

# Suelos Sulfatados Ácidos

**El caso del Valle Alto del río  
Chicamocha  
Boyacá - Colombia**

**Hugo Eduardo Castro Franco  
Manuel Iván Gómez Sánchez**

---

**Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales**

Suelos sulfatados ácidos. El caso del valle alto del río Chicamocha Boyacá – Colombia / Castro Franco, Hugo Eduardo ; Gómez Sánchez, Manuel Iván. Tunja: Editorial UPTC, 2015. 236 p. Incluye CD. Colección Investigación.

ISBN 978-958-660-213-6

1. Suelos sulfatoácidos. 2. Degradación de suelos. 3. Impacto ambiental. 4. Improductividad agrícola. 5. Restauración de suelos.

(Dewey 631.4/21).

Primera edición: 2015  
200 ejemplares (papel)

**Suelos sulfatados ácidos. El caso del valle alto del río Chicamocha Boyacá - Colombia**

ISBN 978-958-660-213-6

Colección Investigación

© Hugo Eduardo Castro Franco, 2015  
© Manuel Iván Gómez Sánchez, 2015  
© Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2015

Resultado del proyecto de investigación UPTC-COLCIENCIAS “Caracterización de la problemática de suelos sulfatados ácidos improductivos y evaluación del manejo para su habilitación agrícola. Distrito de riego del Alto Chicamocha (Boyacá)”.

Gustavo Orlando Álvarez Álvarez, Rector UPTC

**Comité Editorial**

Celso Antonio Vargas Gómez, Mg.  
Hugo Alfonso Rojas Sarmiento, Ph.D.  
Fred Manrique Abril, Ph.D.  
Liliana Fernández Samacá, Ph.D.  
Luz Eliana Márquez, Mg.  
Fanor Casierra Posada, Ph.D.  
Jovanny Arles Gómez Castaño, Ph.D.  
Rigaud Sanabria Marín, Ph.D.  
Pablo Enrique Pedraza Torres, Ph.D.

Editora en jefe: Bertha Ramos Holguín  
Coordinadora editorial: Ayda Blanco Estupiñán  
Corrección de Estilo: Claudia Amarillo Forero  
Diseño y diagramación: Lorena Orduz Valbuena

Libro financiado por la Dirección de Investigaciones de la UPTC.

Se permite la reproducción parcial o total con la autorización expresa de los titulares del derecho de autor. Este libro es registrado en Depósito Legal, según lo establecido en la Ley 44 de 1993, el Decreto 460 del 16 de marzo de 1995, el Decreto 2150 de 1995 y el Decreto 358 de 2000.

Citación: Castro, H. y Gómez, M. (2015). *Suelos sulfatados ácidos. El caso del valle alto del río Chicamocha Boyacá – Colombia*. Tunja: Editorial UPTC.

**Editorial UPTC**

Edificio Administrativo – Piso 4  
Av. Central del Norte  
comite.editorial@uptc.edu.co  
www.uptc.edu.co

**Impresión**

Búhos Editores Ltda.  
Diagonal 57 N.º 7-34  
Tel.: (+57) 8 7440257  
Tunja – Boyacá – Colombia

## AGRADECIMIENTOS

A Dios y su hijo Jesucristo que en su infinita misericordia nos concedieron la sabiduría para culminar esta obra y a la paciencia y amor de nuestras familias que nos apoyaron para este logro.

Los autores del presente libro, investigadores activos del Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales, Gissat-UPTC, expresan su agradecimiento a:

COLCIENCIAS, Asociación de Usuarios del Distrito de Riego del Alto Chicamocha, USOCHICAMOCHA, y a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Dirección de Investigaciones), por la financiación y cofinanciación del proyecto “Caracterización de la problemática de suelos sulfatados ácidos improductivos y evaluación del manejo para su habilitación agrícola. Distrito de riego del Alto Chicamocha (Boyacá)”.

A la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo y a las Facultades de Ingeniería Agronómica de la UPTC, Universidad Nacional-Bogotá y UNICORDOBA, desde donde se han desarrollado las investigaciones que han permitido inventariar los Suelos Sulfatados de origen continental y marino en el país.

A Enrique Combatt Caballero, Ph.D Grupo de investigación Suelos Sulfatados Ácidos-UNICORDOBA, por la revisión del texto y a nuestros recordados profesores, Ph.D Franz Hanke, q.e.p.d. y MSc. Pablo Contreras, por su abnegada labor en pro de la enseñanza de la ciencia del suelo a tantas generaciones de Ingenieros Agrónomos de la UPTC.

Muy especialmente nuestro agradecimiento a los investigadores Gissat-UPTC que formaron parte del grupo de trabajo durante la ejecución de los proyectos COLCIENCIAS (1109-07-14988 y 110937819630).

A todas las personas e instituciones que reconocen la labor investigativa del Gissat en pro del desarrollo de la ciencia del suelo en el país.

# CONTENIDO

<b>PRESENTACIÓN</b> .....	9
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	11
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>1. REFERENTES TEÓRICOS SOBRE SUELOS SULFATADOS ÁCIDOS (SSA)</b> .....	17
1.1 DEFINICIÓN SSA .....	17
1.2 CLASES DE SSA DE ACUERDO CON PROCESOS DE SULFATACIÓN .....	18
1.2.1 Suelos sulfatados ácidos potenciales (SSAP) .....	18
1.2.2 Suelos sulfatados ácidos actuales (SSAA) .....	20
1.2.3 Suelos pseudosulfatados ácidos (SPSA) .....	22
1.3 DISTRIBUCIÓN Y EXTENSIÓN DE SSA .....	22
1.3.1 Suelos sulfatados ácidos en el mundo .....	22
1.3.2 Suelos sulfatados ácidos en Colombia .....	23
1.4 AMBIENTES DONDE SE FORMAN SSA .....	25
1.4.1 Suelos sulfatados ácidos costeros .....	25
1.4.2 Suelos sulfatados ácidos continentales .....	26
1.4.3 Suelos sulfatados ácidos de mina .....	29
1.4.4 Comparación de suelos sulfatados ácidos formados en ambientes costeros, continentales y de mina .....	30
1.5 PROBLEMAS RELACIONADOS CON SSA .....	32
1.5.1 Problemas agronómicos .....	32
1.5.2 Otros problemas asociados a condiciones sulfatadas ácidas .....	35
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO</b> .....	39
2.1 LOCALIZACIÓN Y EXTENSIÓN .....	39
2.2 ANTECEDENTES .....	40
2.3 CLIMA .....	42
2.4 HIDROLOGÍA .....	42
2.4.1 Aguas superficiales .....	42

2.4.2 Aguas termominerales .....	43
2.4.3 Aguas freáticas .....	43
2.5 SUELOS .....	43
2.6 DRENAJE .....	44
2.7 USO ACTUAL DE LA TIERRA .....	45

### **CAPÍTULO 3**

#### **3. DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS SULFATADOS**

<b>ÁCIDOS DEL VALLE ALTO DEL RÍO CHICAMOCHA .....</b>	<b>49</b>
3.1 LEVANTAMIENTO DE SUELOS “ESPECIFICACIONES METODOLÓGICAS” ...	49
3.1.1 Recolección de la información básica .....	49
3.1.2 Metodología del levantamiento .....	50
3.1.3 Análisis de laboratorio .....	51
3.1.4 Delimitación de unidades cartográficas y de manejo .....	54
3.2 CRITERIOS UTILIZADOS PARA LA CLASIFICACIÓN Y MANEJO DE SSA .....	55
3.2.1 Clasificación taxonómica .....	55
3.2.2 Clasificación por fases de manejo .....	59
3.3 DESCRIPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE PERFILES MODALES DE SSA .....	60
3.3.1 Sulfic Endoquepts, familia muy fina sobre orgánica, caolinítica, semiactiva, isomésica, (fase moderadamente profunda) .....	61
3.3.2 Typic Sulfaquepts, familia muy fina sobre orgánica, caolinítica, semiactiva, isomésica, (fase superficial) .....	65
3.3.3 Typic Sulfosaprists, familia ferrihúmica, dísica, isomésica, micro, (fase ultraácida, ligeramente salina) .....	69
3.3.4 Typic Sulfohemists, familia ferrihúmica, dísica, isomésica, micro, (fase ultraácida, encharcable) .....	74
3.3.5 Typic Sulfihemists, familia dísica, isomésica, (fase moderadamente profunda, salino-sódica) .....	78
3.3.6 Síntesis interpretativa de la clasificación taxonómica de los SSA estudiados .....	81
3.4 PROPIEDADES FÍSICAS EN SSA .....	83
3.4.1 Densidad aparente, densidad real y porosidad .....	83
3.4.2 Textura y distribución de partículas por tamaño .....	85
3.4.3 Consistencia .....	87
3.4.4 Resistencia a la penetración .....	88
3.4.5 Constantes de humedad .....	89
3.4.6 Conductividad hidráulica .....	92

## **CAPÍTULO 4**

### **4. GÉNESIS Y EVOLUCIÓN DE LOS SUELOS SULFATADOS**

<b>ÁCIDOS DEL VALLE ALTO DEL RÍO CHICAMOCHA .....</b>	<b>97</b>
<b>4.1 FACTORES QUE HAN INDUCIDO LA FORMACIÓN DE SUELOS SULFATADOS ÁCIDOS .....</b>	<b>98</b>
4.1.1 Fisiografía de áreas planas con drenaje deficiente y susceptibilidad de inundación .....	98
4.1.2 Acumulación de materiales orgánicos y depositación de sedimentos minerales de hierro y aluminio .....	101
4.1.3 Flujos internos continuos de aguas ricas en sulfatos .....	107
4.1.4 Bacterias óxido reductoras de azufre y hierro .....	112
4.1.5 Prácticas de aireación por efecto de drenajes artificiales .....	116
<b>4.2 PROCESOS INVOLUCRADOS EN LA FORMACIÓN DE SSA .....</b>	<b>117</b>
4.2.1 Sulfhidrización: formación de sulfuros de hierro y acidez potencial .....	117
4.2.2 Sulfurización: oxidación-acidificación .....	124
4.2.3 Solubilización y productos de actividad iónica específicos para SSA .....	139
4.2.4 Procesos redox .....	145
4.2.5 Maduración de SSA .....	150
<b>4.3 EVOLUCIÓN DE SSA EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CHICAMOCHA .....</b>	<b>153</b>
4.3.1 Secuencia evolutiva de horizontes diagnósticos y su relación con perfiles pedogenéticos .....	153
4.3.2 Secuencia evolutiva de perfiles modales de SSA en la planicie fluvio lacustre del valle alto del río Chicamocha .....	166

## **CAPÍTULO 5**

### **5. MANEJO ESPECÍFICO POR SITIO DE LOS SUELOS SULFATADOS**

<b>ÁCIDOS DEL VALLE ALTO DEL RÍO CHICAMOCHA .....</b>	<b>173</b>
<b>5.1 IDENTIFICACIÓN <i>IN SITU</i> DE CARACTERÍSTICAS SULFATADAS ÁCIDAS A TRAVÉS DE INDICADORES .....</b>	<b>173</b>
5.1.1 Identificación de características redoximórficas y morfogenéticas en campo .....	174
5.1.2 Valoración de parámetros químicos del suelo en campo .....	177
5.1.3 Presencia de aguas sulfatadas en canales de drenaje .....	179
5.1.4 Afectación de la población biológica en aguas freáticas y de drenaje ...	181
5.1.5 Formación de áreas escaldadas improductivas y afloramientos salinos .	182
<b>5.2 DEFINICIÓN DE UNIDADES DE MANEJO DE SSA DE ACUERDO CON SU GRADO DE LIMITACIÓN .....</b>	<b>185</b>
5.2.1 Suelos sulfatados con moderadas limitaciones .....	187
5.2.2 Suelos sulfatados con fuertes limitaciones .....	191
5.2.3 Suelos sulfatados con severas limitaciones .....	194

5.3 RECOMENDACIONES DE MANEJO AGRONÓMICO PARA SUPERAR LIMITACIONES EN SUELOS SULFATADOS ÁCIDOS .....	199
5.3.1 Manejo físico del suelo (labranza, riego y drenaje) .....	201
5.3.2 Control de acidez .....	206
5.3.3 Adición de materia orgánica .....	218
5.3.4 Uso de plantas tolerantes .....	219

<b>REFERENCIAS</b> .....	223
--------------------------	-----

## **ANEXOS**

ANEXO 1. Mapa semidetallado de suelos sulfatados ácidos. Distrito de Riego del Alto Chicamocha, Boyacá - Colombia (CD adjunto) .....	233
ANEXO 2. Resultados analíticos sobre la caracterización física de suelos sulfatados ácidos. Distrito de Riego del Alto Chicamocha, Boyacá - Colombia .....	234
ANEXO 3. Resultados analíticos sobre la caracterización química de suelos sulfatados ácidos. Distrito de Riego del Alto Chicamocha, Boyacá - Colombia .....	236

## PRESENTACIÓN

En cumplimiento de su política de investigación y socialización del conocimiento, la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – UPTC-, a través de la Dirección de Investigaciones, presenta la publicación *Suelos sulfatados ácidos. El caso del valle alto del río Chicamocha, Boyacá, Colombia.*

Por este medio, el Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales, Gissat-UPTC, indica las bases científicas que llevan a la identificación y al conocimiento de los suelos sulfatados ácidos (SSA) en el trópico, centrandó su atención en el estudio específico de los SSA de origen fluvio-lacustre halohidrotermal, existentes en el valle alto del río Chicamocha (Boyacá, Colombia), donde opera uno de los distritos de riego presurizado por aspersión más modernos de Latinoamérica.

Este documento compila igualmente la tarea investigativa del Gissat-UPTC durante el periodo 2002-2012, época en la que mediante el desarrollo de los proyectos Colciencias (1109-07-14988 y 110937819630), se logró delimitar espacialmente la problemática de improductividad agrícola de tierras afectadas por SSA y validar la tecnología para ofertar medidas de rehabilitación y manejo.

La información divulgada a lo largo del contenido de esta obra contribuye de manera importante al inventario y conocimiento de SSA en Colombia. La literatura mundial sobre el tema no registra al momento de la investigación la existencia de este tipo de suelos en nuestro país, lo que bien puede considerarse en adelante, con la inclusión e intercambio de los resultados y experiencias referidas en este estudio.

---

Esta publicación ante todo ofrece la posibilidad de ser consultada o revisada por diferentes actores del sector académico, científico, productivo e institucional, que tengan interés por conocer el significado y la repercusión que en el campo agrícola, ambiental y social, representa el uso de tierras con suelos sulfatados ácidos.

En último término, debe decirse que los desarrollos que gradualmente se han dado en el Distrito de Riego del Alto Chicamocha en la recuperación y manejo de SSA, han generado un alto nivel de confianza y reconocimiento por parte de productores e instituciones a la labor investigativa desarrollada por Colciencias y la UPTC. La tecnología generada, susceptible de ser acogida por los productores del Distrito para corregir químicamente sus suelos e ingresar en un modelo productivo mejorado, representa actualmente la posibilidad de potencializar agrícolamente el uso del suelo en beneficio de la economía regional.

## INTRODUCCIÓN

Los suelos sulfatados ácidos (SSA) son suelos recientes que provienen de sedimentos minerales u orgánicos ricos en hierro y azufre, que al ser aireados por diferentes prácticas (drenajes, labranza intensiva, obras de ingeniería), oxidan bioquímicamente el sulfuro de hierro (FeS), dejando como marca precipitados de jarosita (mineral de color amarillo ocre dorado) y como producto de disolución, ácido sulfúrico. Este medio ultraácido disuelve el aluminio y otros metales de los minerales de arcilla, generando toxicidad a las plantas y contaminación de fuentes hídricas (Ludwig, 1999; Fitzpatrick et al., 2002; Dent, 1986; Hicks et al., 2002; Lamontagne et al., 2004).

Los SSA se formaron en el Holoceno Superior mayoritariamente (Dent, 1986) y su origen está ligado a planicies marinas, lagos salados y planicies continentales fluvio-lacustres con influencia halohidrotermal, como es el caso de los SSA del valle alto del río Chicamocha, Boyacá, Colombia (Castro, 2002; Gómez, 2006).

Según reportes FAO (2000), los suelos sulfatados ácidos son los únicos suelos en el mundo que son catalogados por sus características intrínsecas, como de alto riesgo para el ambiente.

Diversos autores reportan la existencia de suelos sulfatados ácidos en el mundo. De acuerdo con Dent y Pons (1995) y la FAO (2000), se estima que existen 24 millones de hectáreas distribuidas en zonas templadas y del trópico. Los países mayormente afectados en América del Sur por este tipo de suelos son Brasil (1'200.000 ha) y Venezuela (2'000.000 ha); no se referencia Colombia, donde los suelos sulfatados ácidos y los sulfatados ácidos potenciales, son comunes en áreas dejadas o influenciadas por el mar, áreas planas con drenajes provenientes de minería de carbón y planicies fluvio-lacustres de origen halohidrotermal.

---

La existencia de suelos sulfatados ácidos en zonas de importancia agrícola del país, como el valle del Sinú-Córdoba (Combatt et al., 2004), el Valle del Cauca (García, 2003), el valle de Sibundoy-Putumayo (Contreras, 1997), el valle de Ubaté-Cundinamarca (Garzón, 2005; Gissat, 2012) y el valle alto del río Chicamocha-Boyacá (Gissat, 2006), ha despertado el interés de la comunidad científica por abordar el estudio de estos suelos en aspectos básicos relacionados con su génesis, morfología, composición físico-química, impactos agroambientales y estrategias de manejo dirigidas a su rehabilitación.

En este sentido, el Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales (Gissat-UPTC; Gissat-Unicórdoba), creado desde el año 2000, inició investigaciones en la región del altiplano cundiboyacense y región del Caribe, con el objeto de delimitar espacialmente la problemática de tierras afectadas por SSA en los valles del Alto Chicamocha (Boyacá) y Sinú (Córdoba).

Con el apoyo de Colciencias, de asociaciones de productores y de las direcciones de investigación de las universidades mencionadas, se logró consolidar durante cerca de diez años (2002-2012), el conocimiento científico para orientar el manejo y recuperación de áreas afectadas en su productividad por la presencia de suelos sulfatados ácidos.

La presente publicación está referida a los SSA continentales de origen halohidrotermal existentes en el valle alto del río Chicamocha, Boyacá, Colombia, donde opera desde 1996, uno de los distritos de riego presurizado por aspersión más modernos de Latinoamérica.

En este marco geográfico, los SSA registran en diferente grado problemas asociados con la improductividad agrícola, debido a la ocurrencia de horizontes sulfúricos (SSA actuales) y en menor proporción materiales sulfídicos (SSA potenciales), confinados con niveles freáticos extremadamente ácidos y ricos en sulfatos. El impacto de estas condiciones conlleva la formación de áreas escaldadas desprovistas de vegetación o con alta restricción para el crecimiento local de praderas y cultivos.

---

Para delimitar espacialmente esta problemática, Gissat (2006) realizó el estudio semidetallado de suelos sulfatados ácidos del Distrito de Riego del Alto Chicamocha (DRACH), en el que se definieron cinco perfiles modales de SSA, cuya información genética, mineralógica, física, química y biológica, permitió generar el primer diagnóstico para proyectar investigaciones en laboratorio y campo, dirigidas a la habilitación y manejo agrícola de 2800 ha, afectadas en diferente grado en su productividad por condiciones sulfatadas ácidas.

Investigaciones relacionadas con la génesis y evolución de los SSA, identificación *in situ* de características sulfatadas ácidas a través de indicadores, impactos causados por SSA y prácticas de manejo agronómico recomendadas para superar limitaciones en SSA, ocupan, por su importancia, una buena parte del contenido de esta publicación. Los resultados obtenidos a partir de estos estudios ofrecen soluciones prácticas a los productores afectados e igualmente son susceptibles de extrapolación a otras áreas tropicales del mundo con presencia de SSA similares a los estudiados.



# CAPÍTULO I

---

## **REFERENTES TEÓRICOS SOBRE SUELOS SULFATADOS ÁCIDOS (SSA)**



# 1. REFERENTES TEÓRICOS SOBRE SUELOS SULFATADOS ÁCIDOS (SSA)

## 1.1 DEFINICIÓN SSA

Los suelos sulfatados ácidos (SSA) son suelos hidromórficos recientes derivados de sedimentos minerales u orgánicos ricos en hierro y azufre, que al ser aireados por diferentes prácticas (drenajes, labranza intensiva, obras de ingeniería), oxidan bioquímicamente el sulfuro de hierro (FeS), dejando como marca precipitados de jarosita (mineral de color amarillo ocre dorado) y como producto de disolución, ácido sulfúrico. Este medio ultraácido disuelve el aluminio y otros metales de los minerales de arcilla, lo que genera toxicidad a las plantas y contaminación de fuentes hídricas (Ludwig et al., 1999; Fitzpatrick et al., 2002; Dent, 1986; MDBA, 2011; Lamontagne et al., 2004). Las anteriores características conllevan la formación de horizontes sulfúricos, considerados como criterio diagnóstico en la clasificación taxonómica de SSA. La FAO (2000) catalogó los SSA dentro del grupo de suelos problema por el alto riesgo ambiental y de seguridad alimentaria que ocasionan los productos de su reacción.

Los SSA se caracterizan por presentar materiales sulfídicos (suelos sulfatados ácidos potenciales) u horizontes sulfúricos (suelos sulfatados ácidos actuales) en una profundidad no mayor a 100 cm, desde la superficie del perfil (Soil Survey Staff, 2010).

Los SSA se formaron mayoritariamente en el Holoceno Superior (Dent, 1986) y su origen suele ser marino, lacustre (Fitzpatrick et al., 1996) o continental de tipo halohidrotermal, como ocurre en la planicie fluvio lacustre del valle alto del río Chicamocha, Boyacá, Colombia (Castro & Gómez, 2002).

---

## 1.2 CLASES DE SSA DE ACUERDO CON PROCESOS DE SULFATACIÓN

**1.2.1 Suelos sulfatados ácidos potenciales (SSAP).** Son suelos constituidos por materiales ricos en sulfuros metálicos como pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y monosulfuros ( $\text{FeS}$ ), los cuales pueden estar en mezcla con materiales orgánicos; a esta clase de depósitos se les denomina “materiales sulfídicos”.

Los materiales sulfídicos identifican SSAP donde se encuentran monosulfuros, los cuales tienden a ser muy negros, suaves y de reacción rápida a la aireación; mientras la pirita tiende a presentarse en forma de cristales en matrices grises o en materiales orgánicos (Soil Survey Staff, 2010).

Los materiales sulfídicos tienden a acumularse en medios con elevada concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$ , alta disponibilidad de carbono lábil, presencia de bacterias reductoras de azufre y condiciones anegadas, que favorecen la reducción de los sulfatos contenidos en las arcillas lacustres y donde se observan condiciones de gleyzación (Figura 1.1). La reducción de sulfatos es un proceso universal en lagos y sedimentos órgano-minerales saturados, por ello la ocurrencia en estos medios de SSAP es frecuente bajo condiciones lacustres (Lamontagne et al., 2004).

De acuerdo con Soil Survey Staff, (2010), el término “materiales sulfídicos” se aplica a suelos y sedimentos con  $\text{pH} > 4,0$ ; si se incuban estos materiales con espesor de 1 cm de suelo expuesto al aire a capacidad de campo y temperatura ambiente, después de ocho semanas el valor del pH cae por debajo de 4,0 en 0,5 unidades. Para ser considerados SSAP, los materiales sulfídicos deben estar dentro de los primeros 100 cm de profundidad. Los SSAP son denominados comúnmente suelos inmaduros por la incipiente evolución y transformación de los sedimentos (Dent, 1986; Dent & Dawson, 2000).

La anterior definición ha sido establecida principalmente dentro del contexto de medios sulfatados ácidos costeros, donde los materiales sulfídicos aún no han sufrido una exposición o acidificación primaria. Por ello, se requiere una definición de estos materiales para áreas continentales, ya que la

acidificación solo es uno de los parámetros asociados con estos suelos. De acuerdo con Hicks *et al.* (1999) y Dent (1986), se pueden caracterizar estos materiales en áreas continentales por su contenido de S total > 2 % y por propiedades físicas relacionadas con el grado de evolución de materiales orgánicos, en este caso *valor n*>1, lo cual está relacionado con características de subsidencia.

Los SSAP con mayor frecuencia se presentan en áreas de manglares y ciénagas, con influencia de aguas salinas tranquilas en tiempos actuales o pasados. La densa vegetación y el medio calmado del mangle conllevan una sedimentación progresiva de materiales finos lacustres ricos en hierro (Figura 1.1). Pons *et al.* (1982) y Pons y Breemen (1982) indican que los materiales sulfídicos se formaron después de la última glaciación (hace 7.000 años), cuando el nivel del mar aumentó aproximadamente 5 m.



**Figura 1.1** Ambientes naturales donde se promueve la formación de materiales sulfídicos (izq.); evolución de SSAP (der.). Kaipara, New Zelanda.

**Fuente:** Dent & Dawson, ILRI (2000).

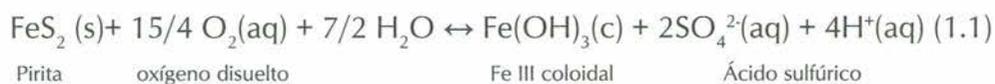
**Riesgos de los materiales sulfídicos.** Hay dos posibles riesgos asociados a estos materiales, uno ligado con su formación y otro con su perturbación. Durante su formación, los monosulfuros  $H_2S$  pueden cubrir la superficie de sedimentos lacustres y reducir químicamente el hábitat acuático; además, la generación de sulfuro de hidrógeno actúa como gas tóxico para plantas acuáticas y otra biota. El proceso de reducción de sulfatos interfiere

---

directamente con el ciclo del carbono y aumenta la disponibilidad de fosfatos, incrementando de esta manera la población de algas, proceso que afecta la oxigenación de medios acuáticos (Lamontagne et al., 2004).

La alteración de materiales sulfídicos incide en la formación de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), compuesto tóxico al ambiente; por otra parte, el drenaje excesivo origina horizontes sulfúricos (suelos sulfatados ácidos actuales) con una creciente acidificación y una disponibilidad nociva de metales tóxicos, que pueden segregar la formación de concentraciones redoximórficas amarillas de sulfatos de hierro asociados principalmente a jarosita, característica típica de horizontes sulfúricos. La transición de materiales sulfídicos a horizontes sulfúricos requiere muy pocos años y puede ocurrir inclusive en unas pocas semanas (Soil Survey Staff, 2010).

**1.2.2 Suelos sulfatados ácidos actuales (SSAA).** El drenaje hecho en la adecuación de tierras agrícolas sulfatadas facilita la oxigenación gradual de los materiales sulfídicos, de tal manera que se genera un medio ultraácido con pH que cae a valores menores a 3,5. Lo anterior se debe a una transformación bioquímica fuerte y rápida de sulfuros de hierro en medio acuoso a ácido sulfúrico (Ecuación 1.1) y a la formación de horizontes sulfúricos diagnósticos en SSA con la formación consecuente de jarosita (Dent & Dawson, 2000). Esta clase de suelos son llamados comúnmente **SSA actuales o maduros** (Figura 1.2).



Los sedimentos de aguas salobres frecuentemente contienen sulfuros de hierro, además del hierro proveniente de la fracción mineral. El azufre de la materia orgánica se combina con el hierro y se produce la cristalización de la pirita ( $FeS_2$ ), la cual se encuentra generalmente en concreciones (depósitos-acumulaciones) de cristales bipiramidales. La oxidación de estos sulfuros metálicos genera jarosita y ácido sulfúrico.

La jarosita se expresa como precipitados amarillos, puede estar sometida a una lenta hidrólisis y generar también ácido sulfúrico. Si disminuye la acidez por efecto de la dinámica de aguas freáticas, el hierro es precipitado

a ferrihidrita (colores rojizos ocres), la cual posteriormente puede cristalizar como magnetita, goetita y aun hematita. Por efectos oxidativos fuertes, el aluminio y el hierro se encuentran en su forma libre, los cuales pueden cristalizar además de la jarosita en jurbanita y alunita. La jarosita es uno de los indicadores importantes de horizontes sulfúricos (Figura 1.2).

Bajo condiciones de SSA de origen orgánico, la hidrólisis de la jarosita puede ser rápida, y, en consecuencia, no se evidencian claramente características redoximórficas amarillas, aun cuando el suelo presente pH menores a 3,5 o el azufre soluble en solución sea alto (Mensvort, 1988). La anterior condición se evidencia en SSA orgánicos del DRACH.

En general, los SSAA se caracterizan por la evolución fuerte de sus procesos de oxidación, los cuales diagnostican  $\text{pH} < 3,5$  causado por el ácido sulfúrico y las altas concentraciones de azufre soluble ( $\text{SO}_4^{2-}$  en agua mayor a 0,05 %), hierro y aluminio; morfogenéticamente la presencia de jarosita define horizontes sulfúricos. Este horizonte debe tener mínimo 15 cm de espesor y puede ser de carácter orgánico o mineral, ubicado dentro de los primeros 50 cm desde la superficie del suelo. El contacto a profundidad con materiales sulfídicos es otro aspecto para la definición de horizontes sulfúricos (Soil Survey Staff, 2010).

