carácter sáprico y sedimentos minerales finos ricos en hierro y azufre. La presencia de horizontes sulfúricos jarosíticos (SSAA) se comprueba por la reacción ultraácida (pH 3-3,3) y el incremento extraordinario que tienen a profundidad los sulfatos solubles, cuyos contenidos son superiores a 0,05 % (Tabla 3.4). A partir de los 60 cm, las capas del suelo muestran un ciclo de génesis que identifica la evolución de un suelo sulfatado ácido potencial, de moderada reactividad o, en su defecto, la de un suelo sulfatado ácido (SPSA) por la aparición de un horizonte O_j, donde son comunes los cristales de yeso en la matriz del suelo. Todo lo anterior es indicativo de procesos de autoneutralización. (Tabla 3.4, figuras 3.7 y 3.8).

No Perfil:	PSVu-03 (Figura 3.7)
Unidad de manejo:	Vu-a ₁ s ₂ n ₂
Descrito por:	Manuel I. Gómez S., Hugo E. Castro F., German E. Cely.
Localización:	municipio de Tibasosa; sector Vueltas; Unidad de Riego Las Vueltas.
Posición geográfica:	1118355 E – 1131295 N.
Altitud:	2500 msnm
Posición geomorfológica:	paisaje, planicie fluvio-lacustre del río Chicamocha; tipo de relieve, plano de inundación; forma de terreno, cubeta inferior.
Relieve:	Plano, pendiente de 0-1 %.
Profundidad efectiva:	superficial (15 cm), limitante horizonte sulfúrico, nivel freático fluctuante salino-ácido.
Nivel freático:	superficial, fluctuante, agua sulfatada ácida con reacción fuerte al cloruro de bario, pH ultra ácido, salino.
Encharcamiento:	ocasional.
Régimen climático:	humedad, ácuico; temperatura, isomésico.
Drenaje:	externo lento; interno medio; natural pobremente drenado.
Vegetación actual:	pastos y eucaliptos y áreas escaldadas frecuentes.
Material parental:	sedimentos aluviales y lacustres finos intercalados con capas orgánicas descompuestas.
Área de influencia:	368,96 ha

Aj 0-15cm. Color en húmedo de la matriz, pardo gris oscuro (7,5 YR 2,5 5/1), con características redoximórficas de color amarillo rojizo (2,5 YR 2,5/4) de n-jarosita, comunes finos a medios, claros, prominentes en masas dendríticas e irregulares recubriendo los poros entre las caras de los pedos y recubriendo los canalículos de las raíces; textura al tacto, franco arcillosa, modificador de la textura, materiales

orgánicos en estado sáprico; estructura en láminas medias a gruesas, moderada; consistencia en húmedo, muy firme; en mojado, moderadamente plástica y muy pegajosa; resistencia a la ruptura, muy firme, semideformable, no fluida; abundantes poros finos, dendríticos e irregulares discontinuos; raíces muertas, pocas, finas a muy finas entre ped y fisuras; pH 3,18, Eh 346, reacción negativa al H_2O_2 , al HCl y al NaF. Ligeramente salino. Límite claro, continuo.

Oaj 15-35 cm. Color en húmedo de la matriz, gris muy oscuro (10 YR 3/1), con características redoximórficas de color amarillo (2,5 Y 7/4) de n-jarosita, poros finos a medios, difusos, tenuemente visibles en masas irregulares a dendríticos, distribuidos entre las caras de los peds, fisuras de las láminas y recubriendo los canalículos de las raíces; textura al tacto franco limosa, modificador de la textura, materiales orgánicos en estado sáprico; estructura en láminas medias a gruesas, débil, y disgrega en gránulos gruesos a medios, moderada; consistencia en húmedo, friable; en mojado, ligeramente plástica y ligeramente pegajosa; quebradiza, moderadamente fluida; abundantes poros finos a muy finos irregulares; raíces muertas, pocas, finas a muy finas entre ped y fisuras, dendríticas a tubulares; pH 3,0, Eh 389, ligeramente salino, reacción débil al H_2O_2 y negativa al HCl y NaF. Ligeramente salino; límite claro, continuo; olor leve a sulfuro.

Bj 35-60 cm. Color en húmedo de la matriz, gris oscuro (10 YR 4/1), con moteados negros (10 YR 2/1) claros, pocos prominentes en masas irregulares medias a gruesas, localizados en la matriz; características redoximórficas de color amarillo (2,5 Y 8/6) de n-jarosita, claros, abundantes medios a finos y prominentes en masas dendríticas recubriendo superficialmente las caras de los peds y los poros, y asociado a los canalículos de las raíces y espacios dejadas

por estas; textura al tacto, arcillosa, modificada por materiales orgánicos; estructura de bloques subangulares medios a gruesos, débil; consistencia en húmedo, firme; en mojado, moderadamente pegajosa y muy plástica, deformable, no fluida; pocos poros finos a muy finos irregulares discontinuos; raíces muertas, pocas, finas a muy finas localizadas in pedes dendríticas a tubulares, superficiales, irregulares; pH 3,34, Eh 493 mV; reacción leve al H_2O_2 y negativa al HCl y al NaF; ligeramente salino-sódico; límite abrupto, continuo; olor moderado a sulfuro.

Ogy 60 -100 cm. Color en húmedo, negro (5 YR 2,5/1), con características redoximórficas de gley (2,5 /10B) comunes, tenues finos a medios prominentes irregulares, ubicados finamente diseminados en cuerpos discretos en la matriz; cristales de yeso comunes, finos, prominentes prismáticos localizados en la matriz, claros; textura al tacto franco-limosa, modificador de la textura de cristales de yeso; estructura de láminas medias a gruesas, disgrega en bloques subangulares medios, débil; consistencia en húmedo, muy friable; en mojado, ligeramente pegajosa y no plástica, quebradiza, moderadamente fluida; poros abundantes, finos, irregulares discontinuos; no hay raíces; pH 6,5, Eh -162mV; reacción débil al H_2O_2 y negativa al HCl y NaF; ligeramente salino, límite abrupto, continuo; olor fuerte a sulfuros.

Cg 100-125 cm. Color en húmedo, gris (2,5 Y 6/1), con características redoximórficas de gley (2,5/10 B) comunes, textura arcillosa, sin estructura, inmaduro, poros finos saturados; no hay raíces; pH 7,1, Eh -185mV, reacción fuerte al H_2O_2 y negativa al HCl y NaF; fuertemente salino y tendencia sódica, límite difuso, discontinuo; olor fuerte a sulfuros.