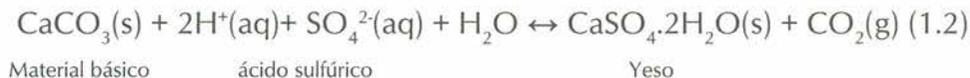


**Figura 1.2** Ambiente de formación de SSAA: áreas pantanosas con vegetación de juncos (izq.); horizontes sulfúricos con moteados amarillos (jarosita) (der.). Planicie fluvio lacustre continental, valle alto del río Chicamocha, Boyacá, Colombia.

**Fuente:** Gissat (2006)

**Riesgos de los horizontes sulfúricos.** Las zonas donde evolucionan estos horizontes son generalmente planas, inundables y frecuentemente drenadas para la agricultura o la construcción. Estas y otras prácticas de aireación permiten la exposición de las capas sulfhídricas y la acidificación acelerada, lo que aumenta la tasa natural de oxidación de los sulfuros de hierro; por consiguiente, grandes concentraciones de ácido contaminan el medio, superando la capacidad de neutralización del suelo. Este proceso puede continuar por muchos años, afectando el hábitat de peces y organismos, además de restringir el crecimiento de las plantas por disolución de metales tóxicos (Lines & Sammut, 1999; Fitzpatrick et al., 2002; Bibi, 2012).

**1.2.3 Suelos pseudosulfatados ácidos (SPSA).** Los SPSA son suelos de alta capacidad natural de autoneutralización (buffer), generalmente presentan valores de pH > 4,5. Son suelos que al ser aireados autorregulan la acidez generada por la oxidación de los sulfuros de hierro con sedimentos o cationes de carácter básico provenientes de la acumulación y mezcla en el medio de materiales calcáreos o aguas duras ricas en Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup>. En estas condiciones se pueden formar cristales de yeso, producto de la neutralización (Ecuación 1.2) en suelos moderadamente bien drenados (Dent, 1986):



## 1.3 DISTRIBUCIÓN Y EXTENSIÓN DE SSA

**1.3.1 Suelos sulfatados ácidos en el mundo.** De acuerdo con Dent y Dawson (2000) y la FAO-AGL (2000), se estima que existen 24 millones de hectáreas de SSA en el mundo, ubicadas desde las zonas templadas hasta el trópico, donde aparecen con mayor frecuencia.

Estos suelos se presentan en tierras bajas de las costas y zonas continentales templadas (Países Bajos, Alemania); costas tropicales del Sur de Asia (Indonesia, Vietnam, Tailandia) y Oceanía (Australia); oeste de África (Senegal, Guinea, Gambia, Sierra Leona, Liberia), (Tabla 1.1); y a lo largo de las costas noreste de América como en Brasil, Guyanas, Venezuela y Colombia (Tabla 1.2).

**Tabla 1.1** Distribución y extensión de SSA en el mundo

CONTINENTE	DISTRIBUCIÓN	ÁREA * AFECTADA POR SSA (ha)	ÁREA AFECTADA POR SSA (%)
ASIA	Indonesia, Tailandia, Vietnam, Myanmar, Filipinas, India, Bangladesh	10956	44,06
ÁFRICA	Nigeria, Guinea Bissau, Guinea, Senegal, Gabón, Camerún	5465	21,98
AMÉRICA	Norteamérica, Centroamérica, Suramérica	5144	20,68
OCEANÍA	Australia	3000	12,06
EUROPA	Finlandia, Suecia	303	1,22
<b>TOTAL</b>		<b>24868</b>	

\* Estimativo en miles de hectáreas.

Fuente: Dent & Dawson (2000); FAO (2000).

**Tabla 1.2** Distribución y extensión de SSA en Suramérica

PAÍS	ÁREA AFECTADA POR SSA (miles de hectáreas)
Brasil	1111
Guyanas	1246
Uruguay	37
Venezuela	2000
Colombia	SC
<b>Total estimado</b>	<b>4894</b>

Fuente: Dent & Dawson (2000); FAO (2000). SC: sin cuantificar.

**1.3.2 Suelos sulfatados ácidos en Colombia.** Las áreas cuantificadas y caracterizadas de SSA en Colombia se encuentran en los basines del río Sinú, Córdoba (Combatt et al., 2004), en la planicie fluvio-lacustre de Ubaté (sector Cucunubá, Fúquene) (Garzón, 2005; Gissat, 2012) y en la planicie fluvio-lacustre de origen halohidrotermal de la cuenca alta del río Chicamocha donde se ubica el valle de Tundama-Sugamuxi, Boyacá (Castro, 2002; Gómez, 2006). Se estima que se encuentren otras superficies de SSA en basines del Valle del Cauca, vallecoluvio aluvial de Armero y en la planicie fluvio lacustre de Sibundoy, Putumayo (Cortés, 1998) (Tabla 1.3).

La formación de SSA en el valle del río Sinú está relacionada con las posiciones depresionales de la planicie del Sinú (IGAC, 1983) y con el drenaje hecho a las ciénagas para aumentar el área cultivable, como también por el control de las aguas del río Sinú en la represa de Urrá. Este secamiento

indujo procesos de acidificación de materiales sulfídicos existentes, lo cual condujo notablemente a la presencia de SSA continentales, representados en las unidades de los *Typic Sulfaquepts* y *Sulfic Endoaquepts*, con impactos negativos en el medio reflejado en áreas escaldadas (Combatt et al., 2004) (Figura 1.3).

**Tabla 1.3** Distribución y extensión de suelos con características sulfatadas ácidas en Colombia.

ÁREA GEOGRÁFICA	ÁREA ESTIMADA (ha)	ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS
BOYACÁ -Valle Tundama-Sugamuxi <sup>1</sup> cuenca alta río Chicamocha.	20.000	SSAA-SSAP de origen fluvio-lacustre halohidrotermal, diferentes estados de evolución. Clima frío seco.
- Valle Ubaté-Cucunubá <sup>2</sup> - cuenca laguna de Fúquene.	3.500	Suelos pseudosulfatados ácidos (SPSA), área minería de carbón, planicie fluvio lacustre, suelos orgánicos de clima frío seco.
CÓRDOBA Zona depresional del valle del río Sinú <sup>3</sup> .	30.000	SSA de origen fluvio - lacustre presentes en basines de la cuenca del río Sinú. SSAA, SPSA, SSAP. Clima cálido subhúmedo a seco.
COSTAS María La Baja - paisajes depresionales llanura costera, Ciénaga, Guajira, Costa Pacífica <sup>3</sup> .	SC	SSA, de origen fluvio-marino ubicado en manglares y ciénagas. SSAP y SSA. Climas cálidos secos, subhúmedos y perhúmedos.
TOLIMA Valle coluvio - aluvial de Armero <sup>1</sup> .	SC	SSA de origen fluvio-volcánico, Suelo pseudo sulfatados ácidos (evolución post-avalancha 1985).
PUTUMAYO Valle del Sibundoy <sup>5</sup>	SC	SSA orgánicos de origen lacustre en áreas continentales de clima frío.
VALLE DEL CAUCA Basines del río Cauca <sup>4</sup> .	SC	SSA con influencia salina, con alta concentración de Mg. SSAP, SSAA, SPSA.

**Fuente:** <sup>1</sup>Gissat (2006); <sup>2</sup>Garzón (2005); <sup>3</sup>Gissat (2012); <sup>4</sup>Combatt et al. (2004);

<sup>5</sup>García (2003); <sup>5</sup>Cortés (1998). SC: sin cuantificar.

Los SSA continentales inventariados hasta el momento en el país corresponden a los de la planicie lacustre del valle alto del río Chicamocha, Boyacá (motivo de esta publicación) y los ubicados en la zona depresional del valle del Sinú, departamento de Córdoba. Tanto los suelos de Córdoba como de Boyacá, aunque presentan diferencias en su origen, tienen en común la ocurrencia de áreas escaldadas improductivas (Figura 1.3).



**Figura 1.3** Áreas escaldadas en SSA orgánicos de la planicie lacustre del valle alto del río Chicamocha (Boyacá) (izq.); áreas escaldadas en SSA minerales de basines del río Sinú (Córdoba) (der.).

**Fuente:** Gissat (2006); Combatt et al. (2004).

## 1.4 AMBIENTES DONDE SE FORMAN SSA

Los SSA se pueden formar en ambientes costeros, continentales lacustres o continentales de mina; los SSA costeros son los que más abundan; el ambiente de cada uno de estos suelos está asociado con características particulares de formación y manejo (Bibi, 2012).

**1.4.1 Suelos sulfatados ácidos costeros.** Estos suelos han sufrido los procesos característicos de óxido-reducción a lo largo del tiempo geológico, como parte del ciclo global del azufre. Durante los últimos 10.000 años (Holoceno), con el aumento del nivel del mar, seguido de la última Edad de Hielo se cubrió la tierra de aguas salobres y se formaron suelos fuera de la zona costera a partir de sedimentos marinos conformando las áreas que hoy conocemos como de manglares, ciénagas, pantanos y estuarios (NRCS, 1999).

Después del aumento del nivel del mar que terminó hace 6.500 años, la acumulación del agua salobre, el contenido de sulfato disuelto y los desechos orgánicos, combinados con sedimentos ricos en hierro produjeron materiales sulfídicos salobres en ambientes anegados (Fitzpatrick, 1996).

Tales condiciones ocurren hoy, y aún se están produciendo sulfuros en los manglares, pantanos salinos, lagos costeros, ciénagas y estuarios que reciben sedimentos del mar. Estas áreas pueden acumular grandes

cantidades de desechos orgánicos en zonas anegadas. Se han reportado en Australia depósitos costeros con una acumulación de hasta 10 m de material orgánico (Fitzpatrick, 1996).

Las propiedades que caracterizan los SSA costeros se describen en la Tabla 1.4. La diferencia con respecto a ambientes continentales radica en la mayor concentración de sulfuros de hierro, con contenidos que oscilan entre 0,01 % a 15 % de S total (Fitzpatrick, 1996).

**Tabla 1.4** Características morfológicas, fisicoquímicas y mineralógicas de SSA costeros.

AMBIENTE	SSA COSTEROS			
Tipo de material	SSAP	Precipitados superficiales	SSAA	Precipitados superficiales
Condición	UW	UW	DD	DD
Características morfológicas	Negro; escasos moteados grises, capas gleizadas	-	Rayas amarillas brillantes	Precipitados amarillos y rojo marrón abundantes
pH (1:5)	7,5-8,5	-	< 3	2,5-5,5
Carbóno Orgánico	5-20	-	5-20	2-15
Azufre total (%)	1-8	-	1-8	-
CE (dS m-1)	3-16	-	3-16	10-20
Eh (mV)	0-200	-	-	-
Minerales (en orden de abundancia)	Pirita	Sulfuro bacteriano desconocido	Jarosita-gohetita	Jarosita ferrihidrita
Procesos dominantes	Sulfhidrización	Ninguno	Sulfatación	Sulfatación fertilización
Desarrollo de procesos	Fuerte	Ninguno	Fuerte	Fuerte

SSAP= suelo sulfatado ácido potencial; SSAA=suelo sulfatado ácido actual; UW= condición saturada inalterada; DD= condición alterada; Eh=potencial redox.

Fuente: Fitzpatrick (1996).

**1.4.2 Suelos sulfatados ácidos continentales.** Los SSA en áreas continentales interiores lacustres y de pantanos presentan un origen similar al de los SSA costeros; su diferencia radica en que en los SSA continentales, los materiales acumulados de tipo orgánico o mineral son más antiguos y se encuentran influidos por elevación montañosa y en algunas áreas por flujos internos de aguas salobres ricas en azufre y hierro de carácter volcánico o sedimentario.

---

Bajo condiciones oxidantes, la formación de ácido sulfúrico disminuye el pH estacionalmente por debajo de 3,5 (Tabla 1.5). Esta reacción promueve la inestabilidad de minerales primarios, lo cual asociado con las altas concentraciones de azufre contribuye a la formación de sales ácidas de Al y Fe, que degradan la estructura del suelo, contaminan aguas y originan improductividad del medio, como se evidencia en áreas escaldadas (Fitzpatrick et al., 2002, Burton et al., 2006).

El deterioro de las propiedades físicas del suelo se refleja en la constitución de suelos masivos e impermeables, debido a la obstrucción de los poros por parte de la acumulación gradual de óxidos e hidróxidos férricos en forma de precipitados o agentes cementantes, y a la desagregación de sedimentos orgánicos en el suelo por parte de sales y metales (Fitzpatrick et al., 2002).

Poelman (1972) menciona que la formación secundaria de sulfuros, independiente de procesos sedimentarios costeros, permite la salinización por filtración de aguas de fuentes salinas o por variación de regímenes hídricos. Este flujo de aguas salobres puede provenir de zonas termales (Castro & Gómez, 2006). Cuando las reacciones de oxidación ocurren en los horizontes superficiales del suelo, la expresión del área es el desarrollo de zonas escaldadas o de limitado crecimiento de la vegetación, como ocurre en los SSA del DRACH-Boyacá (Figura 1.3).

La formación de SSA continentales está relacionada con procesos biogeoquímicos del medio hidrológico y con los componentes constitutivos de los sedimentos minerales u orgánicos que llevaron a su formación. Los siguientes procesos caracterizan los SSA continentales (Fitzpatrick et al., 2002):

- Acumulación de sulfatos, sulfuros, óxidos de hierro y sales ácidas bajo condiciones de estacionalidad climática, fluctuación del nivel freático del suelo y frecuencia de encharcamiento e inundaciones.
- Acidificación por influencia del ácido sulfúrico en el agua y en el suelo (pH < 4,0).

- Desarrollo de suelos escaldados en áreas de descarga de estos sedimentos.
- Destrucción de la estructura por efecto de las reacciones de oxidación y los cambios de estaciones secas a húmedas.
- En épocas encharcadas se aumenta la presión y compactación del suelo por el agua superficial con el desarrollo posterior de capas impermeables.
- En épocas húmedas, las condiciones sulfúricas destruyen los microagregados del suelo por la disolución de óxidos de hierro y de los minerales arcillosos, la salinidad de la solución del suelo flocula las arcillas y las condiciones saturadas del suelo generan inestabilidad estructural.
- En épocas secas, por evaporación se concentran y cristalizan en superficie sales minerales de hierro, azufre y otros elementos con formación de estructuras laminares, junto a horizontes masivos e impermeables por cementación de óxidos e hidróxidos de hierro, aluminio y sílice.

**Tabla 1.5** Características morfológicas, fisicoquímicas y mineralógicas de SSA continentales

AMBIENTE	SSA CONTINENTALES		
Tipo de material	SSAP	SSAA	Precipitados superficiales
Condición	UW	DD	UW, DD
Características morfológicas	Negro; abundantes moteados grises	Negro, manchas rojizas oscuras, rayas amarillas	Precipitados gelatinoso rojo marrón
pH (1:5)	6,5-8,5	3-4	5,5-6,5
Carbono orgánico	2-10	2-10	-
Azufre total (%)	0,2-2,0	0,1-1,0	-
CE (dS m-1)	1-10	2-15	-
Eh (mV)	50-100	>400	-
Minerales ( en orden de abundancia)	Pirita	Ferrihidrita, gohetita, jarosita schwertmannita jurbanita	Ferrihidrita Lepidocrocita gohetita
Procesos dominantes	Sulfhidrización	Sulfatación ferrilización	Sulfatación ferrilización
Desarrollo de procesos	Medio	Medio	Fuerte

SSAP= suelo sulfatado ácido potencial; SSAA=suelo sulfatado ácido actual; UW = condición saturada inalterada; DD= condición seca alterada; Eh=potencial redox.

**Fuente:** Fitzpatrick (1996).

**1.4.3 Suelos sulfatados ácidos de mina.** Depósitos metalíferos y de carbón están comúnmente relacionados con materiales parentales ricos en compuestos de sulfuros de hierro (pirita) y de sedimentos sulfatados. Otras rocas, especialmente esquistos negros, pueden contener minerales piríticos además de contener minerales como cuarzo, clorita y pirrotita (Fitzpatrick, 1992; Chuxia, 2012).

La exposición de estas rocas, la humedad y la gran cantidad de partículas y agregados que generalmente son depositados en la superficie del suelo durante las excavaciones mineras, llevan a la oxidación química y bacteriana. Esta oxidación induce la acidificación de los materiales de desecho junto con la generación de agua de drenaje, formando así un lixiviado característico, el cual es denominado drenaje ácido de las minas DAM (Fortín & Beveridge, 1997; Poelman, 1972; Chuxia, 2012).

**Tabla 1.6** Características morfológicas, fisicoquímicas y mineralógicas de SSA-mina

AMBIENTE	SSA EN ÁREA DE MINAS		
Tipo de material	SSAP	SSAA	Precipitados superficiales
Condición	UW	DD	UW, DD
Características morfológicas	Marrón-negro, abundantes moteados grises	Manchas rojizas oscuras	Precipitados gelatinosos pardo rojizo
pH (1:5)	6-7	3-5	4,0-6,5
Carbono orgánico	< 2	< 2	-
Azufre total (%)	< 0,5	< 0,5	-
CE (dS m <sup>-1</sup> )	< 1	< 1	-
Eh (mV)	0-100	-	-
Minerales ( en orden de abundancia)	Sulfuros de hierro ferrihidrita	Jarosita ferrihidrita	Jarosita Schwertmannita gohetita lepicrocita
Procesos dominantes	Sulfhidrización	Sulfurización ferrilización	Sulfurización Ferrilización
Desarrollo de procesos	Débil	Débil	Fuerte

SSAP= suelo sulfatado ácido potencial; SSAA= suelo sulfatado ácido actual; UW= condición húmeda imperturbada; UD= condición seca imperturbada; Eh=potencial redox.

**Fuente:** Fitzpatrick (1996).

---

Las experiencias muestran que los SSA de mina ocurren particularmente como consecuencia de procesos bioquímicos en flujos de aguas y sustratos procedentes de mina, vertederos de material de roca y material vegetal que van a originar suelos sulfatados ácidos de mina. Los procesos anteriores conllevan la disminución de pH hasta valores de 2, lo cual incrementa la solubilidad de metales pesados, salinidad y contaminación del entorno (Fortín & Beveridge, 1997; Ludwig et al., 1999). La restricción más preocupante de estos suelos son los DAM asociados a áreas de mina en el mundo (Fitzpatrick, 1996; Chuxia, 2012).

El grado de acidificación en estos suelos depende de la clase de depósitos de sulfuros metálicos, unos pueden producir más acidez que otros y se ha encontrado que han generado hasta valores ultraácidos de pH en aguas de drenaje con actividades iónicas de hidrógeno de 1M y algunas veces hasta de 10M (University of Montana, 2000).

**1.4.4 Comparación de SSA formados en ambientes costeros, continentales y de mina.** Fitzpatrick (1996) relacionó las características físicas, químicas y mineralógicas de esta clase particular de suelos sulfatados ácidos bajo condiciones de SSAA y SSAP, las cuales se resumen a continuación:

Cada una de las tres clases de suelos representa grados de intemperismo diferentes. Los SSA costeros son estables, los SSA interiores o continentales son medianamente estables, y los SSA en áreas de mina son altamente intemperizados. De estos procesos biogeoquímicos de transformación se deducen las características comparativas presentadas en las tablas 1.4, 1.5 y 1.6. Las diferencias más representativas se centran en el tipo de suelo y en los minerales secundarios formados, especialmente de hierro.

**Los SSAP costeros** tienen un desarrollo intenso de materiales sulfúricos, asociado a sesquióxidos de Fe y Al; estos rara vez se cristalizan y precipitan dentro de los horizontes del perfil del suelo. Su color es negro con presencia de moteados grises, en consecuencia, el proceso dominante es la formación de sulfuros (sulfhidrización). Los caracteriza pH cercanos a la neutralidad, Eh negativos, altos niveles de S total (>2 %), Fe y materia

---

orgánica (>10), debido a medios de acumulación en entornos pantanosos, mangles y áreas anegadas.

En cambio, bajo condiciones de **SSA inalterados en áreas de minas** no se forma pirita secundaria ni materiales sulfídicos, sino pirita primaria, porque es constituyente de las rocas. Se limita la presencia de pirita secundaria por la escasa cantidad de materia orgánica. Los valores de Eh son positivos, lo que refleja fuertes condiciones de oxidación, aun sin perturbar, presentan pH menores a 4. Los medios intemperizados asociados con SSA en áreas de minas son más oxidados, y la formación de sulfuros de hierro reducido solamente ocurre en áreas aisladas.

**Los SSA continentales** tienen propiedades intermedias con respecto a los anteriores, y la posibilidad de formar materiales sulfídicos está ligada a su formación en áreas lacustres o marinas antiguas. La actividad de los procesos redox depende de la estacionalidad y favorece la formación de minerales precipitados de sulfatos básicos de oxihidróxidos de hierro y aluminio (ferrihidrita, lepidocrocita, shwermannita, jarosita, goetita, alunita, jurbanita) en horizontes subsuperficiales. En superficie se pueden presentar capas cementadas e impermeables de poco espesor. La formación de esta mezcla única de minerales de Fe y Al es indicativa de cambios locales estacionales rápidos en estos medios y de aumento de la tasa de mineralización del suelo. Es importante notar que la formación de pirita secundaria depende de la cantidad de materia orgánica existente en ambientes continentales, ya que las bacterias reductoras de azufre utilizan parte de esta como energía para su metabolismo y en la transformación de sulfatos a materiales sulfurosos. Estos suelos son más dinámicos por estar dominados directamente por estados de óxido-reducción.

En ambientes costeros dominan mayormente los SSA potenciales y en menor grado los SSA actuales, pero, en ocasiones, por la capacidad de amortiguación de estos suelos, se autoneutralizan debido a la presencia de concentraciones de carbonatos, fosfatos e influencia de compuestos calcáreos marinos, y generan SSA del tipo pseudosulfatados.

---

## 1.5 PROBLEMAS RELACIONADOS CON SSA

El desconocimiento de los efectos e impactos de SSA y su deficiente manejo, repercuten en distintos sectores de la producción y comunidades, incluyendo agricultores, constructores, ingenieros y pescadores, ente otros. Son los únicos suelos en que la influencia de los drenajes puede llegar a ser crítica en cuanto a acidificación y salinización de grandes áreas, así como en la afectación de la actividad agrícola, los trabajos de ingeniería y la calidad de aguas en sistema de estuarios y ríos (Chuxia, 2012).

La fuente problema de SSA son las excesivas cantidades de ácido sulfúrico que producen, provenientes de la oxidación bioquímica de sulfuros metálicos por prácticas de aireación, laboreo y drenaje (Fitzpatrick et al., 1993). Cuando la oxidación es completa, una mol de piritita produce una mol de ácido sulfúrico, y una tonelada de piritita origina 1,6 toneladas de ácido sulfúrico soluble, que se mueve libremente en el suelo disolviendo minerales y liberando metales tóxicos solubles (aluminio, hierro, cadmio, manganeso, arsénico), y afectando directamente el suelo y el hábitat (Hicks et al., 2002).

**1.5.1 Problemas agronómicos.** Están relacionados con las limitaciones de tipo productivo que pueden presentar los SSA como consecuencia de su grado de afectación física, química y biológica para el establecimiento y desarrollo de cultivos, efectos comprobados por Bloomfield y Coulter (1973), Lines *et al.* (1999), Dent y Pons (1995), Castro *et al.* (2006) y Gómez (2006).

Las limitaciones de mayor relevancia en el componente químico tienen que ver con:

- Efectos directos por la extrema acidez, debida a la solubilidad de iones de aluminio, azufre y hierro, que llegan a concentraciones tóxicas para las plantas.
- Presencia de horizontes sulfúricos, materiales sulfídicos y/o niveles freáticos acido-salinos fluctuantes.

- 
- Insolubilización de fósforo, causada por la formación de fosfatos de aluminio y hierro.
  - Salinización de suelos y aguas.
  - Baja saturación de bases y deficiencias nutricionales.

Bajo condiciones inundadas, la acidez es mitigada pero surgen problemas de toxicidad con hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y ácidos orgánicos.

Las limitaciones de mayor relevancia en el componente físico están relacionadas con:

- El grado de maduración de los suelos, que expresan fenómenos de subsidencia (valores  $n > 0,7$ ), en este caso, las arcillas y materiales orgánicos permanecen frágiles, no soportan cargas pesadas (labranza), son pobremente estructurados, masivos y mal drenados.
- La presencia de sales, de fracciones de limos orgánicos reconocidos a manera de lodos húmicos, las altas concentraciones de hierro en solución identificadas por colores ocre en aguas de drenaje y la dispersión de arcillas producto del ambiente extremadamente ácido de la solución del suelo, ocasionan en menor o mayor grado el taponamiento de los poros grandes interagregados, y dan como resultado un decrecimiento en la permeabilidad (Castro et al., 2009).
- Las limitaciones de tipo químico repercuten en el comportamiento físico del suelo y en la expresión fisiológica de cultivos; es el caso del estrés hídrico causado por salinidad en estos suelos.

El cuadro de interacciones físico-químicas tratadas anteriormente da como resultado un ambiente adverso desde el punto de vista edáfico para el crecimiento de poblaciones abundantes y eficientes de microorganismos. Bajo las condiciones de SSA-actuales, los microorganismos benéficos son diezmados, se restringe la descomposición de la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes (Sammut, 2000).

---

**Toxicidad por aluminio.** Con pH menores a 3,5 los iones  $Al^{3+}$  limitan el crecimiento de la planta, donde este metal soluble es el de mayor toxicidad. El aluminio es el principal catión intercambiable en SSA; generalmente se encuentra también como sulfato básico o hidróxido coloidal (Dent, 1986). Breemen (1973) demostró que el  $Al^{3+}$  de cambio, con valores de pH por debajo de 4 a 4,5, incrementa notoriamente su solubilidad hasta 10 veces su concentración cuando el pH cae a valores menores de 3,5. La dinámica anterior ha sido comprobada en la investigación de SSA del valle alto del río Chicamocha, sobre dinámica redox y actividad de aluminio (Gómez, 2006).

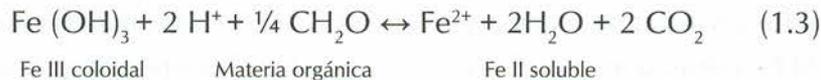
Respecto a las concentraciones en aguas freáticas, de drenaje y fase soluble del suelo, los niveles de aluminio soluble no deben superar valores mayores a  $1\text{ mg L}^{-1}$  para uso agrícola y de consumo (Dent & Dawson, 2000; Hicks et al., 1999; Lamontagne et al., 2004).

El aluminio soluble se acumula en los tejidos de las raíces y evita la división celular y elongación radicular, posiblemente inhibiendo las enzimas que actúan en la conformación de la pared celular (Marshner, 2012); el resultado de este proceso es la deformación en el sistema de raíz. Por otra parte, el fósforo es inhibido a causa de su fijación por el aluminio en el suelo y dentro de las raíces.

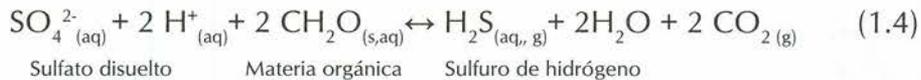
La toxicidad de aluminio puede ser evitada por inundación en zonas cálidas donde se cultiva arroz; la inundación aumenta el pH del suelo, pero las semillas de arroz, bajo condiciones sulfatadas ácidas, pueden aun sufrir toxicidad por aluminio, en el caso de plántulas, si son trasplantadas antes de los procesos de reducción. Esta práctica de inundación, como el enclamiento en cultivos de secano, debe realizarse a partir del monitoreo del pH hasta inmovilizar el aluminio (Dent & Dawson, 2000).

**Toxicidad por hierro.** El  $Fe^{2+}$  puede ser tóxico bajo condiciones de reducción (Ecuación 1.3). Chuxia (2012) reporta valores hasta  $90\text{ mol m}^{-3}$  ( $5130\text{ mg L}^{-1}$ ) en SSA de Tailandia después de dos semanas de inundación, pero valores medios entre  $500$  y  $1000\text{ mg L}^{-1}$  son los más comunes en este tipo de suelos.

Las altas concentraciones de Fe coloidal presentes en SSA potenciales en campo, pueden disolver grandes cantidades de este elemento después de la inundación. Los niveles mayores a 500 mg L<sup>-1</sup> de hierro soluble son tóxicos para la mayoría de cultivos, pero depende del contenido de materia orgánica de fácil descomposición, del tiempo de saturación de agua y de los rangos de tolerancia de las variedades.



**Toxicidad por sulfuro de hidrógeno.** Esta ocurre como resultado de la reducción del sulfato en suelos inundados (Ecuación 1.4), y la consecuente toxicidad por hierro II. El arroz es el principal cultivo involucrado en medios anegados. En cultivos de secano, la toxicidad por este ácido se presenta cuando los suelos están sobre materiales sulfídicos o sobre horizontes sulfatados ácidos altos en materia orgánica y con un nivel freático cercano a la superficie (Burton et al., 2006).



Concentraciones de H<sub>2</sub>S en solución, en el rango de 1 a 2 x 10<sup>-6</sup> mol m<sup>-3</sup>, limitan el funcionamiento de las raíces, y más aún cuando se mueve como gas a la superficie. Las plántulas jóvenes son especialmente susceptibles y generan necrosis en las puntas. Las plantas afectadas por el ácido sulfhídrico son más susceptibles a las infecciones. Las toxicidades están asociadas mayormente a suelos ricos en materia orgánica y bajos niveles de Fe. Las concentraciones altas de hierro en presencia de H<sub>2</sub>S, forman sulfuros de Fe (Dent & Dawson, 2000). Las bacterias responsables de la reducción de sulfatos no operan en condiciones ácidas, de tal manera que la actividad tóxica del H<sub>2</sub>S se desarrolla después de que el pH ha aumentado a valores mayores de 4,0 por saturación prolongada de agua.

**1.5.2 Otros problemas asociados a condiciones sulfatadas ácidas.** Otros impactos al medio, producto de la contaminación de aguas de drenaje, arroyos y ríos por la producción de ácido sulfúrico, son:

- 
- Degradación del hábitat e improductividad de plantas.
  - Muerte de peces y organismos acuáticos (enfermedad mancha roja en peces).
  - Desoxigenación del agua.
  - Impactos en la salud humana y animal por consumo de aguas ricas en aluminio (problemas en la salud mental y dermatitis).
  - Impactos en obras de ingeniería (corrosión por ácido sulfúrico y sales de  $(\text{Na}_2\text{SO}_4)$  estructuras metálicas y de concreto, torres de energía, tubería de oleoductos y de aguas para riego).
  - Oclusión y sellamiento de drenajes.
  - Impactos socioeconómicos (pérdidas económicas en áreas de pesca comercial y recreacional, turismo e infraestructura).
  - Degradación del hábitat y cambios en las comunidades acuáticas de plantas.
  - Impacto sobre la población de ranas y el hábitat de las aves.

# CAPÍTULO 2

---

## **DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO**



## 2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 2.1 LOCALIZACIÓN Y EXTENSIÓN

El área de estudio, objetivo de esta publicación, se localiza en la región andina, subregión del altiplano cundiboyacense, en fisiografía de la planicie fluvio-lacustre que conforma el valle alto del río Chicamocha, departamento de Boyacá, Colombia.

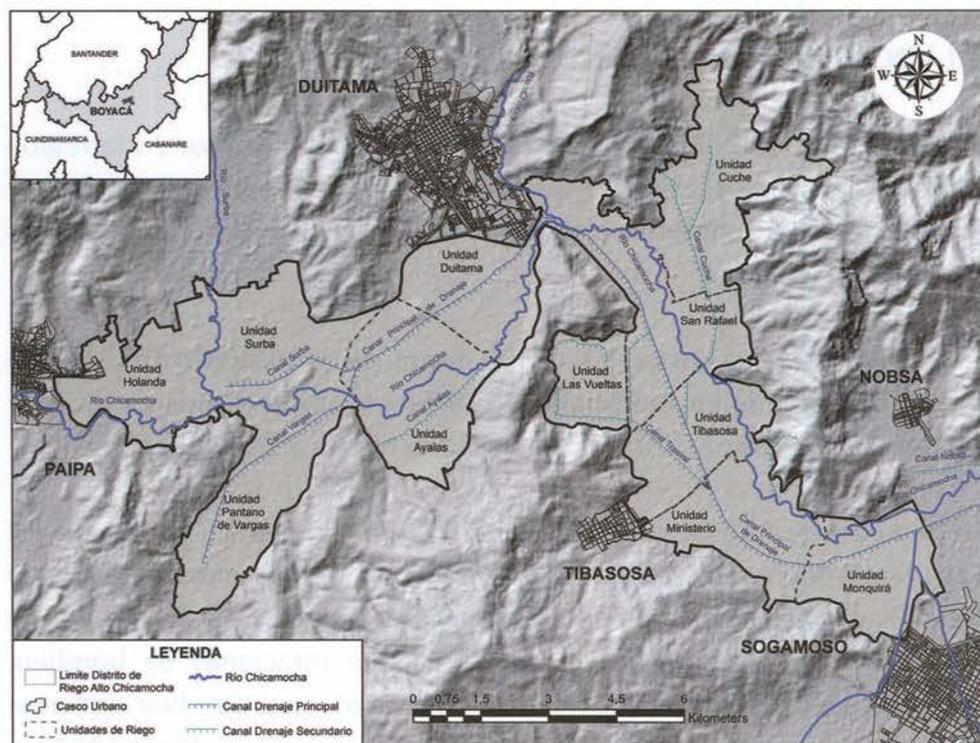
Geográficamente se encuentra a 2500 msnm, en condiciones de clima frío seco, y comprende los municipios de las provincias de Tundama (Paipa y Duitama) y Sugamuxi (Tibasosa, Santa Rosa, Nobsa y Sogamoso).

En el área descrita opera desde 1996 el Distrito de Riego y Drenaje del Alto Chicamocha (DRACH), considerado uno de los distritos de riego presurizado más modernos de Latinoamérica (Figura 2.1). Su sistema de operación fue diseñado para tomar, mediante estaciones de bombeo, aguas del río Chicamocha, de muy buena calidad, para distribuir de forma controlada riego predial a once unidades de riego, que benefician 6314 ha, de las 11300 ha del área total del proyecto (DRACH, 2009).

La comprobada existencia de suelos sulfatados ácidos (SSA) en cerca de 2800 ha (45 % del área actual influenciada por riego), viene afectando en diferente grado la productividad agropecuaria en predios del distrito (ver mapa de SSA, Anexo 1, CD adjunto). Las unidades de riego mayormente afectadas por esta problemática son Ayalas, Las Vueltas, Cucho, Vargas y Duitama (Gissat, 2006).

De acuerdo con las anteriores anotaciones, el área del DRACH es la que define el espacio geográfico del presente estudio.

La población actual de la cuenca del río Chicamocha es de 600.000 habitantes, de los cuales, aproximadamente el 64 % reside en zonas urbanas. Las proyecciones indican que hacia el año 2030 la población aumentará a 975.000 habitantes. En los municipios que se benefician directamente del distrito de riego, la población actual está cercana a 300.000 habitantes, de los cuales 6.010 son usuarios del distrito (DRACH, 2009).



**Figura 2.1** Localización del área de estudio: planicie fluvio-lacustre del valle alto del río Chicamocha, donde opera el Distrito de Riego del Alto Chicamocha, DRACH.

**Fuente:** Gissat (2012).

## 2.2 ANTECEDENTES

Según información reportada en el informe ejecutivo del DRACH (2009), la historia del proyecto del Alto Chicamocha y Firavitoba, hoy DRACH, se remonta al año de 1945 cuando Electraguas, entidad oficial, construyó una red de canales de drenaje con el propósito de permitir la explotación agropecuaria de cerca de 9300 ha que permanecían inundadas en los valles del Alto Chicamocha y de Firavitoba.

---

En 1964, se contrató el diseño de obras para el proyecto de adecuación de tierras de los valles del Alto Chicamocha y Firavitoba. Con base en estos estudios, el INCORA construyó en 1966 la presa de La Playa-municipio de Tuta, con el propósito de controlar crecientes y aportes de sedimentos del río Jordán y permitir el riego de 1000 ha en el valle del Alto Chicamocha.

En 1970, el Incora inició la construcción de la unidad de riego San Rafael, sobre un área de 723 ha, que consiste en una estación de bombeo del río, una red de distribución de agua en tubería de asbesto-cemento enterrada y los equipos de riego por aspersión. Con el propósito de controlar el aporte de sales de las aguas termales de Paipa al río Chicamocha, se construyó un sistema de captación y almacenamiento de las mismas.

En 1974, el Incora, con asesoría de la firma israelí Tahal Consulting Engineers, realizó el estudio de factibilidad del proyecto Boyacá-valles del Alto Chicamocha y Firavitoba. En 1976, el proyecto pasó a ser administrado y operado por el Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT).

En 1985, el HIMAT contrató los diseños detallados de once unidades de riego por aspersión para beneficio de 6800 ha, del sistema de drenaje secundario, de la red de alimentación de energía eléctrica a las estaciones de bombeo y del mejoramiento del control de fuentes salinas de Paipa. En 1990, se finaliza la construcción de la represa La Copa en el municipio de Toca, como embalse regulador de los caudales procedentes de las cuencas altas que desembocan al río Chicamocha.

En el año de 1995, la Asociación de Usuarios del DRACH recibió del HIMAT, la administración y operación del Distrito. En la actualidad se cuenta con once unidades de riego, las cuales benefician 6314 ha en riego y 2944 ha en drenaje.

Básicamente, el Distrito se desarrolló a lo largo del valle marginal del río Chicamocha, desde la represa La Copa en el municipio de Toca, hasta el sitio denominado Vado Castro en jurisdicción del municipio de Sogamoso, donde el río inicia su descenso hacia el cañón que lleva su nombre.

## 2.3 CLIMA

El clima correspondiente al DRACH es frío seco, con un régimen bimodal y déficit hídrico en la mayoría de los meses a excepción de abril, mayo y octubre. Existe concentración de lluvias en los meses de abril y mayo para el primer semestre, y octubre a noviembre en el segundo. Presenta una alta evaporación promedio de 1245 mm/año, una precipitación promedio de 851 mm/año, y una temperatura media de 14 °C, según reporte de diez años (DRACH, 2009). La velocidad promedio del viento es de 3 m  $\text{seg}^{-1}$  y dirección predominantemente sur-oeste. El clima no se relaciona con el régimen ácuico de muchos suelos que presentan limitaciones de drenaje como causa de su ubicación en el área depresional lacustre o debido a la fluctuación del nivel freático (Castro et al., 2009).

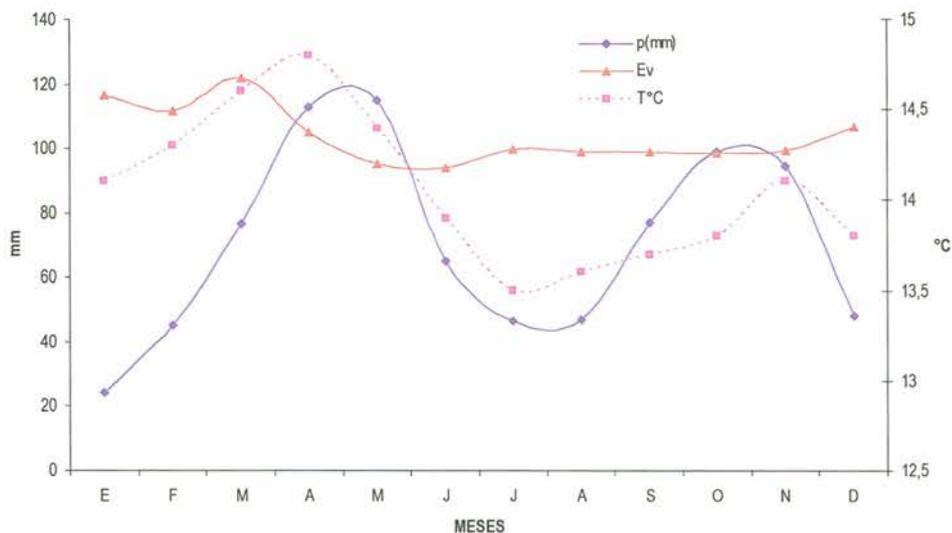


Figura 2.2 Diagrama climático. Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

Fuente: IDEAM (2009).

## 2.4 HIDROLOGÍA

**2.4.1 Aguas superficiales.** El sistema hidrológico del valle está constituido por el río Chicamocha que lo recorre en toda su extensión. Sus afluentes principales son el río Tuta, Jordán, Sotaquirá, Piedras, Surba, Chiticuy y Chiquito. De estos, el río Tuta aporta aproximadamente el 75 % del caudal del río Chicamocha.

---

Para el suministro de agua y control de crecientes en el área del Distrito, se cuenta con la represa de la playa sobre el río Jordán, con una capacidad de 6 millones de metros cúbicos y la represa de La Copa sobre el río Tuta, con un volumen de embalse de 70 millones de metros cúbicos.

**2.4.2 Aguas termominerales.** En Paipa tributan al río Chicamocha dos fuentes de aguas termominerales, que aumentan notablemente las concentraciones de sales de sus aguas, haciéndolas no aptas para consumo, especialmente durante la época de verano.

Para evitar los problemas que se causan por la descarga de esta agua, se realiza un manejo controlado de descargas al canal de drenaje Vargas, que más adelante se denomina canal principal, a través de una tubería de PVC de 12" de diámetro, en una longitud aproximada de 12 km. El caudal de las fuentes salinas es casi constante de  $80\text{L s}^{-1}$ , y la concentración de sales muy alta ( $40\text{dS m}^{-1}$  a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

**2.4.3 Aguas freáticas.** La lectura y análisis de la red freaticométrica del Distrito muestra que en un 30 % del área se presentan niveles freáticos entre 0,0 y 1,0 m, durante la época seca. En la época crítica de lluvias hay ascenso del nivel freático, llegando a estados de inundación, lo que puede afectar hasta un 45 % del área.

## 2.5 SUELOS

Según las características fisiográficas y pedológicas del área, el valle del río Chicamocha constituyó un gran lago encerrado por las estribaciones de los cerros aledaños, que al drenarse formó la corriente principal del río Chicamocha. Con el drenaje gradual del valle se generaron las condiciones para el crecimiento de vegetación hidrófila que ha formado los depósitos orgánicos actuales que, junto con los sedimentos lacustres, evolucionaron para formar los SSA (Gissat, 2006). Los aportes sucesivos recientes de material aluvial en el cauce del río formaron fajas alargadas de dique, con suelos de textura media y subsuelos pesados.

---

Varias zonas del distrito presentan áreas de suelos sulfatados ácidos, las cuales han sido cartografiadas y caracterizadas por Gissat, y actualmente tienen una propuesta para su rehabilitación y manejo.

## 2.6 DRENAJE

El sistema está formado por una red de drenaje principal y secundario de 240 kilómetros de canales y ríos que vierten sus aguas a un canal principal y posteriormente al río Chicamocha, en el sector de Puente Reyes en la entrada a Sogamoso. Se cuenta con estructuras de control de nivel por bombeo fijo en los sectores de Cucho, El Chorrillo y Ayalas, y dos embalses que permiten la regulación parcial del caudal del río en las dos épocas climáticas.

A lo largo del río Chicamocha también se encuentran sistemas de control de nivel, que permiten el drenaje por diferencia de gradientes de presión o por compuertas de cortina.

El sistema terciario de drenaje está formado por una red de pequeños canales que posibilitan conducir el agua de los predios a la red primaria y secundaria, con una longitud aproximada de 150 km.

El sistema de drenaje principal tiene dos pasos subfluviales bajo el río Chicamocha, en los sitios de Puente la Balsa y Puerto Arepas, en el caso del canal Vargas o principal, y en el sector de Punta Larga, en el caso del canal Cucho. Estas obras permiten evacuar aguas de los sectores más bajos del Distrito, los cuales se encuentran ubicados en Cucho, Pantano de Vargas y el Cebadero.

En sectores como Cucho, Ayalas, Ucuenga, Las Minas, Tocogua, el drenaje por gravedad es complementado con estaciones de bombeo fijo, en el caso de los dos primeros, y bombeo móvil, en los otros sitios. En el sitio denominado El chorrillo, el drenaje es exclusivamente por bombeo.

Desde el punto de vista del perfil longitudinal, el cauce del río Chicamocha presenta una pendiente sumamente baja ( $0,5 \text{ m km}^{-1}$ ) en el sector entre

---

Paipa y Nobsa, lo que induce a un drenaje disfuncional en todo el valle. Los datos disponibles de descarga permiten concluir que el nivel promedio del río se encuentra la mayor parte del año por encima de la elevación media del fondo del valle, razón por la cual el río está artificialmente encajonado por jarillones en cerca de 40 km de su recorrido por el valle en el sector considerado.

La colmatación de la cuenca lacustre ha sido incompleta y aún hoy, si no fuera por la actividad cultural de canalización del río, muchos sectores del valle (Vargas, Ayalas, Trasval, Cuche, etc.) permanecerían como zonas lacustres y, en el mejor de los casos, como pantanos inaccesibles.

Las tierras bajas del Distrito son áreas propensas a inundación periódica, se localizan en ambos lados del canal del río, adyacentes normalmente a los albornos o diques naturales. Son muy abundantes en el valle del Alto Chicamocha y sus características principales están relacionadas con la composición turbosa de su suelo y, en algunos casos, con la contaminación salina en la superficie, que las inutiliza para fines agrícolas. Las zonas inundables más notables están localizadas en el área suroeste del lago Sochagota, entre el canal de Ayalas y la zona montañosa situada en el oriente, la zona plana entre Duitama y la loma de Peña Negra, el valle a ambos lados del canal del Cuche y los terrenos de Transvaal. La primera y la última mencionadas presentan características superficiales de intensa contaminación salina.

## **2.7 USO ACTUAL DE LA TIERRA**

La mayoría de los suelos son de vocación agrícola, a pesar de lo cual sobresale la actividad ganadera, especialmente la lechera. A lo largo de las últimas décadas se evidencia un aumento del área de producción agropecuaria, donde sigue predominando la explotación ganadera (Pacheco et al., 2006).

Con respecto a la actividad agrícola, se observa un cambio en los principales renglones de producción, ya que en años anteriores el cultivo de la cebada dominaba el área de siembra, y actualmente la cebolla de bulbo pasó a ocupar este lugar. Según registros del DRACH (2009), el área

---

sembrada en cultivos fue de 2523 ha y en pastos (kikuyo-raygrass-trebol-alfalfa) 4394 ha. Los cultivos de mayor predominio son las hortalizas de hoja, flor y bulbo, donde sobresale la cebolla de bulbo con 1700 ha, otros cultivos importantes que hacen la rotación con hortalizas son el maíz y las leguminosas (arveja y fríjol).

La explotación de la tierra hasta 1999 en el Distrito de Riego del Alto Chicamocha se adelantaba por sus propietarios con el 81 %, y el restante 19 % era explotado por arrendamientos; en los últimos cinco años, de acuerdo con el estudio de Pacheco *et al.* (2006), se pudo establecer un cambio considerable en la forma de explotación, ya que pasó al 42 % el aprovechamiento de la tierra por parte de los arrendatarios. La distribución predial de las tierras del Distrito muestra el predominio del minifundio, pues de 8.219 predios existentes, el 77 % pertenece a pequeña propiedad (<1ha).

# 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 BaCl<sub>2</sub>) y método del pH en peróxido de hidrógeno para determinar materiales sulfídicos (SSAP).

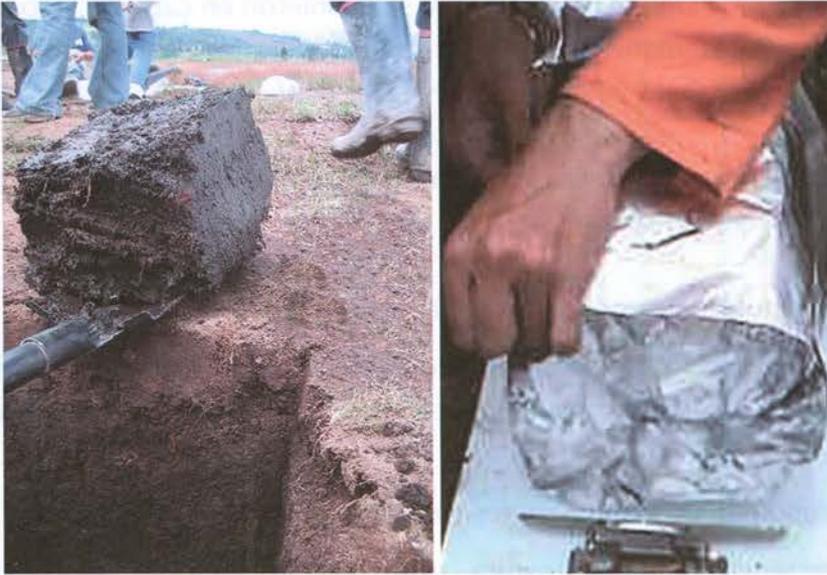
Las muestras de suelos recolectadas en campo se empacaron herméticamente para mantener la humedad de campo, tal como lo muestra la Figura 3.1.

**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).

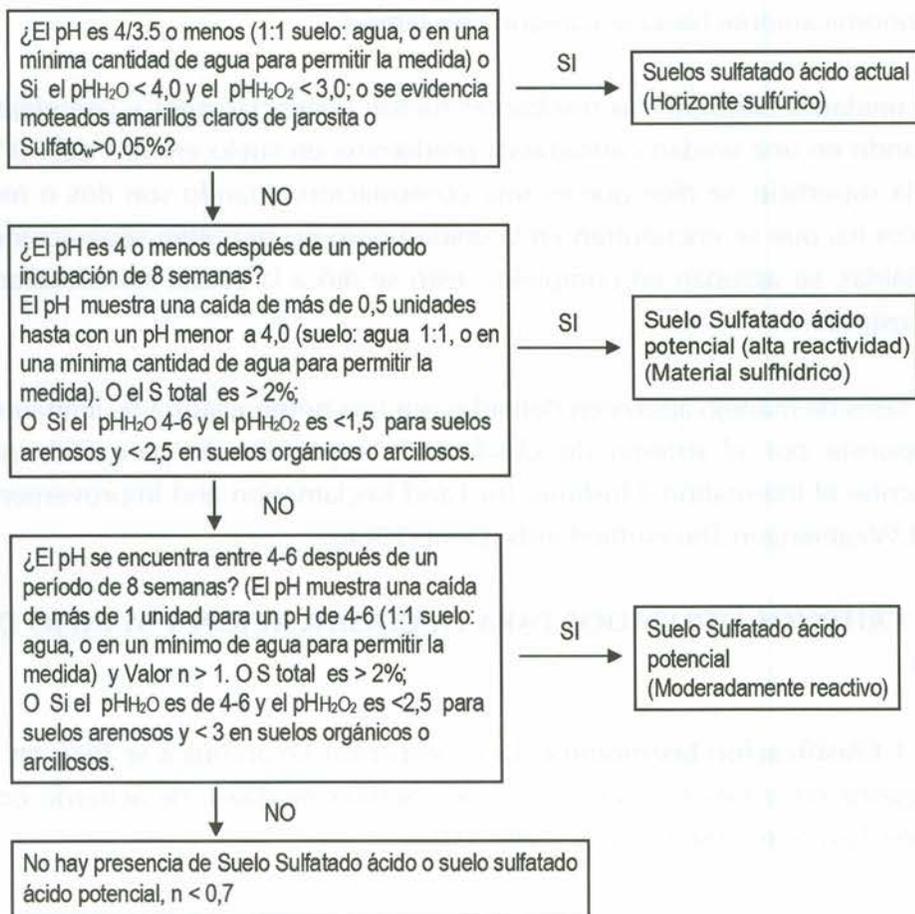


Figura 3.2 Diagrama de decisión para establecer la clasificación de suelos sulfatados en el valle alto del Río Chicamocha.

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  $\text{CaCl}_2$ , 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  $\text{AcONH}_4$  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 dísticos, 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><b>Suelo sulfatado ácido actual</b> Horizonte sulfúrico (pH &lt; 3,5/4 y sulfatos solubles en agua &gt; 0,05 %)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dentro de los 20 cm <math>a_1</math></li> <li>• Dentro de los 50 a 60 cm <math>a_2</math></li> <li>• Dentro de los 80 a 100 cm <math>a_3</math></li> <li>• pH &gt; 4,0 y Sulfato soluble menor a 0,05 % <math>a_4</math></li> </ul>	<p><b>Arcillosos</b> 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. <b>C</b></p> <p><b>Orgánicos</b> Materiales orgánicos con más de 40 cm de espesor. <b>O</b></p>																												
<p><b>Suelo sulfatado ácido potencial</b> Materiales sulfídicos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dentro de los 20 cm <math>p_1</math></li> <li>• Dentro de los 50 a 60 cm <math>p_2</math></li> <li>• Dentro de los 80 a 100 cm <math>p_3</math></li> </ul>	<p><b>Arenosos</b> Suelos arenosos o franco arenosos. Donde exista un horizonte orgánico en superficie este debe ser menor de 20 cm de espesor. <b>S</b></p>																												
<p><b>Salinidad</b> (<math>C_{Ee} \text{ ms.cm}^{-1}</math>)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0-2 No salino</li> <li>• 2-4 Ligeramente salino</li> <li>• 4-8 Salino</li> <li>• &gt; 8 Muy salino</li> </ul>	<p><b>Materiales orgánicos y minerales</b> Materiales ínterestratificados entre materiales orgánicos y minerales a través del perfil.</p> <p>Superficie orgánica <b>O/C</b> Superficie mineral <b>C/O, S/O</b></p>																												
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dentro de los 40 a 50 cm <math>s_1</math></li> <li>• Dentro de los 80 a 100 <math>s_2</math></li> </ul>	<p><b>Madurez del suelo</b> En materiales orgánicos, minerales y organominerales.</p>																												
	<p><b>n-value</b></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>&gt; 0,7</td> <td>&gt; 1,4</td> <td></td> <td><math>w_3</math></td> </tr> <tr> <td>• Moderadamente maduro</td> <td>&gt; 0,7</td> <td>0,7-1,4</td> <td></td> <td><math>w_2</math></td> </tr> <tr> <td>• Maduro con subsuelo inmaduro</td> <td>&gt; 0,7</td> <td>&gt; 0,7</td> <td>y/o &gt;1,0</td> <td><math>w_1</math></td> </tr> <tr> <td>• Maduro con subsuelo maduro</td> <td>&gt; 0,7</td> <td>&lt; 0,7</td> <td>&lt;1,0</td> <td><math>w_0</math></td> </tr> </tbody> </table>	Nivel de madurez	Profundidad (cm)				0-20	20-50/60	50/60-80/100	• Inmaduro	> 0,7	> 1,4		$w_3$	• Moderadamente maduro	> 0,7	0,7-1,4		$w_2$	• Maduro con subsuelo inmaduro	> 0,7	> 0,7	y/o >1,0	$w_1$	• Maduro con subsuelo maduro	> 0,7	< 0,7	<1,0	$w_0$
Nivel de madurez	Profundidad (cm)																												
	0-20	20-50/60	50/60-80/100																										
• Inmaduro	> 0,7	> 1,4		$w_3$																									
• Moderadamente maduro	> 0,7	0,7-1,4		$w_2$																									
• Maduro con subsuelo inmaduro	> 0,7	> 0,7	y/o >1,0	$w_1$																									
• Maduro con subsuelo maduro	> 0,7	< 0,7	<1,0	$w_0$																									

**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:	<b>Ml-a<sub>3</sub>s<sub>4</sub>n<sub>3</sub></b>
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 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 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,

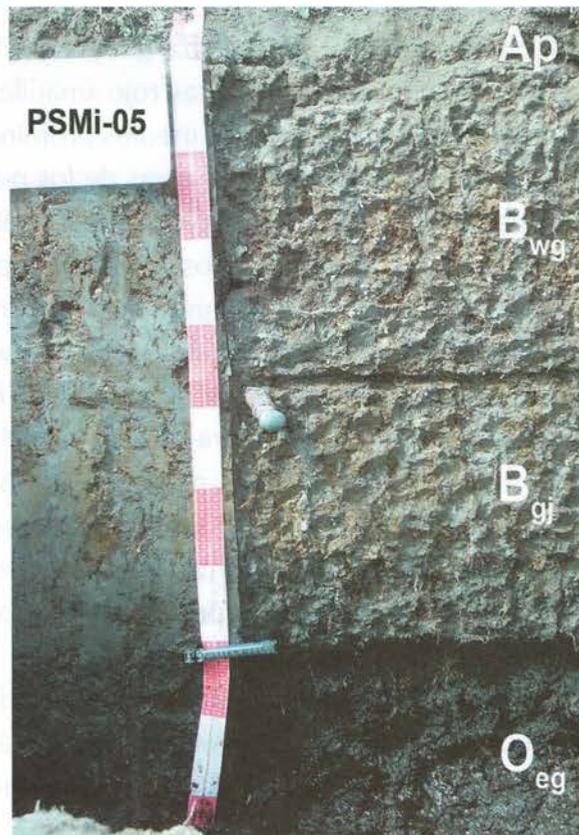
---

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  $H_2O_2$ , 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  $H_2O_2$  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 interstratificados. 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).

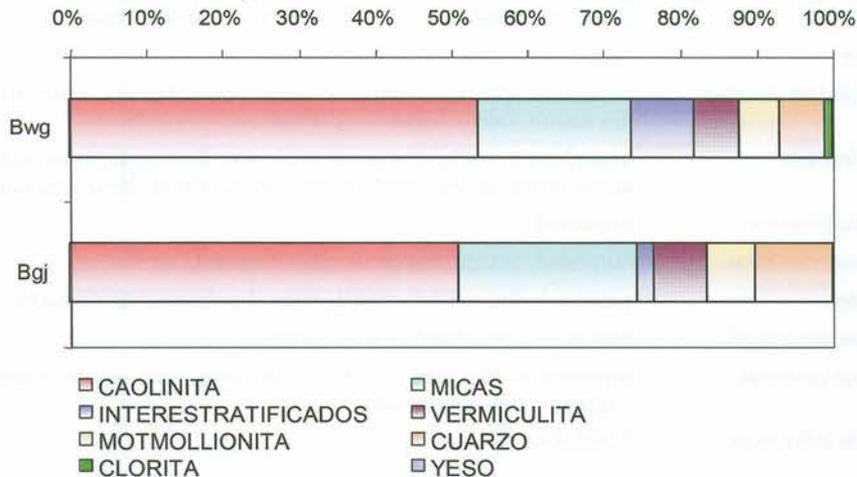
**Fuente:** Gissat (2006).