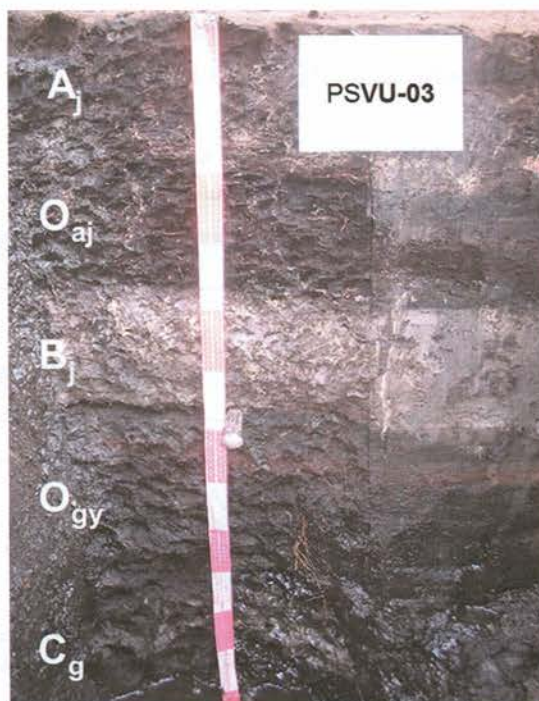


Figura 3.7 Perfil modal de los *Typic Sulfosaprists*, familia ferrihúmica, dísica, isoméscica, micro, (fase ultraácida, ligeramente salina).

Fuente: Gissat (2006).

Tabla 3.4 Características fisicoquímicas de *Typic Sulfosaprists*. Familia ferrihúmica, dísica, isoméscica, micro, (fase ultraácida, ligeramente salina).

Horizonte espesor (cm)	Da g cm ³	% MO	Valor ¹ n	² Eh mV	³ pH	Al ³⁺ Cmol+ Kg ⁻¹	Fe mg. Kg ⁻¹	CE dS. m-1	PSI %	% SO ₄ ²⁻ soluble	% S Total
A _j 0-15	0,9	29,0	0,5	346	3,2	11,3	386	2,10	1.62	0,09	0,71
O _{aj} 15-35	0,7	53,0	0,60	389	3,00	12,4	224	3,40	4,05	0,17	1,2
B _j 35-60	1,17	9,2	0,7	493	3,3	13,2	456	3,40	8.43	0,18	1,6
O _{gy} 60-100	0,45	45,0	1,5	-162	6,5	5,3	130	8,10	8.60	0,21	2,1
C _g 100-125	1,4	5,5	1,3	-185	7,1	17,3	700	10,4	10,2	0,5	2,1

¹Valor n: grado de madurez del suelo (>0,7 suelo inmaduro, subsidencia;<0,7 suelo maduro).

²Eh (potencial redox) medido en campo. ³pH (suelo: agua 1:1). PSI (saturación de Na).

Da (densidad aparente).MO (materia orgánica).

Fuente: Gissat (2006).

El componente mineralógico de la fracción fina está dominado por la caolinita y, en menor proporción, por micas e interestratificados, características que están relacionadas con una alta inestabilidad de minerales primarios,

debida a procesos fuertes de sulfatación, tanto en el horizonte mineral B_j, como en el horizonte superficial A_j (Figura 3.8).

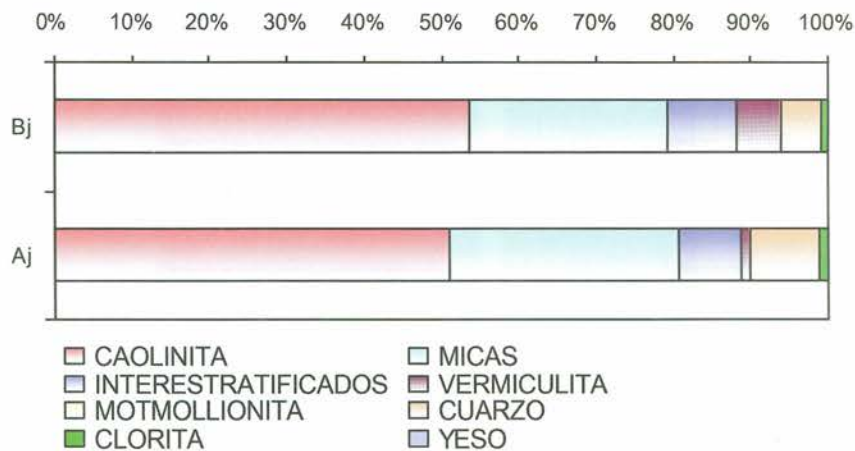


Figura 3.8 Representación semicuantitativa de la fracción mineral arcillosa (difracción de rayos X) de los *Typic Sulfosapristis*, familia ferrihúmica, dísica, isoméscica, micro, (fase ultraácida, ligeramente salina).

Fuente: Gissat (2006).

3.3.4 Typic Sulfohemists, familia ferrihúmica, dísica, isoméscica, micro (fase ultraácida, encharcable). Es un SSA actual de origen orgánico con fuerte química, debido a intensos procesos de oxidación que se ven reflejados en pH ultraácidos y dominio de Al³⁺ en la fase coloidal. Se caracteriza porque es uno de los suelos con mayores limitaciones para el uso agrícola, presenta áreas denudativas con afloramientos de sales que, junto a su acidez extrema, genera condiciones adversas al crecimiento vegetal. La presencia de horizonte sulfúrico se comprueba porque a profundidad se incrementan los sulfatos solubles con contenidos mayores a 0,05 % y se encuentra sobre un piso lacustre orgánico ligeramente salino (Tabla 3.5, Figura 3.9).

No Perfil:	PSVA-02 (Figura 3.9).
Unidad de manejo:	VA-a ₁ s ₃ n ₂ .
Descrito por:	Manuel I. Gómez S., Hugo E. Castro F., Germán E. Cely.
Localización:	municipio de Paipa, sector Varguitas, Unidad de Riego Vargas.
Posición geográfica:	1128820 N – 1112275 E.
Altitud:	2505 msnm

Posición geomorfológica:	paisaje, planicie fluvio-lacustre del río Chicamocha; tipo de relieve, plano de inundación; forma de terreno, cubeta inferior.
Relieve:	plano, pendiente de 0-1 %.
Profundidad efectiva:	superficial (<10 cm), limitante horizonte sulfúrico, nivel freático fluctuante.
Nivel freático:	superficial, fluctuante, reacción ultra ácida sulfatada, fuerte reacción al cloruro de bario y ligeramente salino.
Encharcamiento:	frecuente.
Régimen climático:	humedad, ácuico; temperatura, isomésico.
Drenaje:	externo lento; interno medio; natural pobremente drenado.
Vegetación actual:	áreas escaldadas, juncos y pastos con restringido crecimiento.
Material parental:	sedimentos lacustres orgánicos y finos.
Área de influencia:	376,72 ha.

A/Oa 0-10 cm. Color en húmedo de la matriz, negro (10 YR 2/1); textura al tacto, franco arcillosa, modificador de la textura, materiales orgánicos en estado sáprico; estructura granular fina a muy fina, moderada; consistencia en húmedo, firme; en mojado, ligeramente plástica y pegajosa; resistencia a la ruptura, firme, deformable, no fluida; abundantes poros finos, dendríticos e irregulares discontinuos; raíces muertas, pocas, muy finas dendríticas entre ped y fisuras; pH 3,30, Eh + 452mV, reacción negativa a H₂O₂, no salino, límite claro, continuo.