**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 <sup>3</sup>	% Ar	% MO	Valor n	<sup>2</sup> Eh mV	<sup>3</sup> pH	Al <sup>3+</sup> Cmol+ Kg <sup>-1</sup>	Fe mg. Kg <sup>-1</sup>	CE dSm <sup>-1</sup>	PSI %	% SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> soluble	% S total	<sup>4</sup> 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

<sup>1</sup>Valor n: grado de madurez del suelo (>0,7 suelo inmaduro, subsidencia;<0,7 suelo maduro).<sup>2</sup>Eh (potencial redox) medido en campo. <sup>3</sup>pH (suelo: agua 1:1).<sup>4</sup>AIC 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 Al<sup>3+</sup> 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:	<b>DU-a<sub>2</sub>s<sub>4</sub>n<sub>3</sub></b>
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,

---

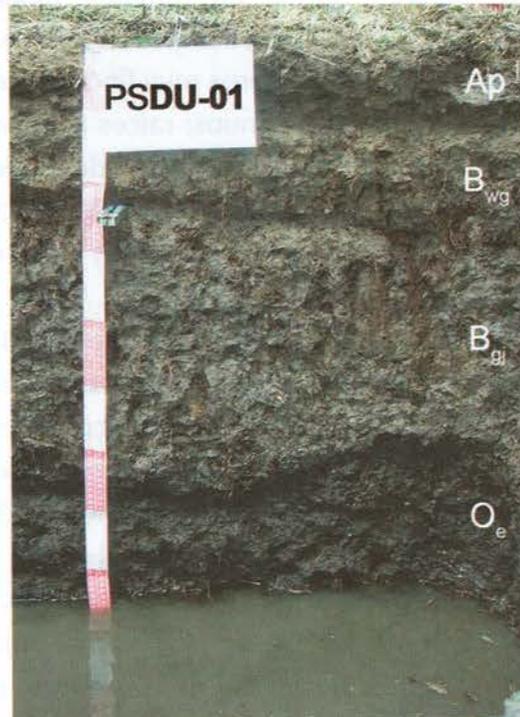
ligeramente plástica y pegajosa; resistencia a la ruptura, firme, semideformable, ligeramente fluida; abundantes poros finos, tubulares; raíces vivas, pocas, irregulares, superficiales; pH 3,9, Eh + 366mV, reacción fuerte al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y negativa al HCl y al NaF; no salino; límite gradual, 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<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 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-jarosita, 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).

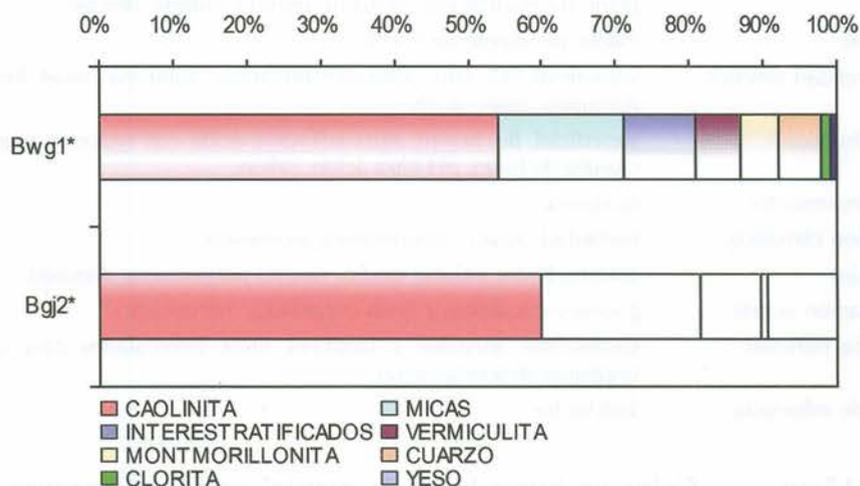
**Tabla 3.3** Características físicoquímicas de *Typic Sulfaquepts* familia muy fina sobre orgánica, caolinitica, semiactiva, isomésica (fase superficial).

Horizonte espesor (cm)	Da g cm <sup>3</sup>	% Ar	% MO	Valor <sup>1</sup> n	<sup>2</sup> Eh mV	<sup>3</sup> pH	Al <sup>3+</sup> Cmol+ Kg <sup>-1</sup>	Fe mg. kg <sup>-1</sup>	CE dS. m <sup>-1</sup>	PSI %	% SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> soluble	% S Total	<sup>4</sup> 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

<sup>1</sup>Valor n: grado de madurez del suelo (>0,7 suelo inmaduro, subsidencia;<0,7 suelo maduro).<sup>2</sup>Eh (potencial redox) medido en campo. <sup>3</sup>pH (suelo: agua 1:1). <sup>4</sup>AIC 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 Ojy, 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 <sub>1</sub> s <sub>2</sub> n <sub>2</sub>
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.

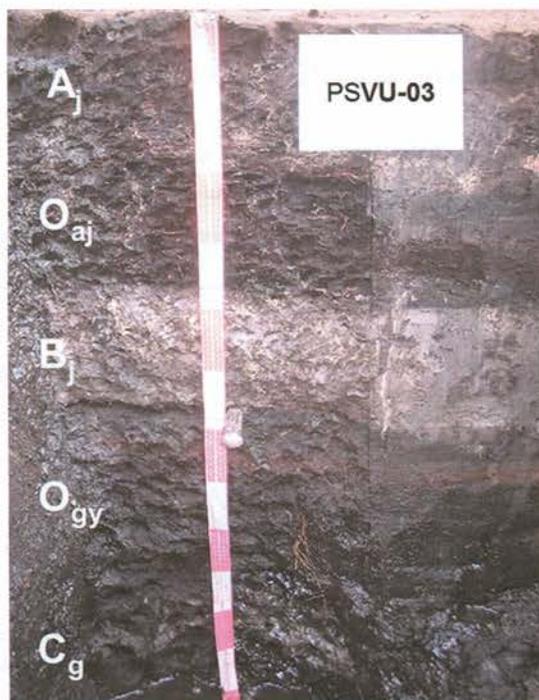
**Bj 35-60 cm.** Color en húmedo de la matriz, gris oscuro (10 YR 4/1), con moteados negros (10 YR 2/1) claros, pocos prominentes en masas irregulares medias a gruesas, localizados en la matriz; características redoximórficas de color amarillo (2,5 Y 8/6) de n-jarosita, claros, abundantes medios a finos 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 <sup>3</sup>	% MO	Valor <sup>1</sup> n	<sup>2</sup> Eh mV	<sup>3</sup> pH	Al <sup>3+</sup> Cmol+ Kg <sup>-1</sup>	Fe mg. Kg <sup>-1</sup>	CE dS. m-1	PSI %	% SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> soluble	% S Total
Aj 0-15	0,9	29,0	0,5	346	3,2	11,3	386	2,10	1.62	0,09	0,71
Oaj 15-35	0,7	53,0	0,60	389	3,00	12,4	224	3,40	4,05	0,17	1,2
Bj 35-60	1,17	9,2	0,7	493	3,3	13,2	456	3,40	8.43	0,18	1,6
Ogy 60-100	0,45	45,0	1,5	-162	6,5	5,3	130	8,10	8.60	0,21	2,1
Cg 100-125	1,4	5,5	1,3	-185	7,1	17,3	700	10,4	10,2	0,5	2,1

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

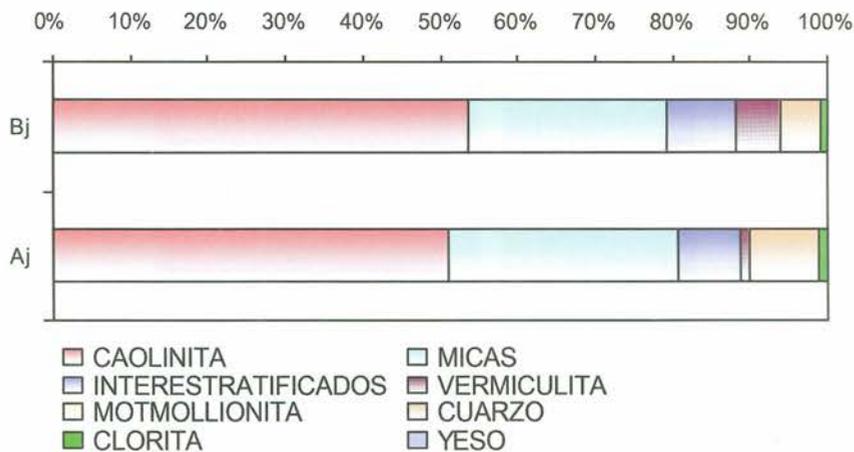
<sup>2</sup>Eh (potencial redox) medido en campo. <sup>3</sup>pH (suelo: agua 1:1). PSI (saturación de Na).

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<sub>j</sub>, como en el horizonte superficial A<sub>j</sub> (Figura 3.8).



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

Fuente: Gissat (2006).

**3.3.4 Typic Sulfohemists, familia ferrihúmica, dísica, isomésica, 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 Al<sup>3+</sup> 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 <sub>1</sub> s <sub>3</sub> n <sub>2</sub> .
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 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, no salino, límite claro, continuo.

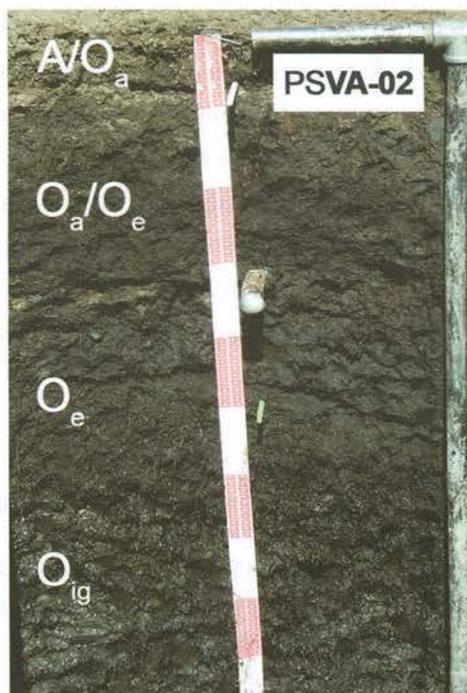
**Oa/Oe 10-37cm.** Color en húmedo de la matriz, negro (2,5 YR 2,5/1), con características redoximórficas de color rojo muy oscuro (2,5 YR 2,5/3), pocos, difusos entre peds, tenuemente visibles en masas irregulares a dendríticos, distribuido entre las caras de los peds y recubriendo los canalículos de 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 esmécicas (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 <sup>-3</sup>	% MO	Valor <sup>1</sup> n	<sup>2</sup> Eh mV	<sup>3</sup> pH	Al <sup>3+</sup> Cmol*Kg <sup>-1</sup>	Fe mg kg <sup>-1</sup>	CE dS m <sup>-1</sup>	PSI %	% SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 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

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

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

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

**Fuente:** Gissat (2006).

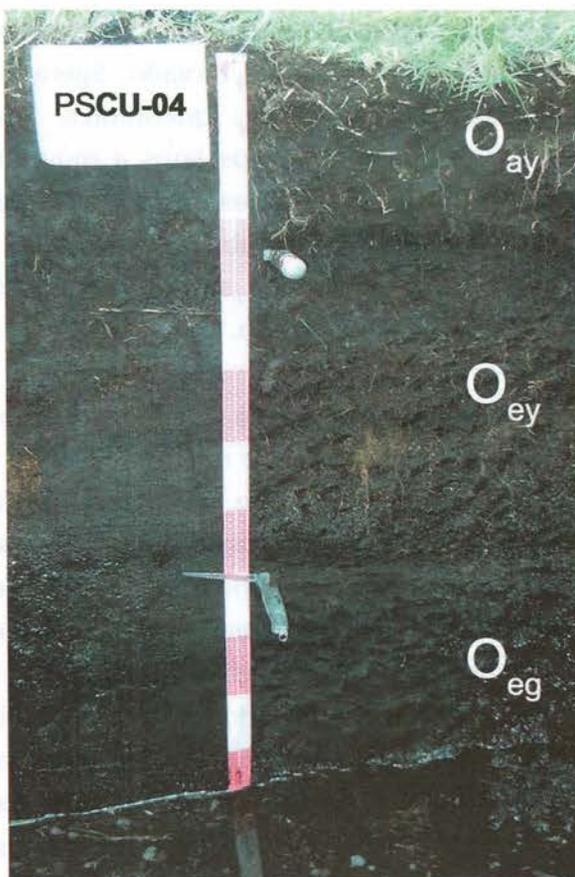
**3.3.5 Typic Sulfihemists, familia díscica, isomésica, (fase moderadamente profunda, salino-sódica).** Este suelo se clasificó como un SSA potencial, debido a la presencia de materiales sulfúricos. El pH tomado después de un periodo de incubación del suelo de ocho semanas, fue menor a 4,0 en todos los 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 <sub>3</sub> s <sub>2</sub> n <sub>3</sub> (fase moderadamente profunda), CU-a <sub>3</sub> s <sub>1</sub> n <sub>2</sub> (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 sulfúricos.
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 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; 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 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; 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 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; 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 <sup>-3</sup>	% Ar	% MO	Valor <sup>1</sup> n	<sup>2</sup> Eh mV	<sup>3</sup> pH	<sup>4</sup> pHi	Al <sup>3+</sup> Cmol+ kg <sup>-1</sup>	Fe mg kg <sup>-1</sup>	CE dS m <sup>-1</sup>	PSI %	% SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 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

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

<sup>2</sup>Eh (potencial redox) medido en campo. <sup>3</sup>pH (suelo: agua 1:1). <sup>4</sup>pHi: 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  $\text{gcm}^{-3}$ . 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  $\text{gcm}^{-3}$  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 <sup>-3</sup> )	Dr (gcm <sup>-3</sup> )	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

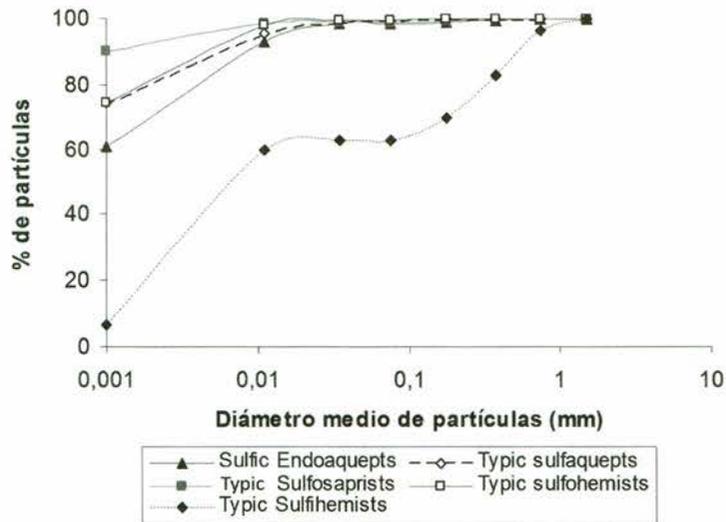
---

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).

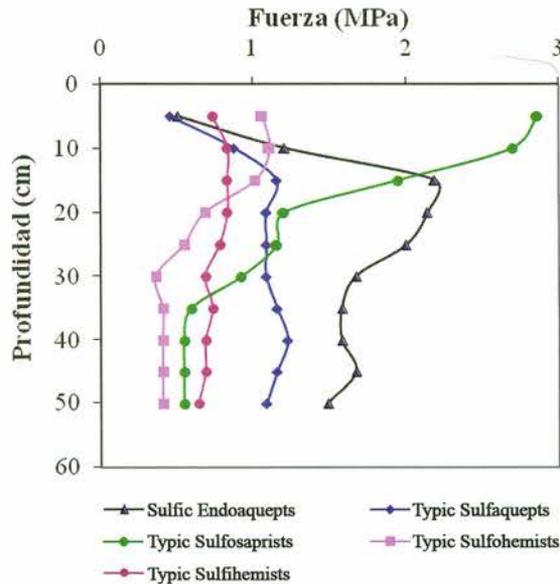


Figura 3.13 Resistencia a la penetración en SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

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 <sup>3</sup> )	% 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 <sup>-3</sup> )	% 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.

# CAPÍTULO 4

---

## **GÉNESIS Y EVOLUCIÓN DE LOS SUELOS SULFATADOS ÁCIDOS DEL VALLE ALTO DEL RÍO CHICAMOCHA**



---

## 4. GÉNESIS Y EVOLUCIÓN DE LOS SUELOS SULFATADOS ÁCIDOS DEL VALLE ALTO DEL RÍO CHICAMOCHA

La génesis y la evolución de los SSA está directamente relacionada con el conocimiento de los factores y procesos bioquímicos que han llevado a su formación. El Soil Survey Staff (2010) contempla de forma precisa las diferencias que en su origen tienen los SSA, respecto a los suelos minerales u orgánicos convencionales.

El carácter atípico de estos suelos hace muy específico y complejo el entendimiento de su dinámica bioquímica asociada con elementos como S, Fe, Al, cuyos niveles de concentración generan un cuadro de acidez y salinidad que impacta en diferente grado el suelo, la calidad química y biológica del agua y el entorno.

La definición de los factores y procesos de formación de SSA se hizo a partir de estudios detallados, donde se reunió la experiencia de la caracterización en campo y las evaluaciones cuantitativas compiladas en el levantamiento de suelos realizado en el área de estudio; lo anterior complementado con lo descrito por Pons *et al.* (1982), Lines y Sammut (1999), Rosicky *et al.* (2002) y Dent (1986), para la caracterización e identificación de SSA tropicales continentales y costeros.

Los SSA del valle alto del río Chicamocha presentan características particulares en su formación, como el origen lacustre de la mayoría de sus componentes, la incidencia directa del flujo continuo de aguas ricas en sulfatos que se derivan de formaciones geológicas circundantes, nacimientos hidrotermales y procesos bioquímicos fuertes de sulfatación, como resultado de las adecuaciones de riego y drenaje realizados en los últimos 60 años. Esporádicamente se encuentra esta situación en suelos

---

continentales del mundo, ya que generalmente se forman bajo condiciones marinas (Pons et al., 1982; Dent & Dawson, 2000). Ejemplos de la formación de SSA continentales son los suelos piríticos turbosos de papiro en Uganda (Chuxia, 2012); arenas piríticas en algunos valles del este de Holanda (Poelman, 1973) y suelos turbosos piríticos en Minnesota (Pons et al., 1982).

#### **4.1 FACTORES QUE HAN INDUCIDO LA FORMACIÓN DE SUELOS SULFATADOS ÁCIDOS**

Existen factores comunes en la formación de los suelos relacionados con el paisaje, el material parental, el tiempo de evolución, el clima y la actividad de organismos o antrópica, lo que hace pensar que para los SSA lacustres del trópico y del valle alto del río Chicamocha no hay excepción, y es así como se reconocen cinco condiciones que permiten identificar factores de formación en este tipo de suelos:

- Fisiografía de áreas planas con drenaje deficiente y susceptibilidad de inundación.
- Acumulación de materiales orgánicos con depositación de sedimentos minerales ricos en hierro y aluminio.
- Flujos internos continuos de aguas ricas en sulfatos.
- Presencia de bacterias reductoras y oxidantes de azufre y hierro.
- Prácticas de aireación por efecto de drenaje artificial.

**4.1.1 Fisiografía de áreas planas con drenaje deficiente y susceptibilidad de inundación.** El conocimiento detallado de la fisiografía es clave en el entendimiento de la génesis de SSA, más aún cuando en un mismo paisaje de planicie existe alta variabilidad en las formas de terreno. La mayoría de suelos sulfatados ácidos (SSA) continentales se presentan sobre terrenos planos de origen aluvial o lacustre de depositación de materiales (pantanos, ciénagas, áreas lacustres mal drenadas, terrazas bajas, cubetas o basines). Estas áreas son zonas de captación mal drenadas, las cuales favorecen la depositación de materiales orgánicos, minerales y acumulación de sales sulfatadas (Dent, 1986).

La ubicación de suelos en áreas planas y pantanosas constituye una característica geomorfológica típica que propicia la formación de SSA, de esta forma se favorece en el tiempo la acumulación de materiales sulfídicos y la posterior aparición de horizontes diagnósticos sulfúricos (Rosicky et al., 2004).

La planicie donde se ubica el valle alto del río Chicamocha es el resultado de un proceso de relleno fluvio-lacustre desarrollado dentro de una cuenca con flujo restringido en su salida natural (Belencito) por barreras estructurales de origen tectónico (HIMAT, 1985). Lo anterior limita notoriamente su drenaje natural y facilita encharcamientos periódicos que imprimen características edafológicas y morfogenéticas variadas.

Desde el punto de vista longitudinal, el cauce del río Chicamocha presenta un gradiente muy baja  $0,5 \text{ mkm}^{-1}$  en el sector de Sochagota y Nobsa. Los datos disponibles de descarga (DRACH, 2006) permiten deducir que el nivel promedio del río se encuentra, la mayor parte del año, por encima del área de cubetas, razón por la cual estas zonas son más susceptibles a encharcamiento (DRACH, 2009). En este paisaje se ubican los SSA, que se distribuyen en un plano de inundación con formas de terreno de cubetas o basines (Figura 4.1). Es frecuente encontrar en el valle alto del Chicamocha, asociados a estas formas de terreno, suelos de composición turbosa subsuperficial a superficial con acumulación salina.



**Figura 4.1** Paisaje de planicie fluvio-lacustre del valle alto del río Chicamocha: nótese la presencia de áreas pantanosas y escaldadas. Sector Ayaldas, Duitama-San Rafael.

**Fuente:** Gissat (2006).

En la planicie fluvio-lacustre del valle alto del río Chicamocha se diferencian dos formas de relieve, la **cubeta superior** (plano-convexa) y la **cubeta inferior** (plano-cóncava). Estas formas se caracterizan por la susceptibilidad de encharcamiento y determinan la secuencia evolutiva de los SSA de estudio (figuras 4.2 y 4.3). Los suelos de la cubeta superior presentan un horizonte superior espeso (>50 cm) de carácter mineral, procedente de coluvios sobre horizontes orgánicos de carácter sulfúrico en diferentes estados de madurez, y los suelos de la cubeta inferior un horizonte superior superficial a muy superficial, espesor 10-20 cm, de carácter organomineral, procedente de coluvios sobre horizontes orgánicos inmaduros. El mayor espesor de los materiales coluvio-aluviales hace que se privilegie el uso de la tierra agrícola en el paisaje de cubeta superior (Figura 4.2), por cuanto las raíces se alejan del contacto con horizontes sulfúricos o materiales sulfídicos, generalmente con niveles freáticos fluctuantes extremadamente ácidos y salinos.



**Figura 4.2** Suelos *Sulfic Endoaquepts* en paisajes de cubeta superior: presentan materiales coluvio-aluviales finos que conforman horizontes superficiales espesos (der.), los cuales facilitan el establecimiento comercial de cultivos de cebolla de bulbo (izq.). Sector Tibasosa-Ministerio-Monquirá.

**Fuente:** Gissat (2006).

Los suelos de la cubeta inferior se ubican en la parte más baja del valle, con pendientes menores al 1 % y corresponden a SSA de origen orgánico (*Typic sulfosaprist* y *Typic sulfohemist*) con horizontes sulfúricos superficiales a muy superficiales que conllevan a la formación de áreas escaldadas (Figura 4.3 izq.). Dependiendo de la estacionalidad climática, los suelos habilitados

agrícolamente en el paisaje de cubeta inferior pueden verse afectados por inundación o encharcamiento en temporada de invierno (Figura 4.3 der.). Esta problemática suele ocurrir en áreas localizadas al suroeste del lago Sochagota, entre el canal de Ayalas y la zona montañosa situada en el oriente de la zona plana entre Duitama y la loma de Peña Negra; en el valle, a cada lado del canal del Cuche; terrenos en ambos lados del canal principal de drenaje en las unidades de riego Ministerio y Tibasosa; y los terrenos adyacentes al canal Transval en el sector de Vueltas. La primera y última mencionadas presentan características superficiales de contaminación salina por el alto contenido de sales del agua freática.

Si no fuera por la actividad antrópica de la canalización y drenaje del valle, muchos sectores de SSA actuales, como Cuche, Vargas, Ayalas, Transval, que se encuentran en estas formas de terreno, permanecerían como zonas pantanosas y no como SSAA.



**Figura 4.3** Paisaje de SSA actuales de origen orgánico (cubeta inferior) mostrando áreas escaldadas (izq.). Encharcamiento de suelos de la cubeta inferior afectando áreas agrícolas en temporada de invierno (sector Cuche).

**Fuente:** Gissat (2006).

**4.1.2 Acumulación de materiales orgánicos y deposición de sedimentos minerales de hierro y aluminio.** De lo más reciente a lo más antiguo del Holoceno (último periodo del Cuaternario-10000 años), la acumulación e identificación del tipo de materiales que colmatan la planicie fluvio-lacustre del valle alto del río Chicamocha, tiene, según Berrio *et al.* (2004), tres fases bien definidas:

- 
- Deposición del material coluvio aluvial proveniente de las lomas o colinas que circundan el valle, la cual identifica las posiciones más altas en el valle con pendientes suaves y estratificación irregular de materiales minerales gruesos y finos (Cuaternario más reciente).
  - Deposición de los sedimentos de los ríos, principalmente del Chicamocha, con estratificaciones alternas de arena, limo y arcilla (Cuaternario propiamente aluvial).
  - Sedimentos lacustres de materiales orgánicos de vegetación acuática y semiacuática (Cuaternario piso de sabana más antiguo).

**Acumulación de materiales orgánicos.** A partir del registro sedimentológico y palinológico de áreas pantanosas en la cuenca interandina de Duitama (Berrío et al., 2004), se deduce que los sedimentos de áreas pantanosas pertenecen al Holoceno desde hace 8000 años AP. Los sedimentos de profundidad son de carácter turboso y de materiales orgánicos constituidos por especies del género *Plantago* (formador de turba), *Agnus* y *Myrica*, que se alternaron de acuerdo con los niveles del lago y a la variación de condiciones climáticas secas y húmedas.

Este estudio revela también que la presencia de fenómenos de erosión entre 3680 y 2610 años AP en la cuenca, significó un incremento de sedimentos coluvio-aluviales, que cambió las condiciones lacustres a pantanosas, lo que explica la estratificación alternada de materiales orgánicos y minerales; bajo estas condiciones dominaron los juncos que actualmente se ven en algunos sectores como Cuche, Vargas y Ayalas (Figura 1.2).

La cubeta es una forma de terreno de tipo depresional que facilitó la acumulación de materiales orgánicos y minerales en medios húmedos. En todos los suelos muestreados en el área del DRACH se encontraron horizontes orgánicos de carácter sulfúrico o sulfídico a diferente profundidad, mayormente en estados hémicos-sápricos (Figura 4.4 izq.) y, en menor proporción, estados fíbricos a profundidad mayor, confinados a aguas freáticas ricas en sulfatos y hierro (Figura 4.4 der.).

Los contenidos de materia orgánica de los sedimentos recientes depositados en áreas continentales del trópico cálido generalmente son bajos (1-2 %),

como sucede en SSA del valle del Sinú (Combatt et al., 2004), pero pueden ser altos en áreas fluvio-lacustres del trópico alto andino, como ocurre en el valle alto del río Chicamocha, donde los contenidos de materia orgánica pueden presentar valores de 20 a 60 %, con mayor acumulación en suelos orgánicos potenciales *Typic Sulfihemists* y menor en SSA actuales orgánicos *Typic Sulfohemists*. La acumulación creciente de sedimentos orgánicos favorece aún más la formación de sulfuros metálicos (Lamontagne et al., 2004).



**Figura 4.4** Materiales orgánicos en SSA: estados hémico-sápricos en *Typic sulfohemist* (izq.); material turboso y fibrico en *Typic sulfihemist*, donde se identifican tallos y raíces de vegetación constitutiva de áreas lacustres (der.).

**Fuente:** Gissat (2006).

De acuerdo con Pons y Breemen (1982), cuando la vegetación de pantano es escasa, la acumulación de carbono orgánico se limita, lo cual disminuye la formación de sulfuros de hierro del medio. Este fenómeno se debe a que las bacterias reductoras (desulfobrio) necesitan la materia orgánica como energía para reducir las formas de azufre oxidable en medios anegados (Dent, 1986; Brock et al., 1987).

***Deposición de sedimentos ricos en hierro y aluminio.*** Este factor hace referencia a materiales minerales provenientes de sedimentos circundantes al valle, que son fuente directa de hierro y aluminio, necesarios para la formación de sulfuros y sulfatos metálicos en medios redox (Pons et al., 1982; Lines & Sammut, 1999; Rosicky et al., 2002). Estos minerales generalmente se mezclan y colmatan los materiales orgánicos lacustres como ocurre en el valle alto del río Chicamocha (Berrío et al., 2004).

---

Las formaciones geológicas, la mineralogía de los sedimentos coluvio-aluviales y su relación con horizontes superficiales, facilitan el conocimiento del origen de los minerales de hierro y aluminio de los suelos investigados.