Oa/Oe 10-37cm. Color en húmedo de la matriz, negro (2,5 YR 2,5/1), con características redoximórficas de color rojo muy oscuro (2,5 YR 2,5/3), pocos, difusos entre peds, tenuemente visibles en masas irregulares a dendríticos, distribuido entre las caras de los peds y recubriendo los canalículos de las raíces; textura al tacto, franco arcillosa, modificador de la textura, materiales orgánicos en estado sáprico; estructura laminar moderada; disgrega en gránulos gruesos a medios, moderada; consistencia en húmedo, friable; en mojado, ligeramente plástica y ligeramente pegajosa; quebradiza, moderadamente fluida; abundantes poros finos a muy finos irregulares; raíces muertas, pocas, finas a muy finas entre ped y fisuras, dendríticas a tubulares;

pH 3,19, Eh +465mV; reacción débil al H_2O_2 ; no salino; límite gradual, continuo; olor moderado a sulfuros.

Oe 37-50 cm. Color en húmedo de la matriz, gris muy oscuro (10 YR 3/1), con características redoximórficas de color rojo muy oscuro (2,5 YR 2,5/3) pocos, difusos entre pedrs, tenuemente visibles en masas irregulares a dendríticas, distribuidos los pedrs entre las caras y recubriendo los canalículos de las raíces; textura al tacto, franco limosa, modificador de la textura, materiales orgánicos en estado hémico; estructura en láminas medias a gruesas, débil, y disgrega en gránulos gruesos a medios, moderada; consistencia en húmedo, friable; en mojado, ligeramente plástica y ligeramente pegajosa; quebradiza, moderadamente fluida; abundantes poros finos irregulares; raíces muertas, pocas, finas a muy finas entre ped y fisuras, dendríticas a tubulares; pH 3,35, Eh +390mV, reacción débil al H_2O_2 ; ligeramente salino; límite gradual continuo; olor moderado a sulfuros.

Oig 50-100 xcm. Color en húmedo, negro (5 YR 2,5/1), con características redoximórficas de gley (2,5/10B) comunes, tenues, finos a medios, prominentes, irregulares, ubicados finamente diseminados en cuerpos discretos en la matriz; textura al tacto franco limosa, modificador de la textura, materiales orgánicos en estado fíbrico; estructura en láminas medias a gruesas, débil; consistencia en húmedo, muy friable; en mojado, ligeramente pegajosa y no plástica, quebradiza, moderadamente fluida; poros abundantes, finos, irregulares discontinuos; no hay raíces; pH 3,73, Eh +275mV; reacción débil al H_2O_2 ; salino, límite abrupto, continuo; olor fuerte a sulfuro de hidrógeno.

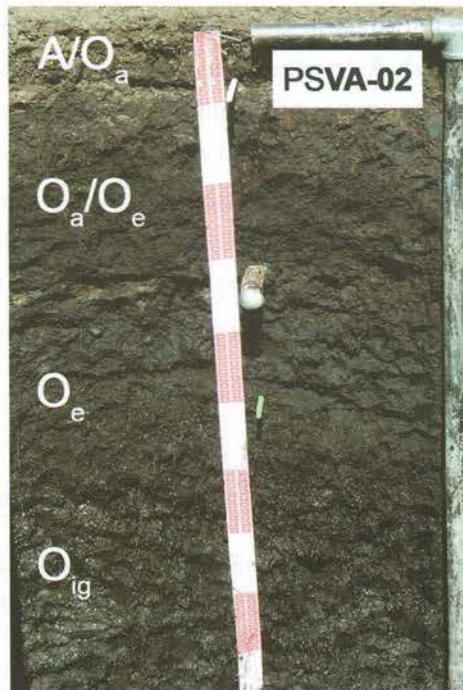


Figura 3.9 Perfil modal de los *Typic Sulfohemists*, familia ferrihúmica, díscica, isomésica, micro, (fase ultraácida, encharcable).

Fuente: Gissat (2006).

Respecto a las características mineralógicas de la capa mineral sulfúrica de los *Typic Sulfohemists*, en la fracción arcillosa se detectó predominio de caolinita (63 %), micas (17 %) y en menor proporción esmécticas (6 %), vermiculitas (7 %), interestratificados (7 %) y cuarzo (7 %).

Tabla 3.5 Características físicoquímicas de los *Typic Sulfohemists* familia ferrihúmica, díscica, isomésica, micro, (fase ultraácida, encharcable)

Horizonte espesor (cm)	Da g cm ⁻³	% MO	Valor ¹ n	² Eh mV	³ pH	Al ³⁺ Cmol*Kg ⁻¹	Fe mg kg ⁻¹	CE dS m ⁻¹	PSI %	% SO ₄ ²⁻ soluble	% S Total
A/Oa 0-10	0,87	20,7	0,55	452	3,3	10,9	259	1,3	0,02	0,072	0,91
Oa/Oe 10-37	0,36	41,0	0,50	465	3,19	12,2	348	1,3	0,02	0,082	0,76
Oe 37-60	0,29	45,0	0,54	390	3,35	23,5	197	2,1	0,16	0,153	0,92
Oig 60-100X	0,3	64,0	1,2	275	3,73	23,0	140	4,9	1,6	0,217	2,0

¹Valor n: grado de madurez del suelo (>0,7 suelo inmaduro, subsidencia;<0,7 suelo maduro).

²Eh (potencial redox) medido en campo. ³pH (suelo: agua 1:1). PSI (saturación de Na).

Da (densidad aparente).MO (materia orgánica).

Fuente: Gissat (2006).

3.3.5 Typic Sulfihemists, familia dísica, isomésica, (fase moderadamente profunda, salino-sódica). Este suelo se clasificó como un SSA potencial, debido a la presencia de materiales sulfídicos. El pH tomado después de un periodo de incubación del suelo de ocho semanas, fue menor a 4,0 en todos los horizontes. El porcentaje de azufre total es mayor del 2 %, lo cual indica que la mayoría del S total está en forma de sulfuro de hidrógeno o de sulfuros de hierro, *valor n* mayor a 0,7 (Tabla 3.6). Los anteriores parámetros coinciden con características sulfatadas potenciales reportadas por la Soil Survey Staff (2010).

No Perfil:	PSCU-04 (Figura 3.10)
Unidad de manejo:	CU-a ₃ s ₂ n ₃ (fase moderadamente profunda), CU-a ₃ s ₁ n ₂ (fase superficial)
Descrito por:	Manuel I. Gómez S., Hugo E. Castro F., Germán E. Cely.
Localización:	municipio de Tibasosa, sector Vueltas; Unidad de Riego Vueltas
Posición geográfica:	1118355 E – 1131295 N
Altitud:	2500 msnm
Posición geomorfológica:	paisaje de planicie fluvio lacustre del río Chicamocha; tipo de relieve, plano de inundación; forma de terreno, cubeta inferior.
Relieve:	plano, pendiente de 0-1 %
Profundidad efectiva:	moderadamente profunda (>50 cm), nivel freático fluctuante, materiales sulfídicos.
Nivel freático:	moderadamente profundo, fluctuante, reacción fuertemente ácida, agua sulfatada salina y alta en sodio, reacción muy fuerte al cloruro de bario.
Encharcamiento:	temporal por ascenso de nivel freático en invierno.
Régimen climático:	humedad, ácuico; temperatura, isomésico.
Drenaje:	externo lento; interno medio; natural pobremente drenado.
Vegetación actual:	pastos, cebolla
Material parental:	sedimentos lacustres orgánicos y arcillas.
Área de influencia:	218,61ha

Oay 0–25cm. Color en húmedo de la matriz, negro (10 YR 2/1), con características redoximórficas de color rojo muy oscuro (2,5 YR 2,5/3) escasos, difusos entre peds, tenuemente visibles en masas irregulares a dendríticos, distribuidos los peds entre las caras y recubriendo los canalículos de las raíces; textura al tacto franco arcillosa, modificador de la textura, materiales orgánicos en estado sáprico; estructura

granular gruesos a medios, moderada; consistencia en húmedo friable; en mojado, ligeramente plástica y ligeramente pegajosa; quebradiza, moderadamente fluida; abundantes poros finos a muy finos irregulares; raíces vivas, abundantes, finas a medias entre ped y fisuras, dendríticas a tubulares; pH 6,84, Eh + 420mV, reacción fuerte al H₂O₂; salino; límite gradual, continuo; olor moderado a sulfuro.

Oey 25-70 cm. Color en húmedo, negro (5 YR 2,5/1); con características redoximórficas de color rojo muy oscuro (2,5 YR 2,5/3) comunes, difusos entre peds, tenuemente visibles en masas irregulares a dendríticos, los peds distribuidos entre las caras, fisuras, y recubriendo los canalículos de las raíces; cristales de yeso abundantes, finos a medios, prominentes prismáticos localizados en la matriz, claros; textura al tacto franco-limosa, modificador de la textura cristales de yeso; estructura granular medios a gruesa, disgrega en bloques subangulares medios, moderada; consistencia en húmedo muy friable; en mojado, ligeramente pegajosa y no plástica, quebradiza, moderadamente fluida; poros abundantes, finos, irregulares discontinuos; raíces comunes, medias dendríticas e irregulares; pH 4,27, Eh + 417mV; reacción débil al H₂O₂; salino, límite abrupto, continuo; olor fuerte a sulfuros.

Oeg 70-110X cm. Color en húmedo, negro (5 YR 2,5/1); textura al tacto franco-limosa, modificador de la textura, materiales orgánicos en estado hémico; estructura granular medios a finos, débil; consistencia en húmedo muy friable; en mojado, ligeramente pegajosa y no plástica, quebradiza, moderadamente fluida; pocos abundantes, finos, irregulares discontinuos; pocas raíces irregulares; pH 6,01, Eh-136mV; reacción fuerte al H₂O₂; salino, límite abrupto, continuo; olor fuerte a sulfuros. Este horizonte tiene contacto inmediato con nivel freático salino sódico.

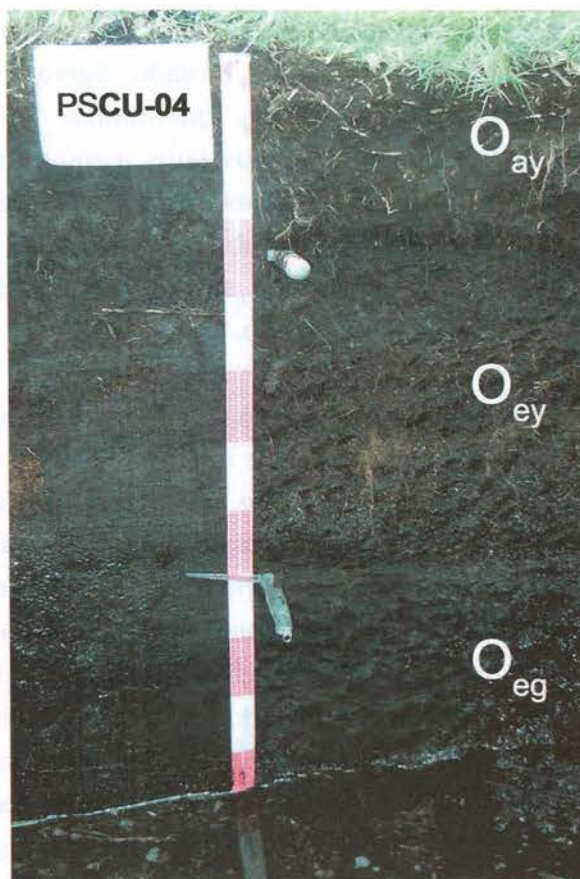


Figura 3.10 Perfil modal de los *Typic Sulfihemists*, familia dísica, isoméscica, fase moderadamente profunda, salino-sódica.

Fuente: Gissat (2006).

Tabla 3.6 Características fisicoquímicas de los *Typic Sulfihemists*, familia dísica, isoméscica, fase moderadamente profunda, salino-sódica.

Horizonte espesor (cm)	Da g cm ⁻³	% Ar	% MO	Valor ¹ n	² Eh mV	³ pH	⁴ pHi	Al ³⁺ Cmol+ kg ⁻¹	Fe mg kg ⁻¹	CE dS m ⁻¹	PSI %	% SO ₄ ²⁻ Soluble	% S total
Oay 0-25	0,67	6,62	45,0	0,73	420	6,84	3,8	0,9	521	7,9	6,3	0,34	8,6
Oey 25-70	0,6	24,7	32,0	0,97	417	4,27	4,0	2,0	337	9,0	38,2	0,38	2,34
Oeg 70-110X	0,56	16,3	36,7	0,90	-136	6,01	3,7	1,3	394	11,8	21,1	0,64	16,5

¹Valor n: grado de madurez del suelo (>0,7 suelo inmaduro, subsidencia;<0,7 suelo maduro).

²Eh (potencial redox) medido en campo. ³pH (suelo: agua 1:1). ⁴pHi: pH medido después de 2 meses de incubación para demostrar la presencia de materiales sulfídicos. PSI (saturación de Na).

Ar (arcilla). Da (densidad aparente). MO (materia orgánica).

Fuente: Gissat (2006).

Otra característica que se observa en campo y se comprueba con la descripción de la sección delgada para los horizontes orgánicos Oay y Oey, es la formación de cristales de yeso (Figuras 3.11 y 4.31) como indicadores de los procesos de autoneutralización que suceden en estos suelos. Esta evidencia es muy interesante y se explica, de una parte, por el predominio de sulfatos (Tabla 3.6) y calcio en la fracción soluble del suelo (Tabla 4.6), y, de otra parte, por los minerales de calcita presentes en los materiales coluviales circundantes. Las características asociadas a este fenómeno son descritas por Hamdi (2002) y Nettleton et al. (1982). La acumulación de yeso se presenta en épocas de menor humedad edáfica y con la menor interferencia de compuestos de hierro y aluminio (Nettleton et al., 1982).



Figura 3.11 Cristales de yeso en Typic Sulphemists como indicativo de condiciones sulfatadas ácidas de autoneutralización.

Fuente: Gissat (2006).

Estas formas cristalinas se manifiestan como cristales idiotípicos de yeso, de tamaño superior a 20 micras en distribución heterométrica, redondeados, y angulares con formas rectangulares o rómbicas. Existen cristales desde muy finos hasta muy grandes, cercanos a 2 mm; los cristales se encuentran como elementos individuales y se ubican en los canales y poros grandes de forma irregular. El yeso en estos suelos representa el 96 % de la fracción arena con tamaños entre 50 y 250 micras de diámetro.