Los sedimentos minerales que tienen influencia directa en la formación de suelos con condiciones sulfatadas ácidas en el valle alto del río Chicamocha están relacionados con las siguientes formaciones geológicas:

- *Rocas ígneas extrusivas*: los cerros situados en el sur de la localidad Vargas, entre las quebradas Pan de Azúcar y Despensas, están compuestos por una roca ígnea extrusiva, andesita, que representa uno de los cuellos volcánicos en el área de donde surgen algunas fuentes termales ricas en minerales de azufre (HIMAT, 1985).
- *Formación Cuche*: bordeando el valle desde el norte hasta un poco más al sur de la loma de Punta Larga, a ambos lados del valle aflora una secuencia monótona de limolitas, micas y areniscas de grano fino, intercaladas con arcillolitas; el color predominante de estas rocas es rojizo, por efecto de los minerales de hierro tipo hematita, de estratificación delgada (40 cm) y frecuentemente con estratificación cruzada. Sus afloramientos se encuentran también en la carretera Duitama-Tibasosa, sector Vueltas, antes de llegar a la población. La secuencia se presenta generalmente muy fracturada y con intensos repliegues. Su edad es Carboniano (HIMAT, 1985). Esta formación incide sobre unidades de suelos cuyos componentes principales son los *Typic Sulfosaprists*, *Typic Sulfohemists* y los *Typic Sulfihemists*.
- *Formación Tibasosa*: se encuentra extendida en la mitad oriental de los límites que enmarcan el área de estudio. Sus componentes litológicos pueden observarse en toda la vertiente derecha del valle, desde el canal de Ayalas, pasando por la loma Peña Negra en Tibasosa, hasta la loma Piedras Negras. Sobre la vertiente izquierda también aflora y pasa por los sectores de Monquirá y Ministerio, donde se ubican las unidades de suelos *Typic Sulfihemist* y *Sulfic Endoaquepts*. Esta formación está integrada en su parte basal por areniscas conglomeráticas y areniscas cuarzosas con intercalaciones de limolita morada y verde, y en su parte

---

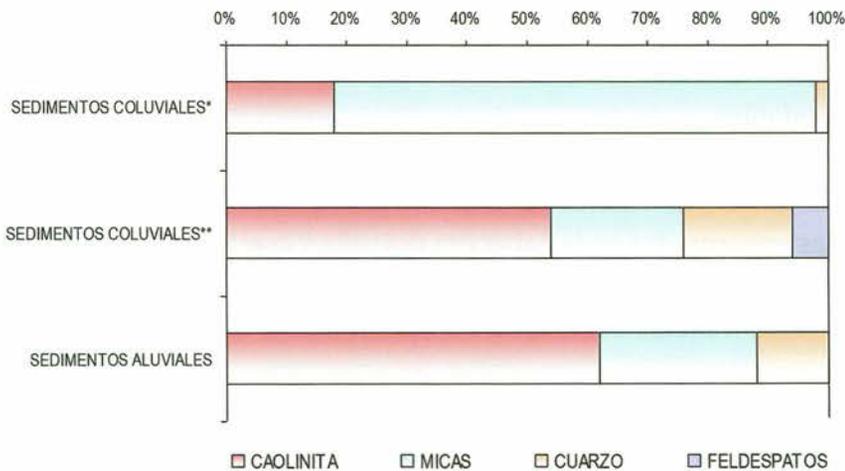
superior por sales con intercalaciones de caliza arenosa y areniscas, lo cual explicaría los procesos de autoneutralización de los suelos circundantes.

***Relación de los sedimentos coluvio-aluviales con la formación de SSA.*** Las andesitas encontradas en la cabecera del valle y que aparecen relacionadas con nacimientos halohidrotermales explican la influencia de sales sulfatadas y de posibles minerales de hierro de origen ígneo.

La fracción mineral de los SSA proviene de la mezcla de materiales coluvio-aluviales que colmataron los sedimentos lacustres. Los materiales coluviales de la Formación Cucho y Tibasosa son los que más influencia tienen en la constitución de los horizontes superficiales de los SSA de estudio. Al realizar la cuantificación de los minerales en la fracción arena se constató que gran parte de los granos heterométricos de cuarzo presenta pátina (capa discontinua de óxido de hierro) y también hematita en forma de nódulos de tamaño fino. Lo anterior supone una fuente adicional de minerales de Fe para la formación de SSA.

Al analizar la fracción mineral de horizontes superficiales (Ap, Aj) en SSA se observa que la fracción arcillosa proveniente de los materiales coluvio-aluviales es dominante en todos los perfiles de estudio a excepción de los *Typic Sulfihemists*, donde dominan la fracciones limosa y arenosa (Tabla 3.8).

Los materiales coluvio-aluviales provenientes de las formaciones circundantes coinciden con la presencia de caolinita, micas, cuarzo y, en menor grado, feldespatos (Figura 4.5) que por herencia han imprimido los minerales primarios, que al meteorizarse por efecto de procesos de sulfatación, pueden generar formas libres de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Al}^{3+}$  (Breemen, 1982). Además, se observa que los minerales de la fracción arcillosa que constituyen los sedimentos coluviales de la formación Cucho (sector Vueltas-Cucho) están dominados por las micas en un 80 % y en menor grado por caolinita (18 %).



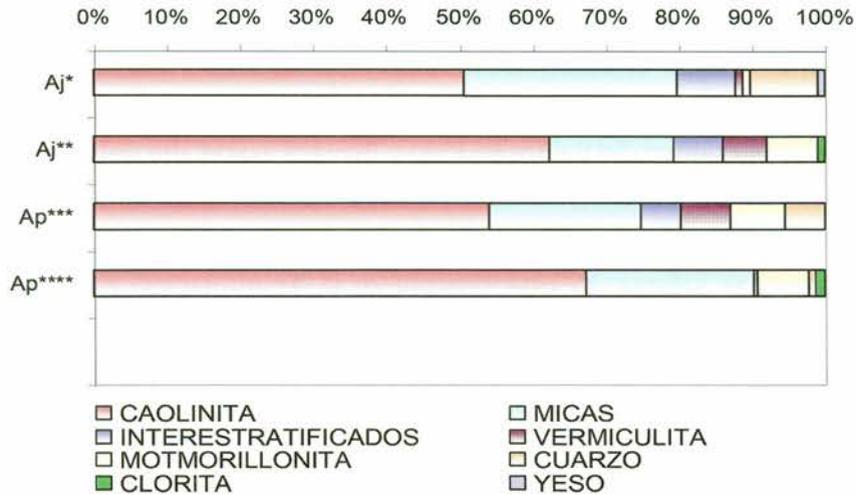
\*Sedimentos de suelos coluviales de la formación Cuche, \*\*Sedimentos basales de suelos coluviales de la formación Tibasosa.

**Figura 4.5** Representación semicuantitativa de la fracción mineral de los materiales aluviales y coluviales que inciden sobre características pedogenéticas de SSA en el valle alto del río Chicamocha.

**Fuente:** IGAC (2006).

Al comparar los minerales de sedimentos coluviales de la Figura 4.5 de la formación Cuche con horizontes superficiales que se encuentran en el área de influencia de SSA típicos (*Typic Sulfosaprists*, *Typic Sulfohemists*) (Figura 4.6), se observa que no coinciden los minerales originales del material coluvial con los minerales de horizontes superficiales donde la caolinita es el mineral dominante de la fracción fina (mayor a 50 %), seguido por las micas (Figura 4.6). Lo anterior supone procesos de neosíntesis y transformación fuerte de minerales heredados por efecto del ácido sulfúrico en medios sulfatados y la consecuente inestabilidad de las arcillas, fenómeno ampliamente explicado por Breemen (1982) y Frink (1972).

Caso contrario sucede con horizontes superficiales de los *Typic Sulfaquepts* y de los *Sulfic Endoaquepts* que coinciden con minerales heredados de caolinita y micas en similares proporciones que sedimentos aluviales y minerales coluviales de la formación Tibasosa. Este fenómeno se debe a que los horizontes superficiales son menos afectados por condiciones sulfatadas ácidas, debido a que los horizontes sulfúricos se encuentran a mayor profundidad y no en superficie como ocurre con horizontes Aj de los *Typic Sulfosaprists* y *Typic Sulfohemists*.



\* Typic Sulfosaprists, \*\* Typic Sulfohemists, \*\*\* Typic Sulfihemists, \*\*\*\*Typic Sulfaquepts.

**Figura 4.6** Representación semicuantitativa de la fracción mineral arcillosa (difracción de rayos X) de horizontes superficiales en SSA del valle alto del Chicamocha.

**Fuente:** IGAC (2006).

La composición de los materiales coluviales que se presenta en estos suelos comprueba la fuente de  $Al^{3+}$  y  $Fe^{2+}$  necesarios para su condición sulfatada ácida porque los minerales meteorizables de micas se pueden convertir en aluminatos y aluminosilicatos en forma de arcillas de tipo 1:1 o como minerales de oxihidróxidos de  $Fe^{2+}$  y  $Al^{3+}$  a medida que se incrementa la acidez en medios extremadamente ácidos (University of Montana, 2000).

Los minerales secundarios que se encuentran generalmente en SSA son autogénicos (formación *in situ*) de óxidos, hidróxidos, sulfatos, carbonatos y fosfatos de  $Fe^{2+}$  y  $Al^{3+}$  y arcillas de neoformación como caolinitas (Breemen, 1982). Estos se originan por las características del material parental (minerales primarios y orgánicos), el flujo interno de aguas enriquecidas en metales de azufre y la dinámica bioquímica como la formación de sulfuros metálicos (Pons et al., 1982; Fitzpatrick, 1996).

**4.1.3 Flujos internos continuos de aguas ricas en sulfatos.** El azufre, como elemento fundamental en la formación de SSA, se origina de sulfatos de mar, sedimentos antiguos y materiales biológicos en áreas costeras (Pons et al., 1982; Bloomfield & Coulter, 1973), pero en SSA continentales, como los del valle alto del río Chicamocha, se origina a partir de fuentes internas

---

azufradas provenientes de aguas halotermales y fuentes hídricas geológicas salinas, que drenan al valle. La alteración de sulfuros y la explotación de sales de sulfato de sodio aparecen como evidencia de esta afirmación en sectores de la cuenca del Salitre en Paipa, Boyacá, parte alta del valle (Castro & Gómez, 2004). Lo anterior crea un medio propicio de acumulación de sulfatos en suelos de la planicie lacustre por movimientos verticales de aguas freáticas salinas, lo que promueve la acumulación de materiales sulfídicos en las zonas depresionales y mal drenadas, proceso que facilita los fenómenos de sulfhidrización descrito ampliamente por Lamontagne *et al.* (2004), como primera etapa en la formación de SSA (Sección 4.2.2).

Es un hecho que las aguas subterráneas del valle presentan alta carga de sales sulfatadas, como lo demuestran los datos de pozos freáticos de observación, no solo en las áreas de reconocido aporte de fuentes salinas (Salitre, Sochagota), sino en otros sectores como Tibasosa, Nobsa y Sogamoso, lo que corrobora el supuesto del flujo subterráneo restringido por barreras estructurales que no permiten la renovación del agua, pero sí favorecen un incremento progresivo de la salinidad (Castro & Gómez, 2004).

Las manifestaciones de aguas termales alcanzan la superficie a través de sistemas de fracturas (falla Salitre) procedentes de focos de actividad hidrotermal. Están relacionadas muy probablemente con cuerpos intrusivos del área de Olitas (quebradas Pan de Azúcar y Despensas) (HIMAT, 1985). La ubicación de las aguas termales en la cabecera del valle, afecta directamente el flujo interno de aguas freáticas de la planicie favoreciendo la acumulación de sulfuros y las condiciones de sulfatación en los suelos.

La caracterización de aguas freáticas de los cinco perfiles modales de SSA estudiados, evidencia alta carga de sulfatos (Tabla 4.1), siendo este un componente importante de la pedogénesis y dinámica de condiciones sulfatadas ácidas de suelos del valle alto del Chicamocha. Esta fuente continúa de sulfatos se convierte en un factor de formación de SSA, aspecto que ha sido descrito en otros ambientes por Pons *et al.* (1982), Lines y Sammut (1999), Rosicky *et al.* (2002) y Poelman (1973).

**Tabla 4.1** Caracterización de aguas freáticas en SSA. Distrito de Riego Alto Chicamocha.

Perfil <sup>1</sup> modal	pH	CE dS m <sup>-1</sup>	<sup>2</sup> RS	RAS	<sup>3</sup> CLASE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Si <sup>4+</sup>
						meq L <sup>-1</sup>				mg L <sup>-1</sup>			meq L <sup>-1</sup>	
Typic Sulfaquepts	3,4	5,74	0,06	4,0	C4S1	24,3	11,3	0,37	17,1	195,3	75,6	3686	5	5
Typic Sulfohemists	3,3	3,11	0,00	0,6	C4S1	6,5	1,5	0,2	1,2	172,9	242	2822	0,1	7,5
Typic Sulfosaprists	3,4	7,76	0,09	8,8	C4S1	22,3	19	1,1	39,8	182,2	61,2	5664	11,3	7,5
Typic Sulfihemists	4,8	14,02	0,37	22,1	C4S3	24	29,1	4,8	114	10,62	11,7	5808	45,7	1
Sulfic Endoaquepts	5,1	4,71	0,23	19,2	C4S3	4,8	2,6	1,1	37	61,32	1,17	2073	10,1	1,8

<sup>1</sup>Profundidad de toma de la muestra 1,2m. <sup>2</sup>RS: relación (Cl/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), <sup>3</sup>calidad de agua según normas Riverside Salinity Laboratory.

Fuente: Gissat, 2006.

A continuación se discuten los resultados sobre indicadores químicos de aguas freáticas que identifican SSA:

**Medida de la Acidez en agua (pH):** si el pH del agua muestreada a nivel del suelo se encuentra entre 3,5 y 4,5, existe una probabilidad media de estar bajo SSA actuales. Pero si el pH del agua de drenaje es menor a 3,5, el medio está asociado directamente con SSA maduros oxidados (actuales) en contacto directo con horizontes sulfúricos. En la Tabla 4.1 se presentan aguas freáticas ultraácidas (<3,5), criterio que refleja la formación de SSA actuales con restricciones severas para uso agrícola. También se observa que los pH de aguas freáticas en contacto con materiales sulfúricos (*Typic Sulfihemists* y *Sulfic Endoaquepts*) son ligeramente ácidos, debido a la condición de reducción del sistema y a la capacidad de autoneutralización.

Los fenómenos de reducción y acumulación de sulfuros se comprueban en los pozos freaticométricos del DRACH, donde, a una profundidad mayor a 4 m de la superficie, se aumentan las concentraciones de azufre(S) con pH cercanos a 8,0, bajo condiciones anaeróbicas (Castro & Gómez, 2004).

**Medida de la salinidad en agua:** con CE>2dSm<sup>-1</sup> se debe tener en cuenta la relación entre aniones Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; valores entre 4-6, el agua tiene una afectación media de sulfatos, y una relación menor a 4 tiene propiedades de efluentes con características sulfatadas. Como referente la relación Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en agua de mar es de 7.

---

Las aguas freáticas muestreadas de los perfiles modales son salinas y presentan una relación  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  menor a 1 en todos los casos, lo que demuestra la existencia de una alta carga de sales solubles sulfatadas (Tabla 4.1). De otra parte, valores mayores a  $1500 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $>30 \text{ meq L}^{-1}$ ) en agua, se consideran provenientes de SSA; al comparar este referente con las concentraciones de sulfatos de las aguas estudiadas, se encuentra que en todos los casos este nivel fue superado. La oxidación de sulfuros a sulfatos hace que este anión domine sobre el  $\text{Cl}^-$  con una relación estrecha y menor a 1. En medios sulfatados con bajas concentraciones de  $\text{Cl}^-$  hay mayor proliferación de bacterias oxidantes de azufre (Brock et al., 1987).

Para la zona de estudio se considera que el agua de baja salinidad ( $<0,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) tiene poca afectación de sulfatos  $\text{SO}_4^{2-}$ , y valores mayores a  $500 \text{ mg L}^{-1}$  de sulfatos  $\text{SO}_4^{2-}$  corresponden a aguas provenientes de SSA (Gissat, 2006).

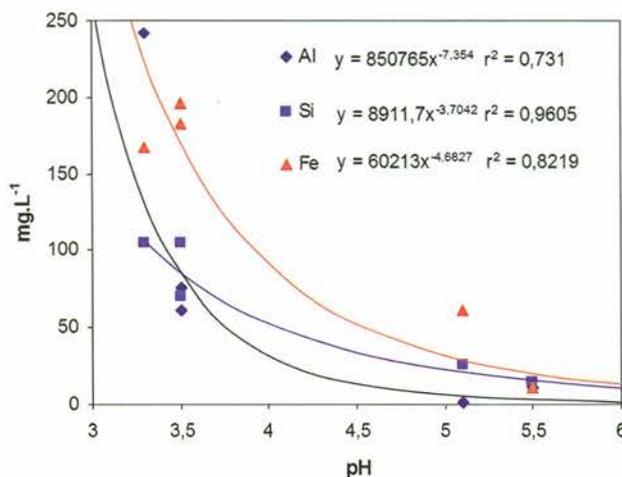
**Medida del aluminio y silicio:** niveles entre  $1$  a  $5 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$  determinan una tendencia sulfatada ácida, valores mayores a  $5 \text{ mg L}^{-1}$  indican que las aguas de drenaje provienen de SSA (Dent y Dawson, 2000). Estos elementos constituyen una característica de evaluación muy importante; en este sentido se observan altas concentraciones de aluminio soluble mayores a  $10 \text{ mg L}^{-1}$ , lo cual se relaciona con SSA actuales (*Typic Sulfaquepts*, *Typic Sulfosaprists* y *Typic Sulfohemists*), pH menores  $3,5$  (Tabla 4.1, Figura 4.7) y formación de sales de sulfato de aluminio (Tabla 4.7). Las mayores concentraciones de aluminio se observan en campo con una apariencia traslúcida en sus aguas, característica propias de aguas ricas en aluminio (Dent & Dawson, 2000).

Breemen (1982) demostró que el  $\text{Al}^{3+}$  soluble con valores de pH menores a  $4,5$ , incrementa notoriamente hasta diez veces su concentración cuando el pH cae a rangos menores a  $3,5$ . Esta tendencia se observa en la Figura 4.7, para el aluminio soluble en aguas freáticas sulfatadas ácidas, donde la concentración de  $10 \text{ mg L}^{-1}$  en un pH de  $4,5$  aumentó diez veces a valores mayores a  $100 \text{ mg L}^{-1}$  cuando el pH decrece por debajo de  $3,5$ .

La severa acidez que ocurre en suelos sulfatados ácidos acelera los procesos de alteración de aluminosilicatos e incrementa la solubilidad, tanto del

aluminio, como del silicio (Dent, 1986; Breemen, 1982). Este fenómeno se comprueba con las mayores concentraciones de Si soluble que ocurre en aguas freáticas y de drenaje de los SSA actuales más oxidados de estudio (*Typic Sulfohemists*, *Typic Sulfosaprists* y los *Typic Sulfaquepts*) con niveles de silicio mayores a 5 meq L<sup>-1</sup> a pH menores a 3,5 (Tabla 4.1, Figura 4.7), lo cual coincide con horizontes diagnósticos fuertemente alterados en su componente mineral y la presencia de silicio libre.

Las altas concentraciones de Al<sup>3+</sup> en el agua de drenaje constituyen uno de los principales riesgos de SSA por su efecto tóxico al medio, por la contaminación de otras fuentes potables o de uso agrícola (Hicks et al., 2002), donde el flujo de Al<sup>3+</sup> depende del grado de oxidación actual del SSA. Las menores concentraciones de Al<sup>3+</sup> se encontraron en los *Typic Sulfihemists* y *Sulfic Endoaquepts*, suelos con menos impacto en los procesos de sulfatación. En campo, estos suelos presentan condiciones favorables para el establecimiento de cultivos tolerantes, dado que las concentraciones de Al soluble son cercanas a 1 mg L<sup>-1</sup>.



**Figura 4.7** Relación entre el pH y la variación del aluminio, hierro y silicio solubles (mg L<sup>-1</sup>) en aguas freáticas sulfatadas ácidas del valle alto del río Chicamocha.

Fuente: Gómez (2006).

**Medida del hierro en agua.** El rango de Fe soluble en aguas varía entre 10 y 50 mg L<sup>-1</sup>. Según Dent y Dawson (2000), el drenaje rico en hierro es una característica que está relacionada con procesos de alta oxidación en SSA, en este caso las aguas de drenaje generalmente presentan concentraciones

---

superiores a  $50 \text{ mg L}^{-1}$  de hierro soluble. En las aguas freáticas de estudio se registraron valores mayores a  $50 \text{ mg L}^{-1}$  hasta  $200 \text{ mg L}^{-1}$  (Tabla 4.1), lo que está relacionado con condiciones ultraácidas de SSA actuales.

Valores menores a  $50 \text{ mg L}^{-1}$  de Fe soluble se presentaron en aguas freáticas de SSA potenciales de los *Typic Sulfihemists*, debido a que los productos de oxidación de los materiales sulfídicos (sulfuros de hierro) son neutralizados por la formación de precipitados ocre de hidróxidos de hierro amorfo o de moteados amarillos a las orillas de los drenajes (Figura 4.8), como resultado de una gran neutralización del hierro soluble y acidez, que termina viéndose reflejado en una disminución importante de las formas solubles de este elemento, lo que ocurre a pH superiores a 4,5 (Hicks et al., 2002).



**Figura 4.8** Aguas freáticas y de drenaje de color ocre en *Typic Sulfihemists*: en los bordes de los drenajes se observan precipitados de formas férricas generalmente a pH mayores a 4,0.

**Fuente:** Gissat (2006).

**4.1.4 Bacterias óxido reductoras de azufre y hierro.** Las reacciones redox del azufre y del hierro por parte de microorganismos conforman un factor esencial en la formación de SSA. Las bacterias son acidófilas autótrofas que obtienen su energía de la oxidación de compuestos orgánicos e inorgánicos (litótrofas). La capacidad para crecer en suelos sulfatados ácidos es una propiedad de un grupo específico de microorganismos del género *Desulfovibrio* para medios reducidos y de *Acidithiobacillus* para medios oxidados (Blomfield, 1972).

---

**Bacterias reductoras en SSA.** El sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) es el primer producto en la reducción de azufre en medios anegados y orgánicos, este da la sensación de olor a huevo podrido cuando se perturban los sedimentos reducidos en áreas pantanosas (Dent, 1986).

La especie *Desulfovibrio desulfuricans* y bacterias del género *Desulfumacolum* han sido caracterizadas en ambientes sulfatados ácidos en medios anegados, inicialmente identificadas por Cambell y Postgate (1965), citados por Bloomfield y Coulter (1973). Estas bacterias son las responsables de la formación de sulfuros metálicos en condiciones anaerobias, tomando los electrones del sulfato y la energía de la materia orgánica.

Ambos géneros se presentan en suelos y aguas, son obligadas anaerobias, pero no se mueren por exposición al aire, solo se inactivan hasta que el medio sea anegado. Lo anterior explica la importancia de las fluctuaciones del nivel freático, estación climática, inundaciones y encharcamientos, para entender la dinámica bioquímica de los SSA.

Experimentaciones realizadas por Bloomfield (1972) en la reducción biológica de sulfatos, mostraron que el sulfato puede llegar a ser inestable con un potencial redox cercano a -150 mV y pH mayores a 5. Las bacterias reductoras de azufre se activan bajo estas condiciones en SSA.

La reducción biológica de sulfatos tiene una importancia práctica y es la causa de la precipitación de sulfuros metálicos, como la pirita, en suelos sulfatados ácidos potenciales, factor inicial en la formación de condiciones de SSA potenciales y de materiales sulfídicos; además, de la solubilidad del hierro ferroso en aguas de drenaje, con efecto tóxico para el medio biótico (Dent, 1986; Brock et al., 1987).

En los SSA del valle alto del Chicamocha, aún no han sido caracterizadas estas bacterias reductoras, pero las condiciones para su actividad pueden presentarse en materiales sulfídicos a una profundidad mayor a 1,5 m, donde se presenta una saturación continua de agua freática concentrada en sulfatos en medios reductores y alta presencia de materiales orgánicos en medios de reacción, cercana a la neutralidad.

---

**Bacterias oxidantes en SSA.** Las bacterias oxidantes de azufre y hierro se adaptan a suelos extremadamente ácidos, muchas de las formas que sobreviven a este medio tienen la capacidad de crecer en forma litotrófica empleando hierro ferroso (II) y S elemental como donador de electrones (Brock et al., 1987; Stanley, 1994).

Las bacterias reconocidas son especies de *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans*. Contienen bacilos Gram negativos, con flagelo polar, son capaces de derivar su energía de la oxidación del azufre elemental, sulfuros y tiosulfatos (Brock et al., 1987; Stanley, 1994). *A. ferrooxidans*, *A. thiooxidans*, son especies que toman el S y Fe principalmente de sedimentos minerales, pero en medios orgánicos se adaptan y pueden utilizar el azufre de la materia orgánica como medio de sustrato, especialmente *A. thiooxidans* (Brock et al., 1987; Ehrlich, 1990).

*A. ferrooxidans* es reconocida como la bacteria responsable de la oxidación del hierro y compuestos de sulfuros inorgánicos, es estrictamente autótrofa y obtiene el carbón por fijación atmosférica del dióxido de carbono (Stanley et al., 1994). Las bacterias correspondientes trabajan a una temperatura entre 15 y 30 °C, y a una humedad óptima cercana a capacidad de campo. Son tolerantes a altas concentraciones metálicas, pero iones de cloro restringen su actividad (Ehrlich, 1990).

*A. ferrooxidans* es generalmente asumida como aerobia obligada, pero en condiciones anaeróbicas puede crecer con azufre elemental utilizando iones férricos como aceptor de electrones; esto indica que la bacteria puede ser considerada como anaerobia facultativa en ciertos casos, y juega un papel importante en el ciclo del hierro y azufre en medios ácidos (Pronk et al., 1994).

Con la dinámica microbiológica de las bacterias oxidorreductoras de Fe y S, se establece un ciclo de transformación mediante la acción combinada de las bacterias quimioacidolitótrofas *Acidithiobacillus* y organismos que llevan a cabo la respiración anaeróbica como bacterias reductoras de azufre (SRB) *Desulfovibrio* y *Desulfotomaculum sp.*, lo que explica la supervivencia de estos microorganismos y la dinámica bioquímica en SSA (Jacq, 1972; Nguyen et al., 1993).

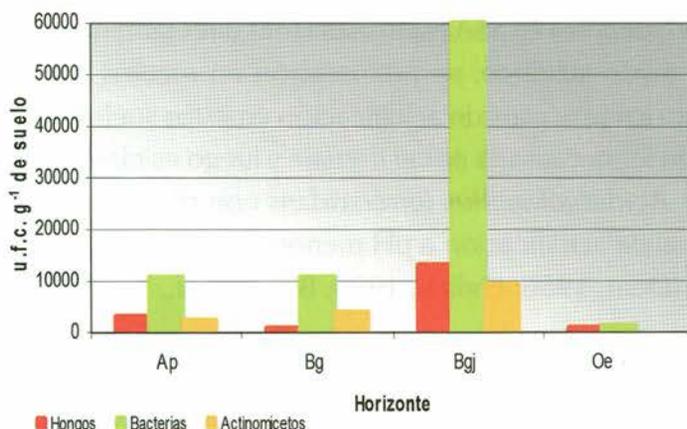
---

Las bacterias oxidantes en SSA están asociadas directamente a la producción excesiva de ácido sulfúrico, su proliferación en medios oxidados acelera drásticamente los procesos de acidificación en estos suelos. Inicialmente es una oxidación lenta causada por el drenaje y luego es rápida, catalizada por la acción de *Acidithiobacillus ferrooxidans* con pH inferiores a 4,0. En el proceso inicial de acidificación a pH menores a 6,0 actúa *Acidithiobacillus thiooxidans* (Dent, 1986; Ehrlich, 1990; Brock et al., 1987).

En SSA del valle alto del Chicamocha, Corredor (2005), como parte de la investigación sobre la problemática de SSA realizada por Gissat (2004), aisló e identificó poblaciones microbiales en los *Typic Sulfaquepts* y demostró que las bacterias oxidantes de S y Fe son los microorganismos más proliferantes en el suelo, lo que estuvo asociado con horizontes sulfúricos Bgj (pH menores a 3,5) como se ilustra en la Figura 4.9. Lo anterior indica y corrobora la importancia de estos organismos en la oxidación bioquímica. Al aislar las poblaciones de bacterias en este horizonte con medios específicos para bacterias oxidantes, Corredor (2005) determinó el género *Acidithiobacillus ferrooxidans* como especies acidófilas que se forman como colonias de color naranja.

Con la actividad de estas bacterias acidófilas y su correlación con horizontes sulfúricos, una vez más se comprueba la importancia de este factor biológico en la formación de SSA, asociado principalmente a SSA actuales maduros y oxidados, como se estableció en los *Typic Sulfaquepts* (sector Duitama-Ayalas), unidad de suelos donde se resaltan limitantes en productividad agrícola.

La oxidación de sulfuros en el agua de drenaje de suelos del valle alto del Chicamocha genera acidez con disolución de hierro y sulfatos. Esta disolución es inducida por la actividad de oxidación de las bacterias, lo que origina una apariencia rojiza en el agua, aceitosa metálica sobre la superficie (Figura 5.5) y algunas veces gelatinosa como producto de su metabolismo (Dent & Dawson, 2000).



**Figura 4.9** Distribución de bacterias oxidantes en SSA del valle alto del río Chicamocha. Nótese que la mayor población de bacterias oxidantes se relaciona con el horizonte sulfúrico Bgj. de los *Typic Sulfaquepts*.

Fuente: Corredor (2005).

**4.1.5 Prácticas de aireación por efecto de drenajes artificiales.** El uso de drenajes profundos y maquinaria agrícola expone capas internas de sulfuros de hierro (materiales sulfídicos) que inducen a la acidificación extrema del suelo con su consecuente degradación química (Dear et al., 2002, Dent, 1986). Este factor es determinante en la formación de condiciones sulfatadas ácidas actuales del valle alto del río Chicamocha, Boyacá.

La construcción de la red de drenajes destinada a habilitar tierras para la agricultura, se ha venido realizando en el área de estudio desde hace aproximadamente 50 años con una desecación gradual de las áreas pantanosas (Usochicamocha, 2002). La red de drenaje actual la conforman los canales Vargas, Surba, Cucho, Transval y Venecia, los cuales confluyen al canal principal de drenaje que atraviesa longitudinalmente el valle para descargar finalmente al río Chicamocha en proximidades de la ciudad de Sogamoso. Existen otros dos canales: Ayalas y Nobsa, que vierten directamente al río Chicamocha.

Este sistema de drenaje está integrado por estructuras de control de nivel en los canales principales, para garantizar el mantenimiento de los niveles freáticos en los suelos de turba y dar soluciones puntuales de drenaje a unidades como Cucho y Ayalas, que tienen problemas de encharcamiento.

---

Los suelos sulfatados potenciales pueden llegar a ser sulfatados ácidos actuales como consecuencia del drenaje. Los sulfuros de hierro son estables solamente bajo condiciones anaeróbicas (Dent, 1986). El drenaje facilita la entrada de oxígeno al suelo, y los sulfuros se oxidan generando ácido sulfúrico. Con la apertura de drenajes o vallados y su posterior limpieza, se pueden exponer los materiales sulfídicos que al oxidarse degradan áreas adyacentes, debido a procesos de sulfatación que se explican en la sección 4.2.3.

## 4.2 PROCESOS INVOLUCRADOS EN LA FORMACIÓN DE SSA

El proceso inicial inherente a la formación de SSA, es la **acumulación** de sedimentos órgano-minerales de origen fluvio-lacustre, junto con altas concentraciones de azufre en medios anegados. Allí suceden procesos de reducción bioquímica, los cuales originan procesos de **sulfhidrización** (formación de sulfuros de hierro), medio que caracteriza la acidez potencial y los procesos de **autoneutralización** (Dent, 1986; Bibi, 2012). Cuando estos materiales se perturban por efecto de drenajes, se generan procesos de **óxido-reducción**, oxidación y acidificación bioquímica (**sulfurización o sulfatación**), los cuales inestabilizan minerales primarios y como consecuencia se presenta **solubilización** de formas metálicas de S, Fe, Al (tóxicas) y de minerales secundarios típicos de SSA; en estos procesos se facilita el lavado de cationes básicos, lo que afecta la fertilidad química, física y biológica de los suelos.

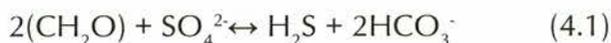
A continuación se describen los procesos más importantes relacionados con la formación de SSA en el área de estudio:

### 4.2.1 Sulfhidrización: formación de sulfuros de hierro y acidez potencial.

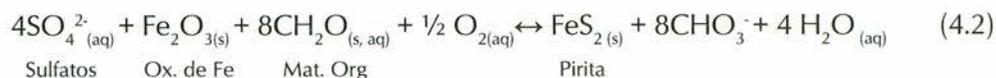
Los fenómenos de formación de sulfuros de hierro en ambientes sulfatados son descritos ampliamente por Bloomfield y Coulter (1973); Dent y Dawson (2000), Dent y Pons (1995) y Lamontagne (2004). Para SSA de la planicie fluvio-lacustre del río Chicamocha, se favorece la acumulación de sulfuros de hierro, porque se presentan o presentaron condiciones necesarias para inducir altas tasas de reducción de sulfatos, como se observa en horizontes subsuperficiales del piso lacustre con el dominio de monosulfuros de hierro (FeS) y de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S).

La acumulación de materiales vegetales o animales junto a compuestos de hierro en presencia de aguas ricas en sulfatos, facilita la formación de sulfuros de hierro. Estos materiales orgánicos sufren procesos de descomposición y son reducidos a sulfuros por bacterias anaeróbicas y reductoras de azufre en suelos pobremente aireados (*Desulfovibrio* y *Desulfotomaculum*) (Bloomfield, 1972; Brock et al., 1987; Erlich, 1990).

El proceso descrito se simplifica en las siguientes reacciones bajo ambientes inundados con pH cercanos a la neutralidad (6,5-7,5) y un potencial redox Eh negativo (-180 a -220mV).



La formación de sulfuros de hierro producto de la disolución del sulfato en medios anegados, puede resumirse en la Ecuación 4.2 (Dent & Dawson, 2000).



Bajo estas condiciones, el sistema permanece en equilibrio, las capas de material pirítico (sulfídico) son cubiertas por agua junto a los sedimentos finos (arcillas) y con la mezcla de sedimentos orgánicos provenientes de la vegetación nativa del suelo. Estas condiciones constituyen los materiales sulfídicos y caracterizan a SSA potenciales (Lines et al., 1999).

En el valle alto del río Chicamocha, los SSA en general son actuales con un estado maduro de oxidación y acidificación. La acumulación de formas de sulfuros de hierro y la formación de materiales sulfídicos en la zona de estudio, se evidencian principalmente en profundidad y se caracterizan por los siguientes aspectos:

- En profundidad (>1m) y al contacto con el nivel freático, se perciben olores fuertes típicos de sulfuros (huevo podrido) en horizontes orgánicos Og y minerales Cg (horizonte mineral bajo condiciones redoximorficos grises (gley) asociados a altas concentraciones de materia orgánica en medios anegados), con reacción fuerte al peróxido de hidrógeno.

- Porcentaje de S total > 2 %, materia orgánica > 10 %.
- pH después de incubación y pH en peróxido menores a 2,5 para pH medidos en agua mayores a 4,0.
- Relación directa entre materiales orgánicos y % S total.
- Presencia de materiales de pirita en forma de cluster asociados a los tejidos vegetales observados en la sección delgada, como se ilustra en la Figura 4.32.
- Presencia de hierro soluble mayor a 10mg L<sup>-1</sup>.

### ***Evaluación de la prueba de incubación y peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).***

La prueba del peróxido acelera los procesos oxidorreductores, simulando los efectos del potencial de acidificación en materiales sulfídicos. Esto se debe a la reacción del agente oxidante que ataca los materiales oxidables de los SSA y transforma rápidamente los sulfuros del suelo a ácido sulfúrico y a SO<sub>2</sub> en forma de gas, lo que produce una caída dramática del pH. Se identifican SSA potenciales si el pH medido con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> desciende a valores cercanos o menores a 2,5, cuando el pH medido en agua es mayor a 4,0 (Dent & Dawson, 2000; Ahrent et al., 2004).

El tratamiento con peróxido de hidrógeno ofrece un método de rápida predicción de la presencia y acumulación de sulfuros de hierro. El pH obtenido por este método es mucho menor al conseguido a partir de la prueba de incubación. El pH en la prueba de incubación debe bajar mínimo 1 unidad respecto a pH medidos en campo (suelo: agua) que presenten valores mayores a 4,0 (Soil Survey Staff, 2010).

En suelos fluvioacustres del valle alto del río Chicamocha se identificaron materiales sulfídicos en los primeros 100 cm de un perfil modal orgánico clasificado como *Typic Sulfihemists*. Los pH determinados se encontraron por debajo de los límites, tanto en la prueba de peróxido (pH < 2,5), como en la prueba de incubación, los cuales disminuyeron más de una unidad respecto al pH en agua medido en campo (Tabla 4.2).

**Tabla 4.2** Indicadores de la presencia de materiales sulfídicos en *Typic Sulfihemists* de la planicie fluvioacustre del valle alto del río Chicamocha.

Hzte_espesor (cm)	% MO	Eh mV	pHf	pHi	pHox	% S Total
Oay 0-25	45,0	420	6,84	3,8	2,52	8,6
Oey 25-70	32,0	417	4,27	4,1	3,25	2,34
Oeg 70-110x	36,7	-136	6,01	4,7	2,45	16,5

pHf: pH medido en campo (suelo: agua 1:1). pHi: pH medido después de 2 meses de incubación para demostrar la presencia de materiales sulfídicos. pHox: pH medido en peróxido de hidrógeno (30 %). Eh: potencia redox (milivoltios). MO: materia orgánica (%).

**Fuente:** Gómez (2006).

De acuerdo con la evaluación hecha a 220 muestras de suelos en el área de estudio (Figura 4.10), se observa que el pH de los suelos evaluados en H<sub>2</sub>O presenta una correlación positiva con el pHox bajo un modelo exponencial. Se encontró que el 75 % de las muestras caracterizadas presentó reacción al peróxido con pHox menores a 3,0 identificando presencia de sulfuros de hierro en algún grado, con una mayor reacción para suelos de pH en agua mayores a 4,0 (SSA potenciales).

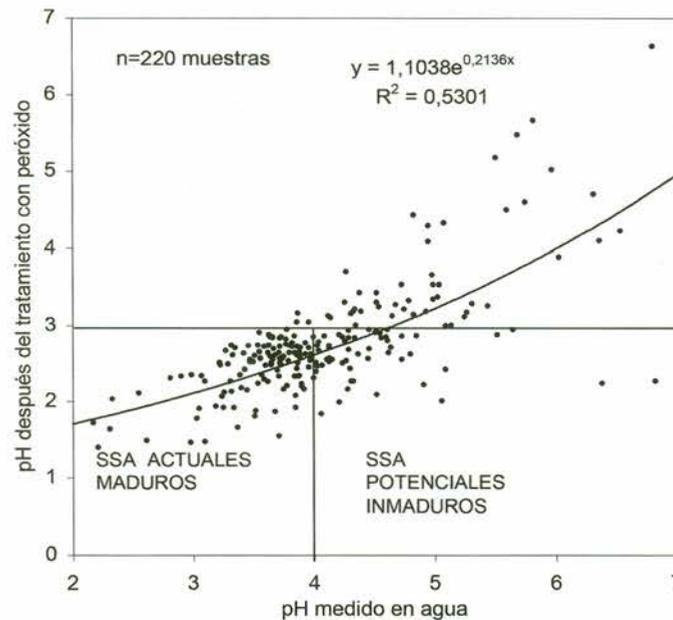
Los SSA actuales (evolucionados) no son reactivos, porque ya han sufrido un proceso acelerado de oxidación y acidificación; en esta clase de suelos se identifican los horizontes sulfúricos con pH menores a 3,5. En contraste, los SSA potenciales (inmaduros) son reactivos y pueden generar reacciones de oxidación y acidificación mediante la exposición de materiales sulfídicos.

Se pueden evidenciar, en menor grado, horizontes de SSA potenciales o SSA de evolución media, con pH en agua entre 4-6, horizontes minerales Cg comunes de los *Typic Sulfosaprists*, y horizontes Og de los *Typic Sulfihemists* que presentan una reacción al peróxido con pH menores a 3,0 (indicativo de materiales sulfídicos en SSA potenciales) (Tabla 4.2, Figura 4.12).

Para los SSA actuales (*Typic Sulfaquepts*, *Typic Sulfosaprists* y *Typic Sulfohemists*), los materiales sulfídicos se encuentran generalmente debajo de un metro, lo cual sugiere que la adecuación de drenajes y obras de

ingeniería para riego no deben perturbar estos materiales, porque su oxidación generaría un impacto severo de acidificación y toxicidad al medio. De acuerdo con Hicks, (1999), Lamontagne *et al.*, (2004), Edward *et al.* (2006), en estos horizontes se encuentran materiales y minerales aún por oxidar, como sulfuros de hierro.

Los SSA actuales maduros pertenecen a horizontes Bj, Aj y Oj comunes en los *Typic Sulfosaprists*, *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfaquepts*, con pH en agua menores a 4 y de reacción ultraácida al medir el pH con peróxido. En SSA fuertemente oxidados, se identifican minerales de jarosita e hidróxidos de hierro que reflejan los estados intermedios y finales de oxidación del hierro y azufre (Breemen, 1982).



**Figura 4.10** Medida del pH en agua y su relación con el pH en peróxido de hidrógeno (prueba para diagnosticar SSAP).

**Fuente:** Gómez (2006).

**Evaluación del S total y su relación con materiales orgánicos.** El S total en SSA puede indicar de manera indirecta las formas del S provenientes de los sulfuros de hierro en compuestos estables orgánicos, y en suelos minerales incluye ácidos solubles y yeso. En materiales sulfídicos de SSA, prácticamente el S total ocurre como pirita, por ello es un buen indicativo

de la presencia de sulfuros de hierro generalmente con valores mayores a 2 % (Dent & Dawson, 2000; Hicks et al., 1999; Soil Survey Staff, 2010). En los SSA estudiados existe una relación directa entre S total (%) y materiales orgánicos (Figura 4.11); azufre total mayor a 2 % corresponde a suelos orgánicos con materiales sulfídicos y valores mayores a 30 % de materia orgánica.

Dent y Pons (1995), Dent (1986), Wada y Seisuwan (1988), y Lamontagne *et al.* (2004) indican que la concentración de sulfuros producidos está relacionada con la cantidad de materia orgánica metabolizada. Además, comprobaron que los sulfuros producidos dependen de la mayor disponibilidad de materiales orgánicos descompuestos en el medio. La oxidación de la materia orgánica, en este caso, mejora el requerimiento de energía para la reducción de los sulfatos por parte de las bacterias bajo materiales sulfídicos (ecuaciones 4.1 y 4.2).

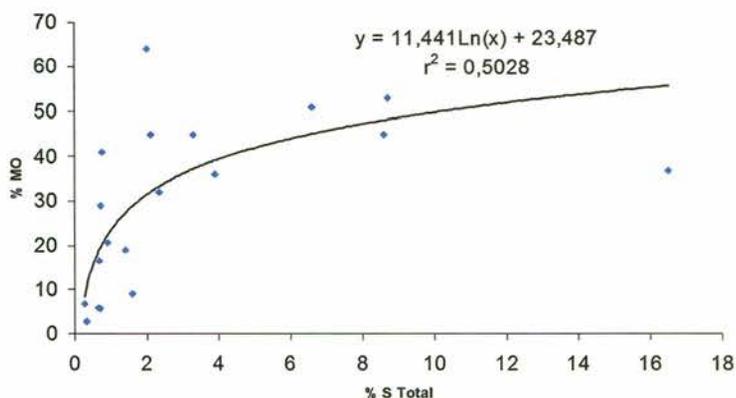
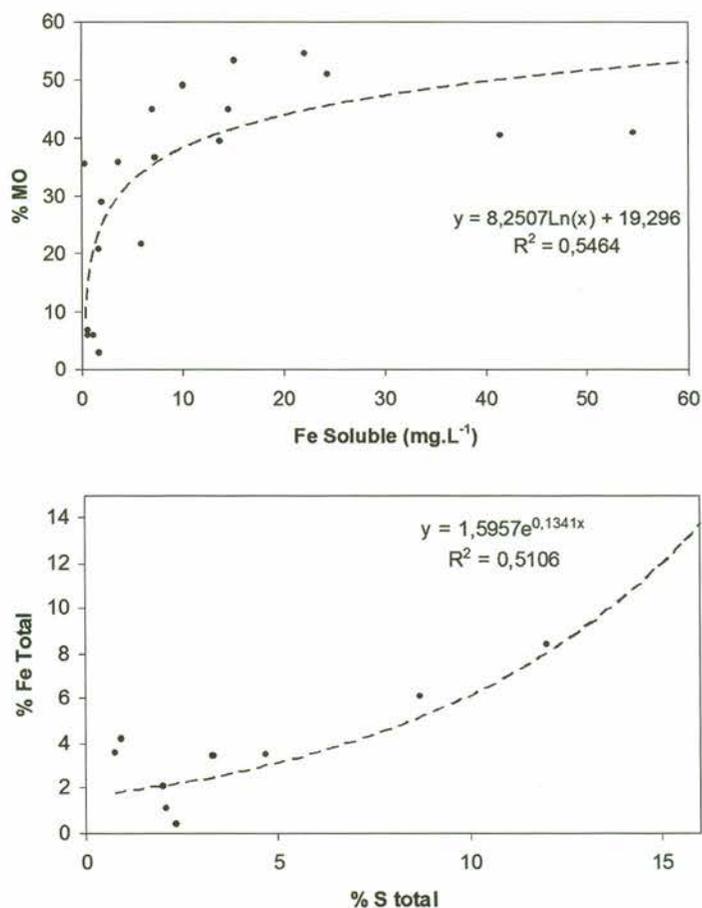


Figura 4.11 Relación entre el % S total y el % de materia orgánica en SSA. Valle alto del río Chicamocha.

Fuente: Gissat (2006).

**Evaluación de las formas de hierro y su relación con la presencia de materiales sulfídicos.** La presencia de Fe es una condición necesaria para la formación de materiales sulfídicos y también se asocia con la presencia de materiales orgánicos para la formación de sulfuros biológicos en medios lacustres (Wada & Seisuwan, 1988; Lamontagne *et al.*, 2004). Los suelos SSA del DRACH no son la excepción, pues los sedimentos contienen abundantes sesquióxidos de hierro y materiales orgánicos, como se discutió en los factores de formación (Gissat, 2006).

En medios anaerobios, las formas reducidas de  $\text{Fe}^{2+}$  se solubilizan dentro de un rango normal de pH y pueden ser movilizadas también por productos solubles orgánicos (Dent, 1986). Esta tendencia se ilustra en la Figura 4.12, donde el Fe se hace más soluble a medida que aumenta la materia orgánica de los suelos con valores mayores a 30 %, rango en el que se encuentran los SSA orgánicos y existe una mayor probabilidad de formarse sulfuros de hierro. De esta forma, valores de Fe soluble mayores a  $10\text{mg L}^{-1}$ , pueden ser indicativos en medios orgánicos de su condición reducida en materiales sulfídicos.



**Figura 4.12** Relación entre el Fe soluble ( $\text{mg L}^{-1}$ ) y porcentaje de materia orgánica (izq.). Relación entre el % S total y el % Fe total (der.). SSA orgánicos, valle alto del río Chicamocha.

**Fuente:** Gómez (2006).

Por otra parte, en SSA orgánicos existe una relación directa entre el S total y el Fe total (Figura 4.12), lo cual indica que el Fe en este medio se encuentra

---

principalmente en formas de sulfuros de hierro, cuando los niveles superan el 3 % de Fe total. Los sulfuros de hierro se localizan principalmente en las raíces fibrosas que aparecen en la rizósfera (Marius, 1982). La ausencia de sulfuros de hierro en SSA minerales se puede explicar por la mayor dinámica que ejercen formas de sesquióxidos de hierro, los cuales dominan la fracción mineral independiente de la presencia de materiales orgánicos y de azufre.

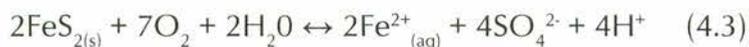
**4.2.2 Sulfurización: oxidación-acidificación.** El proceso de sulfurización es el fenómeno que incluye la producción de ácido sulfúrico por parte de la oxidación de sedimentos ricos en azufre y hierro, fenómeno característico de SSAA, el cual desencadena transformaciones severas de los materiales parentales afectando todas las fases del suelo (Gissat, 2006).

Los sulfuros de hierro son estables solamente bajo condiciones de reducción. La adecuación de drenajes permite las condiciones de oxidación en SSA potenciales (materiales sulfídicos) y la consecuente generación de acidez (Dent & Dawson, 2000; Ahern et al., 2004; Edward, 2006; Chuxia, 2012). La acidez potencial es activada en materiales sulfídicos cuando sufren el proceso de aireación (oxidación), desarrollándose horizontes extremadamente ácidos con pH menores a 4,0 (SSA actuales- horizontes sulfúricos).

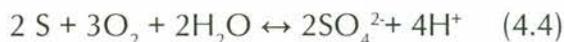
Tanto la acidez actual como la potencial pueden ocurrir simultáneamente dentro del perfil, y coexistir generalmente características de SSAA sobre SSAP. Comúnmente, en zonas de oxidación de horizontes sulfúricos pueden existir reservas de sulfuros por oxidar, como ocurre en horizontes Bj, Oj y Ogj de los *Typic Sulfosaprists* que, a pesar de presentar pH <3,5, el S total es cercano o mayor a 2 %.

En principio, la oxidación de los materiales es de origen químico y luego bioquímico, catalizados por la acción de ferrosulfobacterias litotróficas, tales como, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A. thiooxidans* (Erlhich, 1990; Ludwig et al., 1999), lo que genera diversos productos de la acidez (ácido sulfúrico, jarosita, metales tóxicos en solución) en medios extremadamente ácidos (pH<3,5), y restringe severamente la fertilidad y el establecimiento normal de cultivos (Chuxia, 2012).

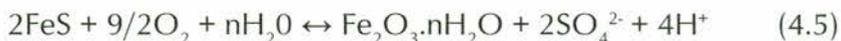
Inicialmente, la disolución del oxígeno y la conversión de sulfuros de hierro o piritas a iones ferrosos y sulfatos, constituyen reacciones lentas que se suceden bajo suelos de reacción moderada a fuertemente ácida:



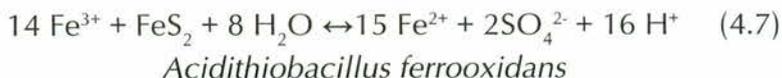
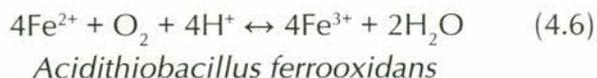
La oxidación del azufre elemental es muy lenta y produce ácido sulfúrico, pero puede ser catalizada por bacterias autótrofas en medios ligeramente ácidos:



La acidificación inicial puede oxidar monosulfuros de hierro, fenómeno característico para SSA orgánicos que presentan horizontes Og, donde las cantidades de FeS son dominantes (Gómez, 2006).



Una vez el pH del sistema oxidado es menor a 4,0, el  $\text{Fe}^{3+}$  es soluble y conlleva una oxidación rápida de los sulfuros de hierro o pirita. Esta reacción se considera de ciclopropagación del Fe y es catalizada por bacterias oxidantes de S y Fe (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) que trabajan en este medio acelerando los procesos de acidificación:



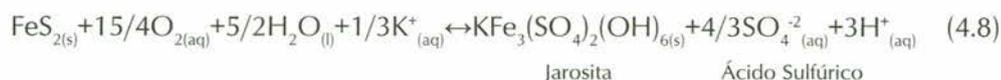
Durante la estación seca, el oxígeno se difunde en los poros y fisuras del suelo, y los iones de  $\text{Fe}^{2+}$  (ferroso) en solución son oxidados a  $\text{Fe}^{3+}$  (férrico) formando hidróxidos. En medios muy fuertemente ácidos a ultraácidos, el hierro férrico permanece en solución, luego se difunde a zonas donde está la pirita (matriz del suelo) y es reducido a  $\text{Fe}^{2+}$ , el cual se difunde a la zona de oxidación y genera más acidez, de acuerdo con la Ecuación 4.7, que explica procesos de ciclopropagación.

Los diferentes estados de oxidación no necesariamente ocurren en un mismo punto. Análisis micromorfológicos y de campo en los SSA estudiados muestran diferencias claras en los productos de oxidación (jarosita, hidróxidos de hierro y yeso) en un mismo horizonte Bgj de los *Sulfic Endoaquepts* y los *Typic Sulfaquepts*. Por lo general, en horizontes donde aún existen sulfuros de hierro (piritas), los productos de la oxidación se encuentran en el interior de los pedos y relacionados con tejidos vegetales descompuestos.

**Productos de la acidificación.** La Figura 4.13 ilustra la secuencia general de minerales producto de la oxidación de materiales sulfídicos junto a los minerales que determinan las características morfológicas y de identificación típicas para suelos sulfatados ácidos. La naturaleza de la acidez en SSA y los productos finales de esta reacción bioquímica en medios aeróbicos, están asociados con la presencia de ácidos solubles como el ácido sulfúrico y las formas de  $Fe^{3+}$  y  $Al^{3+}$  de compuestos sulfatos metálicos que actúan como ácidos débiles por sus procesos de hidrólisis (Ludwig et al., 1999).

En SSA se pueden diferenciar tres clases particulares de acidez: **acidez actual** (acidez soluble + acidez intercambiable); **acidez de reserva** (acidez proveniente de minerales precipitados como la jarosita) y la **acidez potencial** (procesos de oxidación que pueden generar acidez actual y retenida) (Ahern et al., 2004).

**Jarosita.** La oxidación conjunta del Fe y S es característica de suelos sulfatados ácidos, como producto final se forma jarosita (mineral característico de la acidez de reserva), material de apariencia amarilla pálida, la cual es depositada como recubrimientos o rellenos en los poros, canalículos de raíces o grietas, como producto final después de condiciones fuertes de oxidación en medios ultraácidos y ligada a la formación de ácido sulfúrico. La jarosita se presenta en suelos con dominio de la fracción mineral, bajo pH menores a 3,5 y Eh mayores a 400 mV (Dent & Dawson, 2000; Dear et al., 2002).



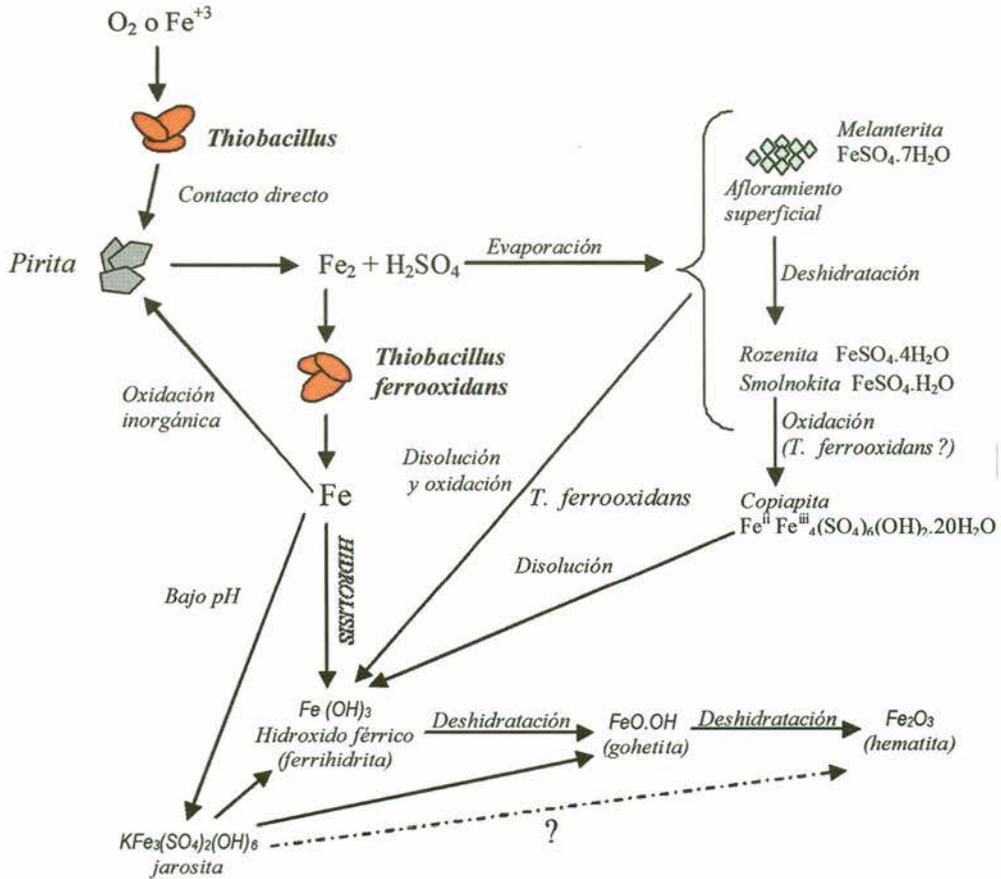


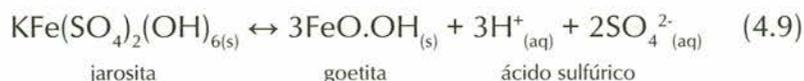
Figura 4.13 Secuencia de reacción de minerales en SSA por efectos de la oxidación de pirita.

Fuente: Nordstrom (1982).

Generalmente predomina la forma potasio-jarosita, pero se puede presentar en los suelos junto a formas de natio-jarosita e hidronio-jarosita, donde el  $\text{Na}^+$  y el  $\text{H}^+$  reemplazan al  $\text{K}^+$ .

La jarosita también es gradualmente transformada a hidróxidos de hierro (Ecuación 4.9), que forman moteados marrones rojizos cuando el pH aumenta por condiciones temporales redox de saturación de agua, debido al intercambio de electrones del hierro que son más reversibles que los de azufre (Dent & Dawson, 2000; Hinrich et al., 2001; Zhang & Luo, 2002; Burton et al., 2006).