3.3.6 Síntesis interpretativa de la clasificación taxonómica de los SSA estudiados. En el valle alto del río Chicamocha se encuentran SSA de alta degradación química, oxidados y acidificados (SSA actuales), como los *Typic Sulfaquepts*, *Typic Sulfosaprists* y *Typic Sulphemists*, y otros con menor

impacto en las reacciones de sulfatación, como los *Sulfic Endoaquepts* y *Typic Sulfihemists*, los cuales presentan procesos de autoneutralización de la acidez (suelos pseudosulfatados ácidos), donde dominan las formas cristalizadas de sulfato de calcio y aguas freáticas cargadas de sales básicas (Gómez, 2006).

Indicadores de acidez y sulfatación. Si se analiza la información taxonómica y analítica de los SSA estudiados, se observa que el pH, el aluminio de cambio (Al^{3+}), y el azufre (S), son indicadores importantes en el diagnóstico de la acidez y del estado de sulfatación en los SSA. De acuerdo con la similitud y tendencia de estos parámetros químicos, es posible diferenciar claramente dos grupos de suelos sulfatados ácidos, así:

- SSA actuales oxidados (*Typic Sulfohemists*, *Typic Sulfosaprists* y *Typic Sulfaquepts*), los cuales coinciden con una reacción ultraácida a extremadamente ácida (pH de 3,1 a 4,0), altos niveles de aluminio ($>5Cmol^{+}kg^{-1}$ con saturaciones superiores al 30 %), y concentraciones excesivas de azufre disponible ($>400mgkg^{-1}$), parámetros que en conjunto indican limitaciones en la productividad para la explotación agrícola, como lo corroboran las experiencias de Maneewan (2002) y estudios sobre parámetros de identificación de SSA realizados por Gómez y Castro (2005). Dentro de este grupo de SSA actuales oxidados, los *Typic Sulfohemists* y los *Typic Sulfosaprists*, se consideran SSA de origen orgánico, mientras que los *Typic Sulfaquepts* corresponden a suelos SSA de origen mineral.
- Suelos pseudosulfatados ácidos (*Sulfic Endoaquepts* y *Typic Sulfihemist*), donde predominan procesos de autoneutralización evidenciados por la presencia de yeso en forma de cristales a través del perfil (Nettleton et al., 1982; Dent, 1986; Gómez, 2006). En el estudio, estos suelos se caracterizan por presentar en el horizonte superior una reacción fuerte a moderadamente ácida (pH $>$ 5,5) y saturaciones de aluminio menores al 30 %. Aunque presentan niveles excesivos de azufre bajo condiciones pseudosulfatadas, estas formas aparecen neutralizadas por las altas concentraciones de calcio y formación de yeso, fenómeno que indica menor impacto en la productividad del suelo por procesos de sulfatación

y mejor desarrollo de cultivos. Las mayores limitaciones en este tipo de suelos son las altas concentraciones de sales solubles ($CE > 4,0 \text{ dSm}^{-1}$) y las altas saturaciones de sodio ($> 15 \%$), por efecto de aguas freáticas cargadas de sulfatos de calcio y sodio en áreas depresionales, como se ha comprobado en estudios de aguas sulfatadas hechos por Castro (2002); Muñoz y Muñoz (2005); Gómez (2006).

3.4 PROPIEDADES FÍSICAS EN SSA

Se evaluaron las propiedades físicas de los suelos sulfatados ácidos (SSA) del Distrito de Riego del Alto Chicamocha, con el fin de determinar sus aspectos limitantes de tipo físico, su relación con las propiedades químicas y, con base en su identificación, establecer el tipo de manejo adecuado en riego, drenaje y labranza. En los cinco perfiles modales de SSA estudiados, se llevó a cabo la determinación de los parámetros de densidad real y aparente, porosidad, textura, estabilidad estructural, consistencia, módulo de ruptura, constantes de humedad y conductividad hidráulica para sus dos primeros horizontes. Los resultados más relevantes extractados de las investigaciones de Rincon *et al.* (2008) indican que los SSA se encuentran limitados por alta plasticidad, moderada a baja estabilidad estructural en horizontes orgánicos, altos contenidos de arcillas en horizontes minerales, que, en conjunto, afectan la distribución de poros, la retención de humedad y la capacidad de aireación, sumadas a una profundidad efectiva limitada por la presencia de horizontes sulfúricos y nivel freático fluctuante, situación que permite deducir las prácticas de manejo del medio físico de los SSA, para su recuperación y explotación sostenible.

3.4.1 Densidad aparente, densidad real y porosidad. Teniendo en cuenta los contenidos de materia orgánica, su grado de descomposición, los contenidos de arcilla y de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, la densidad aparente en los SSA objeto de estudio fluctuó entre 0,18 y 1,29 gcm^{-3} . Las densidades aparentes más bajas se encontraron en los horizontes orgánicos y las más altas en los horizontes minerales de textura fina con mal drenaje e influenciadas por óxidos e hidróxidos de hierro. La densidad real varió entre 1,6 y 2,5 gcm^{-3} siendo baja en los horizontes orgánicos y más alta en los horizontes minerales con influencia de óxidos de hierro y

aluminio. La porosidad total osciló entre 45 % en horizontes minerales y más del 80 % en horizontes orgánicos.

Tabla 3.7 Valores de densidad aparente, densidad real y porosidad en SSA.
Distrito de Riego del Alto Chicamocha

Perfil (taxonomía)	Horizonte		Da (gcm ⁻³)	Dr (gcm ⁻³)	PT (%)	Macroporos (%)	Meso y microporos (%)
	Nom.	Espesor (cm)					
Sulfic Endoaquepts	Ap	0-10	1,2	2,07	51,20	17,31	33,88
	Bwg	10-55	1,3	2,39	49,77	21,21	28,65
Typic Sulfaquepts	Ap	0-12	1,07	2,28	52,81	27,33	25,83
	Bwg	12-32	1,25	2,39	47,46	11,52	36,25
Typic Sulfosaprists	Aj	0-15	1,18	2,28	48,04	14,68	33,67
	Oaj	15-35	0,67	2,03	67	14,71	52,29
Typic Sulfohemists	A/Oa	0-10	0,82	2,15	61,86	16,15	45,71
	Oa/Oe	10-37	0,36	1,65	78,16	20,24	57,93
Typic Sulfihemists	Oay	0-25	0,56	1,9	87,80	24,26	63,53
	Oey	25-70	0,67	1,83	88,37	24,30	64,07

Da: densidad aparente; Dr: densidad real; PT: poros totales.

Fuente: Rincón et al. (2008).

En general, los contenidos de macroporos en los SSA son adecuados para permitir el paso rápido del agua a través del perfil, condición importante en SSA para las labores de drenaje, ya que estos suelos se encuentran en las áreas planas del distrito de riego influenciadas por la presencia de un nivel freático fluctuante.