La inestabilidad e hidrólisis de la jarosita se consigue con pH superiores a 3,6, lo cual provoca una transformación gradual a sesquióxidos de Fe (ferrihidrita, goetita o hematita), indicativo de una mayor evolución en los procesos de oxidación y transformación de minerales de hierro. Las formas de sulfatos que se originan en esta reacción son susceptibles de lixiviación, formando horizontes Bgj y Bwg más evolucionados (Breemen, 1982; Dent; 1986).



En SSA del valle alto del Chicamocha, la formación de la jarosita (mineral de color amarillo ocre dorado) se observa como característica morfogenética en campo (Figura 4.14). En el análisis de sección delgada, la jarosita aparece como rellenos o recubrimientos en forma de betas amarillas pálidas contrastantes en horizontes sulfúricos Bj (*Typic Sulfosaprists*) con pH menores a 3,5 y Eh mayores a 400 mV (Figura 4.27).



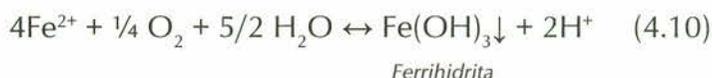
**Figura 4.14** Jarosita como rasgo morfogenético en campo. SSAA oxidados. Valle alto del río Chicamocha, Boyacá.

**Fuente:** Gissat (2006).

Trabajos realizados acerca de la formación de hidroxisulfatos tipo jarositas (Breemen, 1973, Fitzpatrick et al., 2002) o de formas del grupo de la alunita, han mostrado preferencia por el Fe sobre el Al, y del K sobre los demás cationes ( $\text{H}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ). Breemen (1976) encontró que aun cuando las concentraciones de  $\text{Na}^+$  son altas, la afinidad es mayor por  $\text{K}^+$ . Se pueden definir otras formas de hidroxisulfuros en el suelo, cuando las concentraciones de  $\text{K}^+$  son muy bajas, como es el caso de la formación

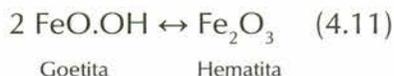
de H-jarosita, la cual fue especiada en horizontes orgánicos Oj con bajos contenidos de K<sup>+</sup> comunes en los *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfosaprists* de estudio.

**Actividad del hierro.** Según Edward *et al.* (2006), gran parte de la acidez generada por la oxidación de la pirita depende de la oxidación de formas de Fe II a Fe III (Ecuación 4.7) y posterior formación de precipitados de hidróxidos de Fe III (ferrihidrita) y óxidos de hierro (gohetita). La constitución de estos minerales se produce a pH mayor a 4,0. La actividad de la oxidación de sulfuros de hierro favorece la aparición de los óxidos de Fe III coloidales en aguas de drenaje o suelo (Ecuación 4.10).



La formación de ferrihidrita e hidróxidos de hierro de tipo amorfo está relacionada con medios húmedos, presencia de materiales orgánicos, productos iniciales de alteración bajo actividad de microorganismos y concentraciones de Fe en solución, características que coinciden con la formación de los suelos de estudio.

Las características redoximórficas de colores rojizos a pardo rojizos en SSA de estudio, son principalmente formas libres de óxidos y de hidróxidos de hierro amorfo y ferrihidrita (Tabla 4.3), que están asociadas a la jarosita, como se evidencia en las observaciones morfogenéticas y en los análisis micromorfológicos de horizontes Bgj y Bwg de los *Typic Sulfaquepts* y *Sulfic Endoaquepts* (Figuras 4.30 y 4.31).



En los SSA minerales de estudio, la mayor evolución la representan los *Sulfic Endoaquepts* con un dominio mayor de minerales de óxidos e hidróxidos de hierro. Además, las características morfogenéticas son corroboradas por el análisis mineralógico de las arenas y la presencia de minerales opacos en un 94 % de la fracción arenosa, en forma de nódulos finos masivos de Fe

con diferentes estados de oxidación e hidratación, posiblemente formas de goetita y hematita (Ecuación 4.11).

De acuerdo con la caracterización química de los análisis especiales de Fe (Tabla 4.3), se observa un predominio de minerales amorfos (Feox) sobre los cristalinos (Fed-Feox), en todos los horizontes de perfiles pedogenéticos sulfatados ácidos, donde las formas de hidróxidos de Fe amorfo, como la ferrihidrita, son frecuentes a excepción del horizonte Bj de los *Typic Sulfosaprists*, quizás por la formación definida y abundante de jarosita principalmente en este tipo de horizontes.

**Tabla 4.3** Análisis químicos especiales para estimar diversas formas de hierro (Fe).

PERFIL	HZTE	Espesor cm	%Fep	%Fed	%Feox	% Fe total	%MO	Fed-Feox
<i>Sulfic Endoaquepts</i>	A	0-10	0.69	1.20	0.75	2.50	19.12	0.45
	Bwg	10-55	0.25	2.10	1.10	3.30	2.85	1.00
	Bgj	55-80	0.44	2.90	1.30	3.90	6.79	1.60
	Oeg	80-110x	0.69	0.74	0.54	2.20	51.00	0.20
<i>Typic Sulfaquepts</i>	Ap	0-12	0.74	1.40	1.20	2.80	16.60	0.20
	Bwg	12-30	0.60	1.80	1.20	2.80	5.90	0.60
	Bgj	30-70	0.64	1.70	1.50	4.20	5.85	0.20
	Oe	70-110x	0.30	0.19	0.18	1.30	36.00	0.01
<i>Typic Sulfosaprists</i>	Aj	0-15	2.50	4.60	2.70	7.50	29.00	1.90
	Oaj	15-35	2.30	4.90	2.60	7.20	53.00	2.30
	Bj	35-60	0.97	3.90	0.60	8.40	9.18	3.30
	Ogy	60-100	0.24	0.26	0.25	1.13	45.00	0.01
<i>Typic Sulfohemists</i>	A/Oa	0-10	1.40	2.70	1.50	4.20	20.70	1.20
	Oa/Oe	10-37	1.70	3.00	2.40	4.80	41.00	0.60
	Oe	37-60	1.10	2.20	1.60	3.40	45.00	0.60
	Oig	60-100x	0.59	0.16	0.15	2.10	64.00	0.01
<i>Typic Sulfihemists</i>	Oay	0-25	1.10	2.40	1.60	3.50	45.00	0.80
	Oey	25-70	0.31	0.25	0.09	0.60	32.00	0.16
	Oeg	70-110x	1.60	2.50	1.20	14.50	36.72	1.30

Fep (pirofosfato, complejos orgánicos). Fed [ditionito-citrato, formas libres óxidos e hidróxidos de hierro (amorfas + cristalinas)]. Feox (oxalato, formas amorfas de Fe, hidróxidos de hierro amorfos).

Fed-Feox (estima formas cristalinas, goetita, hematita).

Fuente: Gissat (2006).

Otra especie importante del Fe en SSA es la presencia de formas quelatadas del Fe (Fep), principalmente para horizontes orgánicos o enriquecidos en materia orgánica como los Aj de los *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfosaprists*.

---

Este parámetro muestra valores similares a los de especies amorfas (Feox), lo cual indica que estos suelos están dominados por minerales amorfos y complejos metálicos orgánicos.

**Hidrólisis y actividad del aluminio.** En medios ácidos las bases intercambiables son removidas y reemplazadas por  $H^+$ , pero se ha comprobado que en estos medios extremadamente ácidos las superficies de las arcillas se encuentran saturadas principalmente por aluminio (Bloomfield & Coulter, 1973).

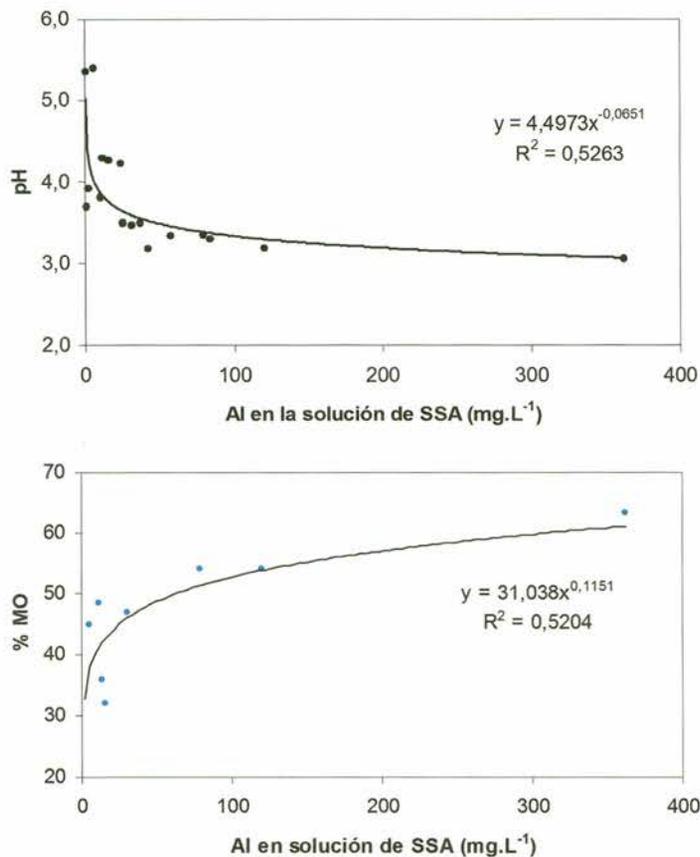
Frink (1972) y Gómez *et al.* (2005) han demostrado en investigaciones realizadas sobre la dinámica química en SSA, que el  $Al^{3+}$  en SSA actuales se presenta como el ión dominante a pH menores de 3,5. La fuente del  $Al^{3+}$  intercambiable son las capas de silicatos intemperizadas de las arcillas. Esos silicatos son atacados por ácido sulfúrico y aumentan considerablemente el  $Al^{3+}$  en la solución.

En medios sulfatados ácidos, como ocurre en los SSA bajo estudio, existe un alto intemperismo de los minerales silicatados, debido al dominio de caolinita en la fracción fina y a la disolución de  $Al^{3+}$  y  $Si^{4+}$  en medios ultraácidos (Gómez, 2006); en el campo, los pH de horizontes sulfúricos se encuentran en un rango entre 3,2 y 3,8. El fenómeno de la pérdida de  $Si^{4+}$  y  $Al^{3+}$  de la fase sólida se constata en el análisis de aguas freáticas de los perfiles modales (sección 4.1.3), donde se observa que a pH menores de 3,5, se manifiesta un aumento en la solubilidad de estas formas, propiedad que identifica la intemperización en medios ácidos de los silicatos y su solubilidad en drenajes.

El aluminio en solución está directamente relacionado con la acidez presentada a pH menores de 3,5 en horizontes sulfúricos de los *Typic Sulfosaprists*, *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfaquepts* (Figura 4.15). En este rango de pH se presentan niveles de aluminio soluble mayores a  $25 \text{ mg L}^{-1}$  y una saturación mayor al 60 %, valor crítico para la mayoría de plantas cultivables en SSA (Bloomfield & Coulter, 1973; Dent, 1986; Chuxia Lin, 2012), y se hace insoluble al aumentar el pH de 4,5 a 5,5, con valores menores a  $1 \text{ mg L}^{-1}$ . Lo anterior se debe a que el aluminio es inestable en

este medio ( $\text{pH} < 3.6$ ) y es precipitado como gibsita en horizontes órgano-minerales (*Sulfic Endoaquepts*) asociados a sulfatos metálicos como jurbanita (Bibi, 2012), con mayor frecuencia en suelos orgánicos (*Typic Sulfihemists*), lo cual contrasta con otros suelos ácidos del trópico como oxisoles, donde el aluminio se precipita con  $\text{pH}$  mayores a 5,5.

Para horizontes orgánicos en SSA, existe una relación estrecha entre el  $\text{Al}^{3+}$  soluble y la materia orgánica (Figura 4.15), con una mayor solubilidad y toxicidad en materiales orgánicos sulfatados que en horizontes minerales. Esto se debe a que la materia orgánica forma complejos con el  $\text{Al}^{3+}$ , producto del intemperismo de silicatos de la fracción mineral.



**Figura 4.15** Relaciones entre el  $\text{pH}$  y las concentraciones de  $\text{Al}$  soluble ( $\text{mg L}^{-1}$ ) en muestras de SSA actuales del valle alto del río Chicamocha (arriba). Relación entre la materia orgánica y las concentraciones de  $\text{Al}$  soluble ( $\text{mgL}^{-1}$ ) en muestras de horizontes sulfúricos orgánicos (abajo).

**Fuente:** Gómez (2006).

Al caracterizar el Al<sup>3+</sup> extraído con oxalato (especies amorfas) se observa un predominio sobre las formas cristalinas (analizadas con ditionito en los horizontes de SSA) (Tabla 4.4), lo cual demuestra una fuerte presencia de complejos aluminicos que no permiten la cristalización por los fuertes fenómenos de acidificación.

**Tabla 4.4** Análisis químicos especiales para estimar diversas formas de Aluminio (Al).

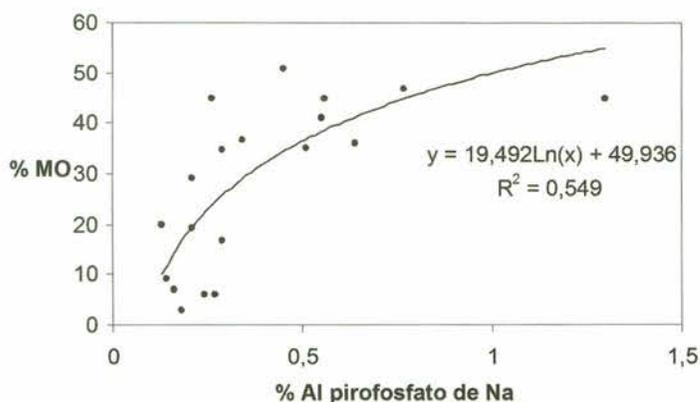
PERFIL	HZTE	Espesor (cm)	%Alp	%Ald	%Alox	% Al total	%MO	Ald-Alox
<i>Sulfic Endoaquepts</i>	Ap	0-10	0.11	0.26	0.21	19.90	19.12	0.05
	Bwg	10-55	0.12	0.28	0.18	8.80	2.85	0.1
	Bgj	55-80	0.22	0.27	0.16	15.80	6.79	0.11
	Oeg	80-110x	0.59	0.72	0.45	21.40	51.00	0.27
<i>Typic Sulfaquepts</i>	Ap	0-12	0.38	0.38	0.29	22.30	16.60	0.09
	Bwg	12-30	0.74	0.32	0.27	18.60	5.90	0.05
	Bgj	30-70	0.68	0.27	0.24	20.50	5.85	0.03
	Oe	70-110x	0.86	0.74	0.64	19.90	36.00	0.1
<i>Typic Sulfosaprists</i>	Aj	0-15	0.38	0.43	0.21	19.70	29.00	0.22
	Oaj	15-35	0.15	0.32	0.13	16.60	53.00	0.19
	Bj	35-60	0.68	0.41	0.14	24.30	9.18	0.27
	Ogy	60-100	0.99	3.3	1.3	4.550	45.00	2
<i>Typic Sulfohemists</i>	A/Oa	0-10	0.56	0.86	0.51	24.90	20.70	0.35
	Oa/Oe	10-37	0.51	0.98	0.55	19.00	41.00	0.43
	Oe	37-60	0.61	0.97	0.56	10.50	45.00	0.41
	Oig	60-100	0.3	1.2	0.29	19.86	64.00	0.91
<i>Typic Sulfihemists</i>	Oay	0-25	0.31	0.41	0.26	20.70	45.00	0.15
	Oey	25-70	1.8	2.5	0.77	30.60	32.00	1.73
	Oeg	70-110x	0.35	1	0.34	25.30	36.72	0.66

Alp (Pirofosfato-complejos orgánicos). Ald [Ditionito-Citrato, formas libres de hidróxidos de Al (amorfas + cristalinas)]. Alox (Oxalato, formas amorfas de Al, hidróxidos de aluminio amorfos).

Ald-Alox (Estima formas cristalinas).

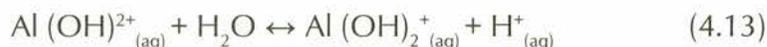
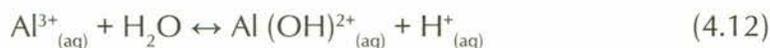
**Fuente:** Gissat (2006).

De otra parte, el aluminio extraído con pirofosfato es mayor que el de especies amorfas y muestra una relación proporcional con los contenidos de materia orgánica bajo un modelo potencial (Figura 4.16, Tabla 4.4), lo cual indica que es común encontrar formas quelatadas de aluminio en los SSA de estudio, y, por ende, la liberación de formas solubles a medida que se acidifican los horizontes sulfúricos orgánicos.



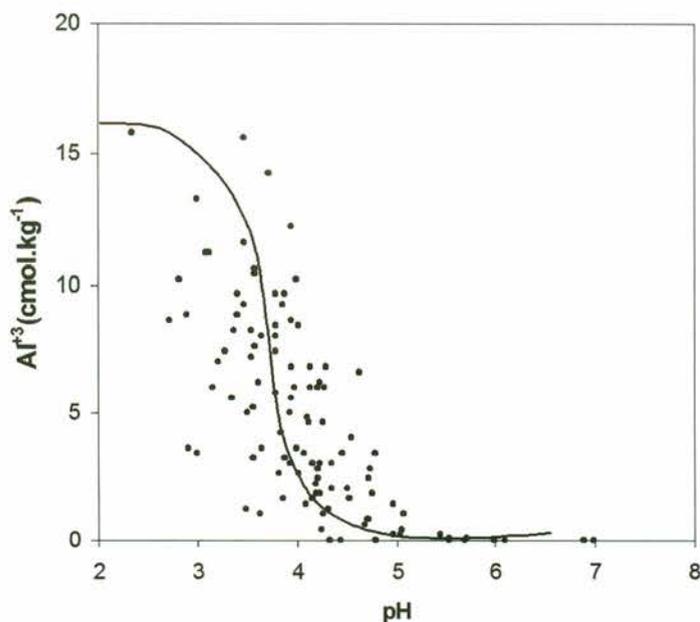
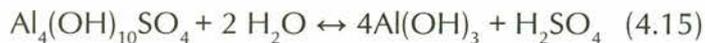
**Figura 4.16** Relación entre la materia orgánica y Al pirofosfato en SSA del valle alto del río Chicamocha.  
**Fuente:** Gómez (2006).

El aluminio intercambiable juega un papel importante en la expresión de características físico-químicas en el suelo y su efecto tóxico sobre plantas. En este sentido, la hidrólisis del aluminio es una fuente de acidez con efectos tóxicos adicionales, debido a las formas monoméricas y el  $Al^{3+}$  en solución:



En el área de estudio, Gómez (2006) comprobó que en medios ultraácidos, como sucede en SSA, la actividad del aluminio es controlada por su forma iónica ( $Al^{3+}$ ) y este se puede precipitar por hidrólisis como gibsita- $Al(OH)_3$  a  $pH > 5,5$  en SSA minerales y  $pH > 4,5$  en SSA orgánicos (*Typic Sulfihemist*). Los resultados anteriores facilitan la interpretación y manejo de la acidez a través del encalamiento, el cual debe propender a neutralizar el aluminio a un pH alrededor de 5,0 (Figura 4.17).

El aluminio, además, en SSA forma sales sulfatadas moderadamente solubles, como la basaluminita identificada por Breemen (1982), (Ecuación 4.15) o la jurbanita (Ecuación 4.16) (Ludwig et al., 1999), minerales que pueden hidrolizarse y liberar ácido sulfúrico (acidez retenida), (Ahern et al., 2004):



**Figura 4.17** Relación del pH y la solubilidad del aluminio de cambio ( $\text{Al}^{3+}$ ), en horizontes diagnósticos de SSA actuales. Valle alto del Chicamocha, Boyacá.

Fuente: Gissat (2006).

La jurbanita y basalumita representan procesos fuertes de acidez y se relacionan con horizontes sulfúricos minerales (Aj, Bj, Bgj). En los SSA actuales, la CIC es dependiente del pH y es dominada por el aluminio de cambio y la materia orgánica. La presencia de la acidez intercambiable en SSA del Distrito de Riego está determinada principalmente por el  $\text{Al}^{3+}$  con abundancia de formas extremadamente tóxicas y valores hasta de  $15 \text{ Cmol}^{(+)}\text{kg}^{-1}$  presentes a pH menores a 3.5, como se observa en la Figura 4.17, rango que correlaciona con las mayores concentraciones del aluminio soluble, como se ilustró en la figura 4.15.

**Sulfatos y salinidad.** Además de la jarosita, los sulfatos de sodio, magnesio, calcio, aluminio y hierro constituyen sales solubles producto de la acidez en SSA (Ahern, 2004; Bibi, 2012). Lo anterior coincide con las formas de sales sulfatadas determinadas en el área de estudio (Tabla 4.7).

---

Los sulfatos de magnesio y sodio son rápidamente lavados en el perfil, tan pronto se adecuan los drenajes. Los sulfatos de calcio son menos solubles, pero se pueden solubilizar en algún grado por efecto de épocas húmedas en medios ácidos. Bajo fuertes condiciones de evaporación pueden aparecer sulfatos de aluminio precipitados en superficie (Rosikcy et al., 2003; Fitzpatrick et al., 2012).

En medios oxidados, gran parte del azufre movilizado como pares iónicos de sulfatos, se lixivian en el agua de infiltración o drenaje y permanecen en la fase soluble del suelo, como producto de los procesos de oxidación; solo una pequeña cantidad de sulfatos es retenida en la fracción mineral como la jarosita (Dent, 1986; Edward et al., 2006), siendo la mayor retención de S en suelos minerales que en los orgánicos. Lo anterior se comprueba por las mayores concentraciones de sulfato soluble en horizontes orgánicos comparados con suelos minerales (Tabla 4.6). Este aumento se debe a una mayor acumulación de formas de azufre en medios reducidos orgánicos, es decir, SSA potenciales orgánicos, los cuales presentan niveles mayores a 2000 mg L<sup>-1</sup> de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> soluble, tal como se caracterizó en los *Typic Sulfihemists* y horizontes reducidos profundos (Tabla 4.6).

La mayoría del sulfato soluble se pierde en las aguas de drenaje y se difunde subsuperficialmente a substratos para ser reducido y formar nuevamente sulfuros, así perdura el ciclo del proceso de sulfhidrización en medios sulfatados ácidos (Dent, 1986; Jusop & Muhrral, 2002; Bibi, 2012).

Además, se comprobó en los SSA de estudio, que el agua en solución es rica en sulfatos, y que estas formas se difunden a través del suelo en forma iónica o formando pares iónicos de Ca, Mg, Na, Fe y Al. Las sales de Fe y Al que se forman en SSA pueden concentrarse en la superficie por evaporación, limitando el desarrollo de cultivos, como se observa en los *Typic Sulfihemists* de la fase salina sódica en el sector Las Vueltas con afloramientos salinos sódicos y metálicos (Figura 4.18).

El fenómeno de salinidad en SSA se debe principalmente a la fluctuación de niveles freáticos ricos en sulfatos, asociada con sales sódicas, magnésicas y metálicas (Tabla 4.7). Otra causa del incremento de sales se presenta cuando

los SSA son drenados, debido a la generación de sales sulfatadas provenientes de las reacciones de oxidación de sulfuros en horizontes profundos reducidos. Para SSA salinos, los valores de CE pueden exceder los  $10\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$  (Dent, 1986), valores que se registran en los SSA del Distrito y que causan detrimento en el crecimiento de los cultivos (Tabla 4.6) (Gissat, 2006).



**Figura 4.18** Afloramiento de sales sulfatadas metálicas en épocas secas, *Typic Sulfohemists*. Sector Las Vueltas.

**Fuente:** Gissat (2006).

En las áreas escaldadas ultraácidas de los *Typic Sulfohemists* se observan afloramientos rojizos superficiales, los cuales constituyen capas de baja permeabilidad, probablemente integradas por sulfatos de hierro que se forman bajo condiciones sulfatadas ácidas del tipo Schwertmannita (Burton et al., 2006).

Para los SSA de estudio, existe una correlación significativa ( $>0,93$ ) entre los sulfatos solubles y la salinidad ( $\text{CE dSm}^{-1}$ ) (Figura 4.20, Tabla 4.6), tendencia que comprueba el dominio de sales sulfatadas ácidas, la cual permite

estimar de manera práctica y aproximada la concentración de sulfatos en solución a partir de la CE ( $\text{dS m}^{-1}$ ) mediante la Ecuación 4.17, deducida de la Figura 4.20.

$$\text{SO}_4^{2-} \text{ soluble (mg L}^{-1}\text{)} = \text{CE (dS m}^{-1}\text{)} \cdot 500 \quad (4.17)$$



**Figura 4.19** Afloramiento de sales de hierro en SSA. Distrito de Riego del Alto Chicamocha.

**Fuente:** Gissat (2006)

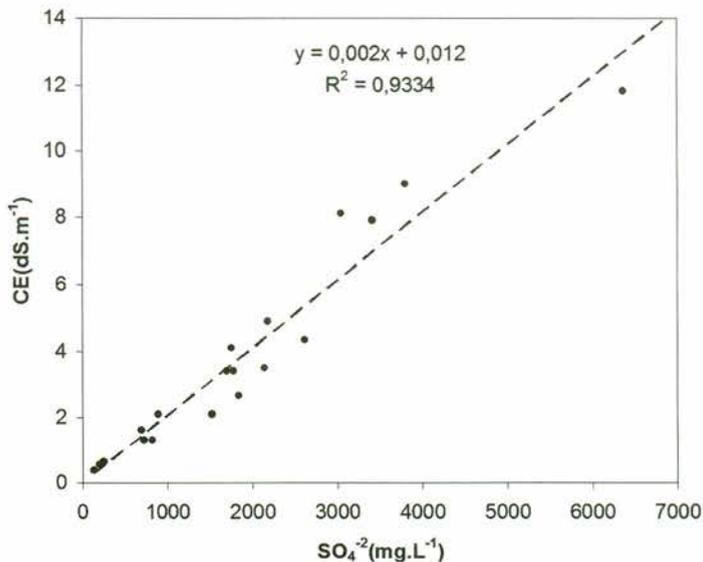
La estimación indirecta de los sulfatos permite diagnosticar condiciones de sulfatación cuando los niveles de sulfato soluble son mayores a  $500 \text{ mg kg}^{-1}$  con CE mayores de  $1 \text{ dS m}^{-1}$ ; bajo estas condiciones se pueden presentar limitaciones agrícolas en suelos sulfatados ácidos.

Los sulfatos solubles también se pueden estimar a través del azufre del suelo (método del fosfato de Ca  $0,008\text{M}$ ), dado que presenta una relación lineal directa con las formas solubles de S (extracto de saturación, turbidimetría); indicador práctico si se parte del hecho que los análisis químicos de caracterización son los más comunes (Figura 4.21).

$$\text{SO}_4^{2-} \text{ soluble (mg L}^{-1}\text{)} = 1.43 \cdot (\text{S extractable (mg kg}^{-1}\text{)} - 7.71) \quad (4.18)$$

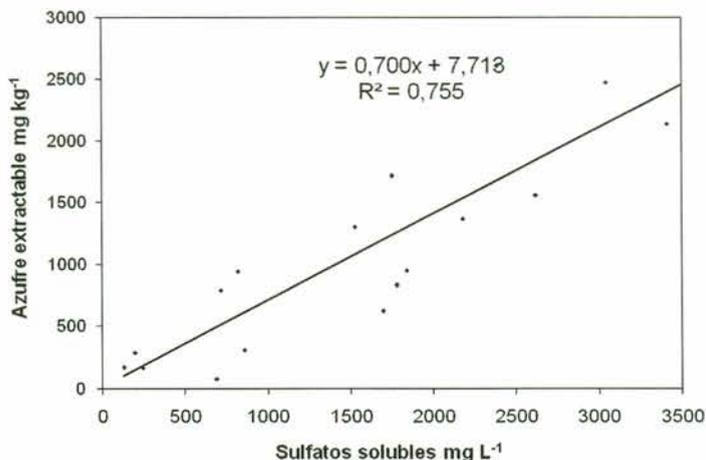
Bajo este modelo, los valores de azufre extractable mayores a  $350 \text{ mg L}^{-1}$  identifican condiciones sulfatadas ácidas, lo que coincide con sulfatos en solución mayores a  $500 \text{ mg L}^{-1}$ , nivel que indica la presencia de horizontes

diagnósticos sulfatados de acuerdo con parámetros de Dent (1986) y Soil Survey Staff (2010).



**Figura 4.20** Relación entre la salinidad y los sulfatos solubles en SS del valle alto del río Chicamocha, Boyacá.

**Fuente:** Gómez (2006).



**Figura 4.21** Relación entre el azufre extractable del suelo (mg kg<sup>-1</sup>) y el sulfato soluble (mgL<sup>-1</sup>), en SSA del valle alto del río Chicamocha, Boyacá.