La microporosidad adquiere su importancia en la relación que guardan los fenómenos de capilaridad en este tipo de suelos. De esta manera, se observa que los SSA presentan contenidos de microporos altos, los cuales favorecen la conducción de agua capilar desde el nivel freático hasta la superficie. Esto es importante, porque cuando el agua freática asciende a los horizontes superficiales, ocupa la mayor parte del espacio poroso, manteniendo el suelo con altos contenidos de humedad durante las épocas secas y favoreciendo su saturación y encharcamiento con pocas precipitaciones en las épocas húmedas del año.

Otra condición notable en la porosidad del suelo es la registrada en los análisis de sección delgada (Gómez, 2006), en los cuales se observa la acumulación de óxidos e hidróxidos de hierro y jarosita en los poros de los

agregados y en los canales de las raíces (Figuras 4.14 y 4.30), causando el taponamiento de los poros intraagregado y limitando su macroporosidad a los canales existentes entre las caras de los pedos.

En conclusión, la porosidad en los SSA, aunque es adecuada para permitir una buena relación entre capacidad de aireación y retención de humedad en la zona de raíces, es también afectada por la influencia del nivel freático salino ácido a poca profundidad, que influye en la disolución de óxidos de hierro y su precipitación en las cavidades y poros intra e interagregados, además de determinar sus condiciones actuales de drenaje lento y encharcamientos ocasionales durante el año.

3.4.2 Textura y distribución de partículas por tamaño. La elaboración de curvas acumulativas de granulometría permite inferir acerca de la génesis de los suelos (Valenzuela & Torrente, 2013). Con los promedios de datos obtenidos de la granulometría de los SSA en sus primeros horizontes, se realizaron las curvas donde se representa el porcentaje acumulado de las partículas. Para el caso de los cinco perfiles modales descritos, se obtuvieron curvas de tipo sigmoidal, en los perfiles *Sulfic Endoaquepts*, *Typic Sulfaquepts*, *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfosaprists* y logarítmica en el perfil *Typic Sulfihemists* (Figura 3.12). En el primer caso, la curva caracteriza procesos de acumulación libre, en los cuales los depósitos son altamente seleccionados. Este tipo de distribución de partículas es característico de zonas de decantación, en las cuales las partículas gruesas se sedimentan primero, luego los limos y por último, las partículas mas finas. Por esta razón, el mayor porcentaje de materiales se encuentra en una fracción granulométrica estrecha, dominada por las arcillas.

En la curva de tipo logarítmico se observa un aumento en la proporción de limos y arenas, en detrimento de las arcillas. Este tipo de curva se relaciona con áreas de desborde y depósitos de limos acumulados en zonas de depresión dentro de zonas de basín o cubeta.

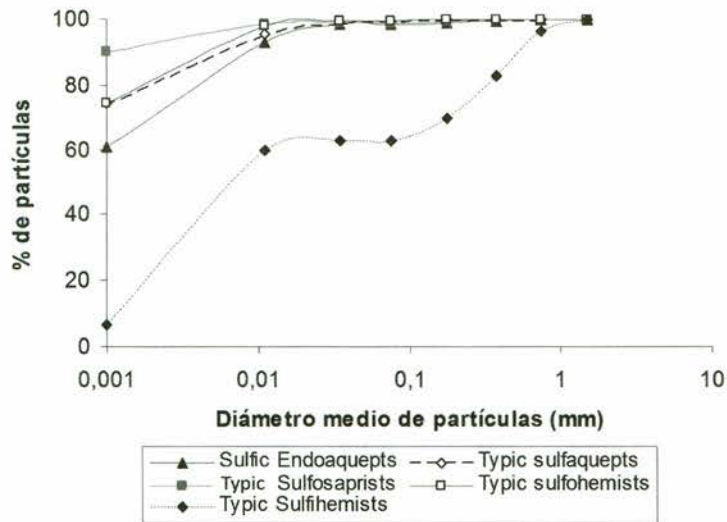


Figura 3.12 Curvas acumulativas de granulometría para SSA. Distrito de riego del alto Chicamocha.

Fuente: Rincón et al. (2008).

Como resultado del tipo de acumulación de las partículas, la textura en los SSA de origen mineral muestra el predominio de la fracción arcillosa (Tabla 3.8) como consecuencia de los materiales finos de tipo lacustre y coluvio aluvial que los conforman. La participación de la materia orgánica en el volumen de los suelos, minerales y orgánicos, se convierte en un modificador de la textura, que debe tenerse en cuenta. En este sentido es importante aclarar que el predominio de materiales orgánicos en los suelos estudiados, desvirtúa la calificación de la textura por el método de Bouyoucos, por cuanto un porcentaje de la fracción fina orgánica termina sumándose a la fracción fina de arcillas y limos existente, ofreciendo un dato final atípico. A causa de este fenómeno, la participación de la arcilla registró valores del 60 al 80 % en la textura del suelo, lo que agronómicamente se considera un impedimento físico de gran magnitud para la conducción de agua y el desarrollo de raíces, aspecto que no se evidencia en campo (Castro et al., 2009). El anterior análisis sugiere considerar la calificación organoléptica de la textura, como complemento a la evaluación de este parámetro, por ofrecer más claridad interpretativa en la evaluación de este parámetro.

Tabla 3.8. Texturas en perfiles modales de SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

Perfil (taxonomía)	Horizonte		Arcilla (%)	Limos (%)	Arena (%)	Textura
	Nom.	Espesor (cm)				
Sulfic Endoaquepts	Ap	0-10	32,70	16,4	51	FArA
	Bwg	10-55	66,25	32,02	1,73	Ar
Typic Sulfaquepts	Ap	0-12	76,9	22,06	1,04	Ar
	Bwg	12-32	68,6	30,1	1,3	Ar
Typic Sulfosaprists	Aj	0-15	87,33	10,89	1,78	Ar
	Oaj	15-35	43,1	21,5	35,4	Ar
Typic Sulfohemists	A/Oa	0-10	67,3	25,31	7,49	Ar
	Oa/Oe	10-37	20,2	13,5	66,3	FArA
Typic Sulfihemists	Oay	0-25	6,62	56,02	37,36	FL
	Oey	25-70	24,7	18,5	56,9	FArA

Fuente: Rincón et al. (2008).

3.4.3 Consistencia. La consistencia del suelo está definida por la acción de las fuerzas de cohesión-adhesión entre las partículas del suelo con fase líquida. Por esta razón, en campo se evalúa la consistencia en tres estados de humedad: seco, húmedo y mojado. En laboratorio, la consistencia se evalúa con la determinación de los límites de Atterberg, para hallar la condición de plasticidad de los suelos.

Como se puede observar en la Tabla 3.9, los SSA presentan índices de plasticidad superiores a 20 y son clasificados como suelos muy plásticos, difíciles de mecanizar. Por esta razón es bueno considerar los contenidos de humedad del suelo en su límite plástico, puesto que este es el valor máximo al cual se debe mecanizar un suelo para minimizar daños en su estructura. Los suelos con más altos contenidos de humedad a límite plástico son los orgánicos (*Typic Sulfohemists*, *Typic Sulfihemists*). En los horizontes minerales (*Sulfic Endoaquepts* y *Typic Sulfaquepts*) estos valores son más bajos y el límite para laboreo oscila entre el 23 y el 25 %.

La tendencia del límite plástico en SSA indica que los valores más bajos corresponden a los horizontes minerales con menores contenidos de materia orgánica. A mayor contenido de materia orgánica, el límite plástico se alcanza a humedad gravimétrica más alta, debido a que los materiales orgánicos deben absorber más agua que los minerales, antes de

formar películas de agua entre sus partículas (Pinzón, 2005). La formación de películas de agua es necesaria para permitir el deslizamiento de las partículas sólidas entre sí y, por consiguiente, la adquisición de la condición plástica del suelo.

Tabla 3.9 Límites de Atterberg e índices de plasticidad para SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

Perfil (taxonomía)	Horizonte		LL	LP	IP	Interpretación
	Nom.	Espesor (cm)				
Sulfic Endoaquepts	Ap	0-10	82	57	25	Muy plástico
	Bwg	10-55	58	28	30	Muy plástico
Typic Sulfaquepts	Ap	0-12	96	73	23	Muy plástico
	Bwg	12-32	70	39	31	Muy plástico
Typic Sulfosaprists	Aj	0-15	66	41	25	Muy plástico
	Oaj	15-35	135	90	45	Muy plástico
Typic Sulfohemists	A/Oa	0-10	104	74	30	Muy plástico
	Oa/Oe	10-37	212	106	106	Muy plástico
Typic Sulfihemists	Oay	0-25	103	77	26	Muy plástico
	Oey	25-70	98	77	21	Muy plástico

LL: límite líquido; LP: límite plástico; IP: índice de plasticidad.

Fuente: Rincón et al. (2008).

Es importante registrar que el contenido de humedad gravimétrica a límite líquido (condición fluida del suelo) en general es muy alta, tanto en suelos minerales como en suelos orgánicos.

3.4.4 Resistencia a la penetración. La resistencia a la penetración es una medida de la consistencia del suelo, que depende en gran medida de la cohesión y adhesión de las partículas y el contenido de humedad. Este parámetro cuantifica la resistencia que opone el suelo al crecimiento radical de los cultivos. Para fines de manejo, se considera que un suelo está limitado por compactación cuando los valores de resistencia a la penetración superan 1,3 MPa (Castro & Gómez, 2013).

En los SSA, la resistencia a la penetración varía entre 0,42 y 2,87 MPa, siendo predominantes los valores entre 0 y 1 MPa en horizontes orgánicos, los cuales indican menor restricción física del suelo para el crecimiento y penetración radical (Figura 3.13).

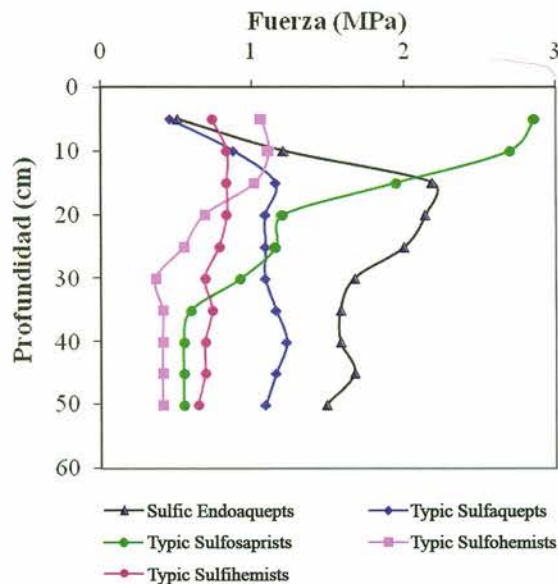


Figura 3.13 Resistencia a la penetración en SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

Fuente: Gissat (2006).

La mayor resistencia a la penetración se presentó en el horizonte superficial Oaj de los *Typic Sulfosaprists* con 2,87 MPa, valor altamente restrictivo. En el perfil *Sulfic Endoaquepts* también se presentaron valores medios a altos de resistencia a la penetración en los horizontes Bwg (2,19MPa) y Bgj (2MPa), debido a que son suelos con altos contenidos de arcilla y bajos contenidos de materia orgánica con procesos fuertes de óxido-reducción de minerales de Fe^{2+} . Las mayores restricciones se relacionan con horizontes minerales sulfúricos con fuerte procesos de sulfatación donde dominan agentes cementantes de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio.

3.4.5 Constantes de humedad. Los puntos de humedad se determinan para conocer la proporción de agua disponible en el suelo para las plantas (Valenzuela & Torrente, 2013). Para calcular el agua almacenada en el suelo a diferentes puntos de humedad (saturación, capacidad de campo y de marchitez), se efectuaron determinaciones en laboratorio, campo e invernadero, que tuvieron su análisis y comparación. Algunos de estos resultados se presentan a continuación:

Constantes de humedad en laboratorio. Como se observa en la Tabla 3.10, los mayores contenidos de humedad gravimétrica para las diferentes

constantes de humedad se obtuvieron en los suelos *Typic Sulfosaprists*, *Typic Sulfihemists* y *Typic Sulfohemists*, debido a su génesis y composición a partir de materiales orgánicos, que confieren al suelo alta capacidad de absorción y retención de humedad, contrario a lo sucedido en los perfiles *Sulfic Endoaquepts* y *Typic Sulfaquepts*, cuyos materiales constitutivos son, en su mayoría, partículas minerales finas, que deben su capacidad de retención de humedad a su asociación, superficie específica y formación de microporos.

Tabla 3.10 Constantes de humedad determinadas en condiciones de laboratorio para SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha

Perfil (Taxonomía)	Horizonte		Constantes de humedad en laboratorio %HG			(CC-PMP)	Da (gcm ³)	% HVA
	Nom.	Espesor (cm)	PS	CC	PMP			
Sulfic Endoaquepts	Ap	0-10	103,1	68,3	45,0	23,3	1,2	28,0
	Bwg	10-55	53,7	30,9	22,5	8,4	1,3	10,9
Typic Sulfaquepts	Ap	0-12	142,8	69,4	44,6	24,8	1,1	26,5
	Bwg	12-32	54,6	41,5	31,5	9,9	1,2	12,4
Typic Sulfosaprists	Aj	0-15	83,4	58,1	39,2	18,9	1,2	22,3
	Oaj	15-35	128,1	100,0	58,9	41,1	0,7	27,5
Typic Sulfohemists	A/Oa	0-10	101,7	75,1	36,2	38,9	0,82	31,9
	Oa/Oe	10-37	220,3	163,3	103,2	60,1	0,36	21,6
Typic Sulfihemists	Oay	0-25	110,4	79,9	60,9	19,0	0,65	12,4
	Oey	25-70	166,8	120,9	66,9	54,1	0,7	36,2

PS: Punto de saturación (0,01atm); CC: capacidad de campo (0,3atm); PMP: punto de marchitez (15atm); %HG: porcentaje de humedad gravimétrica Da: densidad aparente; %HVA: porcentaje de humedad volumétrica aprovechable.

Fuente: Rincón et al. (2008).

Constantes de humedad en campo e invernadero. Los resultados de las constantes de humedad obtenidas en campo e invernadero presentaron variaciones importantes con respecto al laboratorio. La capacidad de campo medida en campo osciló entre 57 y 115 % de humedad gravimétrica (Tabla 3.11); rangos de humedad cercanos a los obtenidos en laboratorio para los *Sulfic Endoaquepts*, *Typic Sulfaquepts* y *Typic Sulfosaprists*, pero alejados para *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfihemists*.

Los contenidos de humedad gravimétrica a punto de marchitez permanente obtenidos en invernadero oscilaron entre el 22 y 34 %, valores significativamente inferiores a los registrados en laboratorio (Tablas 3.10 y 3.11). Este comportamiento está dado posiblemente porque en la utilización de plantas como indicadores, el punto de marchitez permanente depende no solo del potencial de succión, sino del potencial de transpiración de las plantas empleadas, así como de su capacidad de expansión radical y la conductividad hidráulica del suelo. De acuerdo con estas características, cada cultivo tiene un potencial diferente que lo hace más o menos resistente a condiciones de estrés hídrico.

Tabla 3.11 Constantes de humedad determinadas en campo e invernadero para SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

Perfil (Taxonomía)	Horizonte		% HG Constantes de humedad		(CC-PMP)	Da (gcm ⁻³)	% HV.A
	Nom.	Espesor (cm)	CC Campo	PMP Invernadero			
Sulfic Endoaquepts	Ap	0-10	57,31	22,13	35,18	1,01	35,53
Typic Sulfaquepts	Ap	0-12	62,94	27,10	35,84	1,07	38,34
Typic Sulfosaprists	Oaj	0-15	57,14	30,74	26,4	1,18	31,152
Typic Sulfohemists	A/Oa	0-10	58,14	27,98	30,16	0,82	24,73
Typic Sulfihemists	Oay	0-25	115,14	34,05	81,09	0,23	18,65

CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente; Da: densidad aparente; HV.A: humedad volumétrica aprovechable.

Fuente: Rincón et al. (2008).

Lo anteriormente enunciado tiene repercusiones en la interpretación de los contenidos de humedad aprovechable para las plantas. Tal como se observa en los resultados, estos contenidos son menores en las determinaciones de laboratorio, lo que afirma que no toda el agua que se encuentra entre CC y PMP es aprovechable por las plantas, sino que depende de diferentes factores fisiológicos de la planta cultivada y de condiciones especiales implícitas en la estructura y la porosidad del suelo; el PMP se puede alcanzar por debajo o por encima de las 15 atmósferas, lo que constituye un rango de humedad amplio en el cual las plantas pueden verse afectadas por escasez de agua.

La diferencia tan marcada encontrada entre las determinaciones efectuadas en laboratorio y campo, deben continuar estudiándose, principalmente en el sentido de calificar los métodos más apropiados para cuantificar la humedad en SSA, donde la materia orgánica y muchas características reduximórficas asociadas a estos suelos podrían desvirtuar procedimientos analíticos, como el punto de marchitez obtenido en laboratorio.

3.4.6 Conductividad hidráulica. La conductividad hidráulica es la propiedad que presentan los suelos, como medio poroso que son, de permitir el movimiento del agua a través del perfil, bajo la acción combinada de los efectos de la gravedad, la capilaridad y otros agentes impulsores. Cuando el agua se mueve en condiciones de saturación, se habla de conductividad hidráulica, como la propiedad que presenta el suelo de permitir el movimiento del agua. El término “conductividad hidráulica” es equivalente al de permeabilidad (Castro et al., 2009).

La conductividad hidráulica saturada en los SSA estudiados varió entre moderadamente lenta y rápida para los dos primeros horizontes de cada perfil (Tabla 3.12).

Tabla 3.12 Conductividad hidráulica saturada para los SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha

Perfil (Taxonomía)	Horizonte		Ksat cmh-1	Interpretación
	Nom.	Espesor (cm)		
Sulfic Endoaquepts	Ap	0-10	1,53	Moderadamente lenta
	Bwg	10-55	7,84	Moderadamente rápida
Typic Sulfaquepts	Ap	0-12	7,33	Moderadamente rápida
	Bwg	12-32	14,1	Rápida
Typic Sulfosaprists	Aj	0-15	0,84	Moderadamente lenta
	Oaj	15-35	1,81	Moderada
Typic Sulfohemists	A/Oa	0-10	6,09	Moderadamente rápida
	Oa/Oe	10-37	5,47	Moderadamente rápida
Typic Sulfihemists	Oay	0-25	4,56	Moderada
	Oey	25-70	3,46	Moderada

Ksat: conductividad hidráulica saturada.

Fuente: Rincón et al. (2008).

La variabilidad presentada en la conductividad hidráulica de los SSA, está influenciada por la constitución de cada horizonte (materiales minerales u orgánicos), la continuidad del sistema poroso en el perfil, la condición

estructural y la presencia de raíces, principalmente. Teniendo en cuenta esto, se observa que en los suelos *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfihemists*, la conductividad hidráulica es moderadamente rápida y moderada respectivamente, para los dos horizontes evaluados, lo que indica una continuidad de su espacio poroso en profundidad, debida en gran parte a la uniformidad de sus materiales constituyentes de un horizonte a otro y favorecida por la alta presencia de raíces en el perfil *Typic Sulfihemists*. Situación contraria se presentó en el perfil *Typic Sulfosaprists*, en el cual los materiales minerales están intercalados con los orgánicos, debido al carácter policíclico de su formación, lo cual repercute en la variación de la conductividad hidráulica de un horizonte a otro. La alta resistencia a la penetración registrada en este suelo correlaciona con una moderada a lenta conductividad hidráulica.

En los perfiles *Sulfic Endoaquepts* y *Typic Sulfaquepts*, se presentó un aumento de la conductividad hidráulica en los horizontes subsuperficiales (Bwg), posiblemente debido al contraste textural que muestra incrementos de arcilla en el subsuelo.

La conductividad hidráulica expresa movimiento del agua a través del sistema poroso del suelo. Esta propiedad es utilizada comúnmente para determinar la profundidad de los drenajes, además de ser un parámetro útil en la determinación de las pérdidas de agua por filtración (Malagón & Montenegro, 1990).

La conductividad hidráulica saturada en los SSA estudiados varía entre moderadamente lenta y rápida para los dos primeros horizontes. En el perfil *Typic Sulfaquepts* y *Sulfic Endoaquepts* se presenta una variación importante, donde el subsuelo se hace más permeable. En el perfil *Typic Sulfosaprists* se presenta la misma situación, debido al carácter policíclico de su formación, en el cual los materiales minerales finos están intercalados con materiales orgánicos descompuestos. Los perfiles *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfihemists* no varían en su conductividad hidráulica, factor que indica uniformidad del espacio poroso de los dos primeros horizontes y, en consecuencia, una mejor distribución de humedad en el suelo.

En los SSA, la conductividad hidráulica no debe ser el único criterio que se tenga en cuenta en la definición de labores de drenaje, por cuanto es importante considerar otras propiedades inherentes a la formación de estos suelos, como la ocurrencia de horizontes sulfúricos y niveles freáticos fluctuantes.