**Fuente:** Gómez (2006).

### 4.2.3 Solubilización y productos de actividad iónica específicos para SSA. Para determinar las formas solubles en la solución y los productos

---

de actividad iónica (PAI), se utilizó el programa de especiación PHREEQC –Versión 2- (Parkhurst, 1999). El modelo incluye iones  $H^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Fe$  y  $SO_4^{2-}$ , que se cuantificaron mediante extracto de saturación para cada uno de los horizontes diagnósticos de los perfiles modales (Tabla 4.6). Las reacciones homogéneas en la fase soluble y su termodinámica son tomadas de la base de datos PHCREEQC (Parkhurst & Appelo, 1999) e incluye complejos Al-OH, ( $Al(OH)_2^+$ ,  $Al(OH)_3^0$  y  $Al(OH)_4^-$ ); complejos Fe-OH ( $FeOH^+$ ,  $Fe(OH)^{2+}$ ,  $Fe(OH)_3^0$ , y  $Fe(OH)_4^-$ ;  $Fe_2(OH)_2^{4+}$ ,  $Fe_3(OH)_4^{5+}$ ), complejos de sulfatos de Al ( $AlSO_4^+$ ,  $Al(SO_4)_2^-$ ,  $AlHSO_4^{2+}$ ); junto a complejos de sulfato de Fe ( $Fe(SO_4)_2^-$ ,  $FeHSO_4^{2+}$ ,  $FeHSO_4^+$ ), sulfatos de Ca, Na y K, constante de disociación del agua y sistemas de equilibrio para el ácido sulfúrico.

Para determinar las reacciones heterogéneas y minerales secundarios específicos bajo condiciones sulfatadas ácidas, en la Tabla 4.5 se muestran los productos de solubilidad y las constantes de equilibrio necesarias para calcular los productos de actividad iónica en condiciones sulfatadas.

Como es de esperarse para este tipo de suelo, el sulfato es el anión dominante (50-70 %) (Tabla 4.6). Lo anterior se comprueba igualmente con la reacción fuerte al cloruro de bario en campo. Respecto a los pares iónicos, dominan las formas de sulfatos de Ca, a excepción de los Oj y Bj de los SSA órgano-minerales (*Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfosaprists*), donde las sales solubles que predominan son las de sulfato de aluminio ( $AlSO_4^+$ , log Actividad = -2,51) y el  $HSO_4^-$  (log Actividad = -3,2), que provienen de la reacción secundaria del ácido sulfúrico. La mayor distribución de estas especies se encuentra en los suelos más oxidados o acidificados con horizontes Aj, Bj, Oj (*Typic Sulfihemists*, *Typic Sulfaquept*).

En SSA potenciales (horizontes Og de los *Typic Sulfihemists*), se encuentran además formas reducidas de azufre como  $H_2S$  (log Actividad= -1,845) que dan el olor característico a gases de ácido sulfhídrico “huevo podrido”. A medida que se profundiza en los perfiles estudiados, las concentraciones de sulfatos se incrementan debido al contacto directo con el nivel freático cargado con estas sales y a las formas reducidas en horizontes anegados.

**Tabla 4.5** Productos de solubilidad y constantes de equilibrio (25°C) necesarios para calcular los productos de actividad iónica (PAI) en SSA

REACCION		logK <sub>i</sub> <sup>a</sup>	MINERAL SECUNDARIO	
Ca <sup>+2</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + 2H <sub>2</sub> O	⇌	CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	-4.638 <sup>b</sup>	Yeso
Al <sup>+3</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + H <sub>2</sub> O	⇌	AlOHSO <sub>4</sub> + H <sup>+</sup>	-3.23 <sup>c</sup> -3.80 <sup>d</sup>	Jurbanita
Al <sup>+3</sup> + 3 H <sub>2</sub> O	⇌	Al(OH) <sub>3</sub> + 3H <sup>+</sup>	9.66 <sup>b</sup>	Al(OH) <sub>3</sub> amorfo
Al <sup>+3</sup> + 3 H <sub>2</sub> O	⇌	Al(OH) <sub>3</sub> + 3H <sup>+</sup>	8.04 <sup>b</sup>	Gibbsite
3Fe <sup>+3</sup> + 2SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + 7H <sub>2</sub> O	⇌	(H <sub>3</sub> O)Fe(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> + 5H <sup>+</sup>	-5.39 <sup>e</sup>	H-jarosita
K <sup>+</sup> + 3Fe <sup>+3</sup> + 2 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + 6H <sub>2</sub> O	⇌	KFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> + 6H <sup>+</sup>	-9.21 <sup>e</sup>	K-jarosita
Fe <sup>+3</sup> + 12/5 H <sub>2</sub> O	⇌	1/5(Fe <sub>5</sub> O <sub>7</sub> (OH) · 4H <sub>2</sub> O + 3H	5.00 <sup>f</sup>	Ferrihidrita
Fe <sup>+3</sup> + 3 H <sub>2</sub> O	⇌	Fe(OH) <sub>3</sub> + 3H <sup>+</sup>	3.54 <sup>b</sup>	Fe(OH) <sub>3</sub> amorfo
Fe <sup>+3</sup> + 2 H <sub>2</sub> O	⇌	FeO(OH) + 3H <sup>+</sup>	1.39 <sup>b</sup>	Lepidocrocita
4Al <sup>+3</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + 11H <sub>2</sub> O	⇌	Al <sub>4</sub> (SO <sub>4</sub> )(OH) <sub>10</sub> · H <sub>2</sub> O + 10H <sup>+</sup>	24 <sup>d</sup>	Basaluminita amorfo
K <sup>+</sup> + 3Al <sup>+3</sup> + 2 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + 6H <sub>2</sub> O	⇌	KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub> + 6H <sup>+</sup>	-1.4 <sup>g</sup>	Alunita
Fe <sup>+3</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + 7H <sub>2</sub> O	⇌	Fe(SO <sub>4</sub> ) · 7H <sub>2</sub> O	-2.46 <sup>b</sup>	Melanterita
Fe <sup>+3</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + 7H <sub>2</sub> O	⇌	Fe(SO <sub>4</sub> )(OH) · 5H <sub>2</sub> O + H <sup>+</sup>	-10.06 <sup>h</sup>	
8Fe <sup>+3</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + 14H <sub>2</sub> O	⇌	Fe <sub>8</sub> O <sub>8</sub> (OH) <sub>6</sub> SO <sub>4</sub> + 22H <sup>+</sup>	-18 <sup>i</sup>	Schwertmannita

<sup>a</sup> Constantes de equilibrio para 25°C.

**Fuente:** <sup>b</sup>Lindsay (1979); <sup>c</sup>Van Breemen (1973); <sup>d</sup>Nordstrom (1982); <sup>e</sup>Ball & Nordstrom (1991); <sup>f</sup>Bigham (1996); <sup>g</sup>Parkhurst (1999); <sup>h</sup>Sullivan et al. (1988<sup>a</sup>), referenciados por Ludwig et al. (1999).

Las concentraciones de Al<sup>3+</sup> incrementan notoriamente cuando las bases son bajas en la solución, como en horizontes Oj de los *Typic Sulfohemists* con la siguiente relación (Tabla 4.7): Al>Ca>Mg>K>Na, lo cual demuestra que la oxidación de este tipo de suelos no es compensada por minerales que presenten cationes básicos en su estructura y consecuentemente se presenta un mayor proceso de acidificación y desilificación que en SSA minerales. Este fenómeno se relaciona con el incremento en las concentraciones de Si soluble (Tabla 4.6) en el suelo y en aguas freáticas.

Las altas concentraciones del Al<sup>3+</sup> soluble (3 a 13 Cmol<sup>(+)</sup> L<sup>-1</sup>) se presentan principalmente como sulfatos de AlSO<sub>4</sub><sup>+</sup> y Al<sup>3+</sup> libres en solución (Tabla 4.7) que incrementan aún más la acidificación por los productos de hidrólisis (Ludwig, et al., 1999), lo que repercute en los efectos tóxicos. Por eso, en suelos de mayor concentración álica, como en los *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfosaprists*, aparecen áreas escaldadas por efecto de la degradación química en horizontes superficiales.

---

Respecto a los cationes solubles, las formas iónicas más comunes son  $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Al}$ , en Bwg (*Sulfic Endoaquepts*) y  $\text{Ca} > \text{Al} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K}$  en Bgj de los *Typic Sulfaquepts*, (Tabla 4.6), mientras que en horizontes Og de los *Typic Sulfihemists* u Og subsuperficiales del piso lacustre, se presenta la siguiente relación  $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$ , con una tendencia a ser SSA salinos sódicos. Los cationes forman sus respectivos pares iónicos con el anión sulfato y favorecen el proceso de neutralización de estos horizontes (Gómez, 2006; Bibi, 2012). La mayor distribución y concentración de cationes básicos en la fase soluble de los *Sulfic Endoaquepts* representa un menor impacto de los procesos de sulfatación, que se ve reflejado en áreas recuperadas y aptas para cultivos.

Los *Sulfic Endoaquepts* son suelos menos afectados por condiciones sulfatadas ácidas, que presentan las menores concentraciones de aluminio extractable con presencia de precipitados amorfos de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  o gibsita ( $\text{pPAI} = 8,5 - 8,9$ ) (Tabla 4.7). Estos minerales amorfos de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  son dominantes en horizontes orgánicos Og con pH mayores a 4,5, donde coincide con menores concentraciones de  $\text{Al}^{3+}$  soluble (Tabla 4.6). En SSA orgánicos potenciales (*Typic Sulfihemists*) y horizontes Og profundos, se observa un aumento de las formas de  $\text{H}^+$  y Fe extractable como productos directos de los monosulfuros de Fe ( $\text{pPAI} = -3,92$  a  $-3,45$ ) (Tabla 4.7), calculados como minerales secundarios comunes en estos suelos (Jusop & Muhrral, 2002).

En SSA oxidados, los cálculos de productos de actividad iónica (PAI), han demostrado que la solubilidad del Fe es controlada por la jarosita y shwertmannita (Ludwig et al., 1999; Burton et al., 2006). La Shwertmannita ( $\text{pPAI} = -18$  a  $-18,5$ ) se calcula a partir del producto de actividad de  $\text{Fe}^{+3}$  y  $\text{SO}_4^{-2}$  en solución acuosa. Es un mineral indicativo de procesos de acidificación severa, porque genera 22  $\text{H}^+$  en la formación de un mol del mineral (Tabla 4.5). Este mineral generalmente se forma a pH menor a 3,3 precipitando en superficies de color rojizo naranja (Fitzpatrick et al., 2002). Este mineral secundario se especió en SSA Actuales (*Typic Sulfosaprists*, *Typic Sulfaquepts* y *Typic Sulfohemists*) (Tabla 4.6).

**Tabla 4.6** Composición química de la fase soluble en perfiles modales de SSA.  
Valle alto del río Chicamocha, Boyacá.

PERFIL SSA	Hztes	Espesor cm	pH*	CE dSm <sup>-1</sup>	Ca	Mg	K	Na	Fe	Al	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Cl	Si
					mmol L <sup>-1</sup>								
Sulfic Endoaquepts	Ap	0-10	5,4	1,60	4,20	0,85	1,63	4,88	0,11	0,01	7,21	1,97	0,5
	Bwg	10-55	4,2	0,65	0,95	0,23	0,28	3,30	0,03	0,87	2,58	0,65	0,9
	Bgj	55-80	3,6	3,50	12,59	1,64	0,27	10,48	0,01	0,02	22,31	0,11	1,5
	Oeg	80-110x	4,3	4,10	2,66	1,16	1,18	28,55	0,44	1,05	18,27	7,42	1,2
Typic Sulfaquepts	Ap	0-12	3,8	0,38	0,50	0,27	0,30	1,13	0,25	0,07	1,36	0,01	0,9
	Bwg	12-30	3,81	0,56	1,17	0,26	0,20	0,88	0,01	0,37	2,08	0,03	2,5
	Bgj	30-70	3,50	2,66	12,96	0,81	0,06	1,30	0,02	1,36	19,16	0,02	2,5
	Oe	70-110x	3,50	4,35	9,42	4,30	0,57	13,00	0,75	0,92	27,29	4,91	1,8
Typic Sulfosaprists	Aj	0-15	3,18	2,10	2,55	1,57	0,11	6,23	0,04	1,55	9,28	0,16	3,75
	Oaj	15-35	3,00	3,40	4,47	2,87	0,05	10,75	0,18	1,15	17,69	3,90	3,75
	Bjb	35-60	3,34	3,40	5,06	3,55	0,23	10,93	0,27	3,12	18,57	3,25	2,5
	Ogy	60-100	3,76	9,8	10,55	11,25	1,60	40,30	0,61	0,02	31,70	0,00	3,75
Typic Sulfohemists	A/Oa	0-10	3,4	1,30	1,87	0,32	0,13	1,00	0,03	3,09	7,49	0,02	2,2
	Oa/Oe	10-37	3,3	1,30	1,58	0,33	0,14	1,23	0,07	4,45	8,56	0,03	3,5
	Oe	37-50	3,1	2,10	1,75	0,34	0,11	1,20	0,26	2,93	15,91	0,37	3,5
	Oig	50-110	3,3	1,70	1,58	0,65	0,13	1,10	0,48	13,40	22,70	3,24	3,5
Typic Sulfihemists	Oay	0-25	3,8	7,90	11,44	6,01	3,35	39,70	0,13	0,21	35,53	18,55	0,5
	Oey	25-70	4,2	9,00	10,74	7,65	2,85	50,00	0,99	0,58	39,54	23,29	0,5
	Oeg	70-110x	6,7	11,80	6,67	12,54	3,80	89,20	0,13	0,02	66,31	33,48	0,5

\*pH medido en pasta de saturación; CE cuantificada en extracto con conductivímetro.  
mg L<sup>-1</sup>(ppm)=masa atómica del elemento,mmol L<sup>-1</sup>

Fuente: Gissat, 2006.

Otro indicador de los procesos involucrados en la formación de SSA son las aguas freáticas que guardan una relación directa con la pedogénesis del suelo. En este sentido, por ejemplo, el análisis de especies iónicas en aguas freáticas de los *Typic Sulfihemists* (sector Cucho-Vueltas) reflejó incipientes procesos de sulfatación y predominio de procesos de autoneutralización (Gómez, 2006; Bibi, 2012), por la formación de sales de sulfato de sodio y de calcio, tipo yeso y gipsita (Tabla 4.7). En contraste, en aguas freáticas de *Typic Sulfohemists* (sector Vargas-Cucho), predominan sulfatos con formación de sales metálicas de reacción ácida (AlSO<sub>4</sub><sup>+</sup>, FeSO<sub>4</sub><sup>+</sup>), factores que indican alta oxidación y degradación del medio.

A partir de los análisis de especiación de la fase soluble del suelo y aguas freáticas, también se identificó la jarosita, que caracteriza horizontes sulfúricos. De los cálculos de producción iónica se identificó jarosita en los

horizontes sulfúricos de los *Typic Sulfaquepts*, *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfosaprists*, con una clara diferencia respecto a la especie de jarosita, que evidencia el grado de evolución de los horizontes sulfúricos.

**Tabla 4.7** Especies solubles y productos de actividad iónica en aguas freáticas de SSA. Valle alto del río Chicamocha.

Perfil modal	Formas iónicas solubles dominantes	Productos de actividad iónica
Typic Sulfaquepts	<b>Iones:</b> $\text{SO}_4^{2-} > \text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Cl} > \text{Fe} > \text{Al}^{3+} > \text{Si} > \text{K}^+$ <b>Sales:</b> $\text{CaSO}_4 > \text{MgSO}_4 > \text{FeSO}_4^+ > \text{NaSO}_4 > \text{Al}(\text{SO}_4)^+$	$\text{Fe}(\text{OH})_3$ amorfo, yeso, jurbanita, caolinita, K-jarosita
Typic Sulfohemists	<b>Iones:</b> $\text{SO}_4^{2-} > \text{Al}^{3+} > \text{Si} > \text{Ca}^{2+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Cl}$ <b>Sales:</b> $\text{AlSO}_4^+ > \text{FeSO}_4^+ > \text{Al}(\text{SO}_4)_2 > \text{CaSO}_4$	$\text{Fe}(\text{OH})_3$ amorfo, H-jarosita, jurbanita, yeso.
Typic Sulfosaprists	<b>Iones:</b> $\text{SO}_4^{2-} > \text{Na} > \text{Cl} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Si} > \text{Al}^{3+} > \text{K}^+$ <b>Sales:</b> $\text{CaSO}_4 > \text{MgSO}_4 > \text{NaSO}_4 > \text{FeSO}_4^+ > \text{Al}(\text{SO}_4)_2$	Yeso, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ amorfo, K-jarosita, jurbanita.
Typic Sulfihemists	<b>Iones:</b> $\text{SO}_4^{2-} > \text{Na} > \text{Cl} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K} > \text{Fe} > \text{Si} > \text{Al}$ . <b>Sales:</b> $\text{NaSO}_4 > \text{MgSO}_4 > \text{CaSO}_4 > \text{KSO}_4$	Yeso, albita, gibsitita, feldespatos potásicos, cuarzo, ferrihidrita.
Sulfic Endoaquepts	<b>Iones:</b> $\text{Na} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Si} > \text{Fe} > \text{Al}$ <b>Sales:</b> $\text{NaSO}_4 > \text{CaSO}_4 > \text{MgSO}_4 > \text{KSO}_4 > \text{Al}(\text{SO}_4)^+$	Gibsitita, yeso, anhidrita, basaluminita, jurbanita.

Fuente: Gómez (2006); Gissat (2006).

En este sentido, para horizontes sulfúricos orgánicos se calculó H-jarosita (pPAI= -5,39), especie dominante bajo procesos de sulfatación extremos en ausencia de minerales cristalinos y predominio de  $\text{H}^+$  (Ludwig, 1999). En contraste, para SSA minerales actuales es común la K-jarosita (pPAI= -9,21), lo anterior debido a que en estos suelos es mayor el  $\text{K}^+$  soluble (Tablas 4.5 y 4.7), y de acuerdo con el PAI puede ser producto de la meteorización de las micas o feldespatos potásicos, como ocurre en Bgj de los *Typic Sulfaquepts*.

En todos los horizontes se presentaron formas de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  en estado amorfo, como se observa en la Tabla 4.7, lo cual indica productos de hidrólisis completa o incompleta de jarosita o reacción por precipitación de formas de  $\text{Fe}^{+3}$  (Breemen, 1982; Burton, 2006). En los *Sulfic Endoaquepts* se forma específicamente ferrihidrita, mineral que indica a  $\text{pH} > 4,5$  la fuerte hidrólisis y transformación de jarosita ferrihidrita. Estos hidróxidos de hierro imprimen los colores rojizos característicos de las condiciones redoximórficas en este tipo de suelos que se ubican en las unidades Ministerio y Tibasosa.

Bajo procesos de autoneutralización en los *Typic Sulfosaprists*, *Typic Sulfaquepts* y *Typic Sulfihemists*, el yeso aparece como el mineral secundario que más controla la solubilidad del  $\text{Ca}^{2+}$  en horizontes con altas concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  disponible (Tabla 4.7), como se deriva de los cálculos de PAI del  $\text{CaSO}_4$  soluble donde se determinó un equilibrio para el yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ( $\text{pPAI} = -4,6$  a  $-4,8$ ), mineral que se evidenció en campo y se determinó en la evaluación de la sección delgada (Figura 4.33).

La formación de este mineral secundario representa fenómenos de autoneutralización y depende del calcio intercambiable y las sales solubles de  $\text{CaSO}_4$  que existen en el medio, fenómeno ampliamente reportado por Ludwig *et al.* (1999) y Bibi (2012).

**4.2.4 Procesos redox.** Otro proceso característico del estado de sulfatación de los suelos es la oxidorreducción, fenómeno que cambia drásticamente el comportamiento de los elementos en el suelo, principalmente oxígeno (O), carbono (C), nitrógeno (N), azufre (S), hierro (Fe) y manganeso (Mn), los cuales determinan en gran parte la génesis de suelos sulfatados ácidos (Hinrich *et al.*, 2001; Hicks *et al.*, 2002).

La solubilidad y formación de minerales de Fe, Al y S en SSA depende del pH y del potencial redox (Dear *et al.*, 2002; Breemen, 1982). La solubilidad del Fe y el S es controlada por reacciones redox del Fe, catalizadas por la oxidación microbiana de compuestos de carbono (Zapata, 2004). Esta energía, que genera las reacciones redox en SSA, son intensificadas por el rompimiento de la molécula orgánica y el flujo fuerte de electrones que son aprovechados por parte de las bacterias reductoras de azufre y hierro para formar sulfuros de hierro estables en medios anegados con potenciales redox negativos que varían entre 0 y  $-220$  mV (Dent & Dawson, 2000; Lamontagne *et al.*, 2004).

En contraste, cuando se oxigena el medio por prácticas de aireación (labranza y drenaje), la oxidación se incrementa y se generan valores positivos de Eh (mV), por el paso de los diferentes estados de oxidación del hierro ( $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ) y el azufre ( $\text{S}^0$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ), estables en medios ácidos (Breemen, 1982; Brock, 1987; MDBA, 2011).

---

**Relación potencial redox-Eh y acidez.** Para la evaluación del potencial redox en SSA del DRACH, se hicieron 117 mediciones de pH y Eh en campo, y de Al intercambiable en el laboratorio. Los suelos muestreados en el área de la planicie fluviolacustre del valle alto del Chicamocha mantienen diferentes estados de oxidoreducción. Se tuvieron en cuenta las características redoximórficas de cada horizonte muestreado, que evidenciaban las condiciones redox y de acidificación en los suelos de estudio. En la caracterización de SSA predominan horizontes superficiales con condiciones de mayor oxidación (alto potencial redox) y en menor proporción condiciones reducidas de horizontes subsuperficiales minerales encontrados entre 0,8 y 1,5 m de profundidad.

La Figura 4.22 muestra que para SSA continentales lacustres, el potencial redox es inversamente proporcional al mayor grado de acidez. Allí se establecen modelos lineales para horizontes Bg y Og, comunes de los *Typic Sulfihemists* (SSA potenciales), donde a pH por encima de 6,0, se expresan condiciones reducidas por saturación continua de la lámina freática de horizontes subsuperficiales. En estas circunstancias, por la disolución de sulfatos y sulfuros se forman monosulfuros de hierro con pH mayores de 6,0 y Eh (mV) negativos, particularidades de materiales sulfídicos, fenómeno corroborado por Mensvoort y Quang (1988) y Lamontagne *et al.*, (2004).

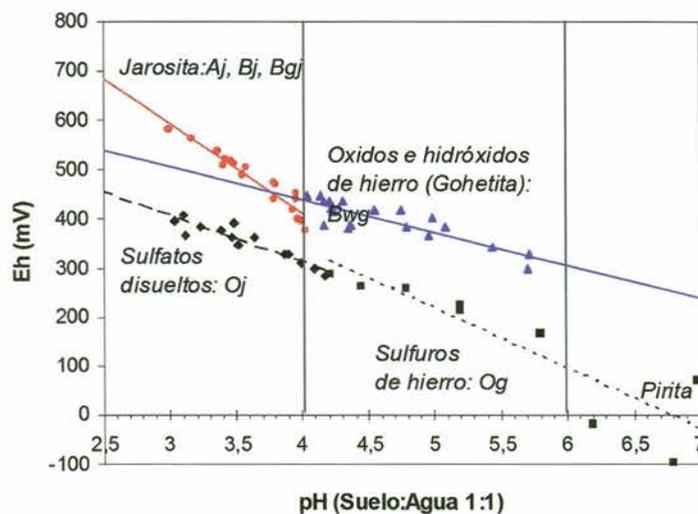
Los procesos de reducción en el suelo aumentan el pH, por el consumo continuo de protones o hidrógeno; en cambio, las reacciones de oxidación disminuyen el pH, por la producción de protones que acidifican el medio, con la consecuente aparición de minerales y horizontes característicos de SSA dependientes del pH (Zapata, 2004).

Es importante notar que para horizontes Ap se presenta la misma relación entre pH versus Eh, pero bajo un modelo potencial, donde, a medida que aumenta el pH o disminuye la acidez, no se obtienen valores negativos en el potencial redox. El fenómeno anterior se explica porque estos horizontes son superficiales, con menos afectación por las condiciones ácuicas que los B y O, además están más alterados por efectos de laboreo y exposición al ambiente. Los horizontes A presentan escasas condiciones redoximórficas evidentes en campo, a excepción de horizontes con mayor materia orgánica

como los Aj, que presentan mayor impacto por la generación de extrema acidez, procesos que se expresan en áreas escaldadas y crecimiento restringido de cultivos (Gómez et al., 2005).

Evaluando el comportamiento del pH y el Eh para SSA agrupados por horizontes minerales y orgánicos, se definen dos dinámicas de oxidorreducción debido a la constitución orgánica o mineral de los materiales.

En SSA, los procesos redox ejercen una fuerte dinámica química, demostrada por la presencia de jarosita en medios ultraácidos (horizontes Bj y Bgj de los *Typic Sulfosaprists* y *Typic Sulfaquepts* analizados). Estos horizontes sulfúricos coinciden con  $Eh > 400$  y  $pH < 4,0$ . Cuando el pH es superior a 4,0 en horizontes Bwg de los *Sulfic Endoaquepts*, coincide con la dinámica en la formación de óxidos e hidróxidos de hierro como la ferrihidrita o goetita a Eh entre 100 y 500 mV (Breemen, 1982; Gómez, 2006).

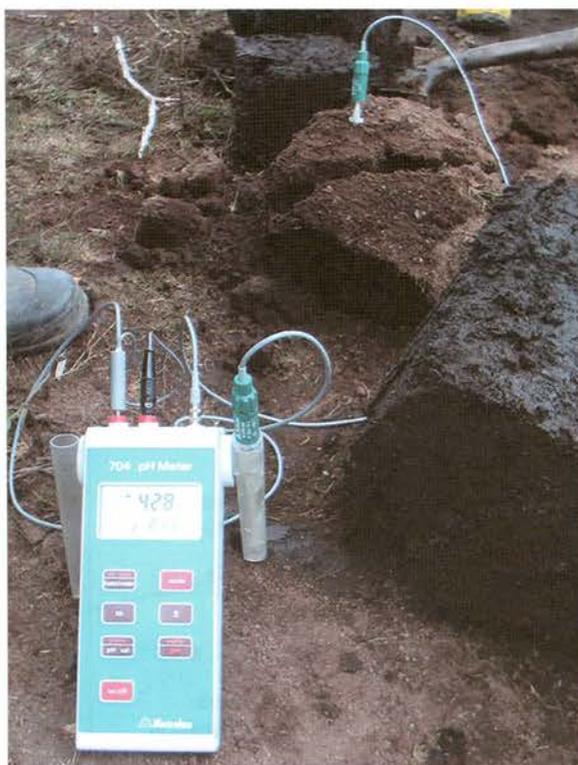


**Figura 4.22** Diagrama Eh-pH en horizontes minerales y orgánicos de SSA. Valle alto del río Chicamocha. Fuente: Gómez (2006).

Los pH analizados en horizontes orgánicos (Oj) sulfúricos de los *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfosaprists*) presentan un rango entre 2,5 y 4,0 y valores de Eh entre 300 a 450 mV (Figuras 4.22, 4.23), medidos en pasta de saturación en laboratorio, valor que coincide con la lectura realizada en suelos con una humedad por encima de capacidad de campo (Figura 4.23).

Este rango concuerda con determinaciones hechas por Mensvoort y Quang (1988) para SSA con baja formación de jarosita.

De otra parte, se observa para horizontes profundos Og y Cg que el Eh varía entre 300 a -100, con pH que oscilan en un rango entre 4 a 7 (Figura 4.22). Bajo estas condiciones, se pueden formar sulfuros de hierro, como pirita, asociados a desechos orgánicos descompuestos en zonas lacustres (Breemen, 1982; Lamontagne et al., 2004).



**Figura 4.23** Determinación del potencial redox en campo: lectura de  $Eh > 400\text{mV}$  en horizontes sulfúricos de los *Typic Sulfohemists*, esta evaluación debe hacerse con humedad del suelo cercana de punto de saturación.

**Fuente:** Gissat (2006).

Mensvoort y Quang (1988) concluyen que la baja formación de jarosita en SSA orgánicos es debida a la mayor constitución de materiales orgánicos, lo cual regula el potencial redox con niveles de Eh (mV) menores a 400 y Eh (mV) entre 400 a 450 para SSA con una mezcla mineral y orgánica. Bajo condiciones extremas de acidez en la formación de SSA orgánicos,

los sulfuros de hierro se oxidan a sulfatos férricos y en menor proporción a jarosita, presentando, al igual que en SSA minerales, limitaciones en el ámbito agrícola y ambiental, principalmente por la disolución de  $Fe^{3+}$  y  $Al^{3+}$  soluble.

En la Figura 4.22, la menor pendiente del modelo lineal del pH muestra que horizontes sulfúricos de SSA actuales orgánicos presentan condiciones de acidificación y oxidación con pH menores a 3,5 y Eh (mV) no mayores a 450, con una menor evolución de las condiciones redox de los horizontes minerales (Aj, Bj y Bgj), que indican Eh mayores a 500 y pH menores a 3,5. Estos parámetros diferencian e identifican horizontes sulfúricos orgánicos, minerales, y estiman los minerales involucrados en esta dinámica (Tabla 4.8). La relación entre el potencial redox y el tipo de mineral característico de condiciones sulfatadas ácidas, coincide con parámetros determinados por Breemen (1982), Mensvoort y Quang (1988), Hicks *et al.* (2002) y Gómez *et al.* (2005).

**Tabla 4.8** Formación de minerales que identifican SSA con respecto al pH y al potencial redox Eh (mV)

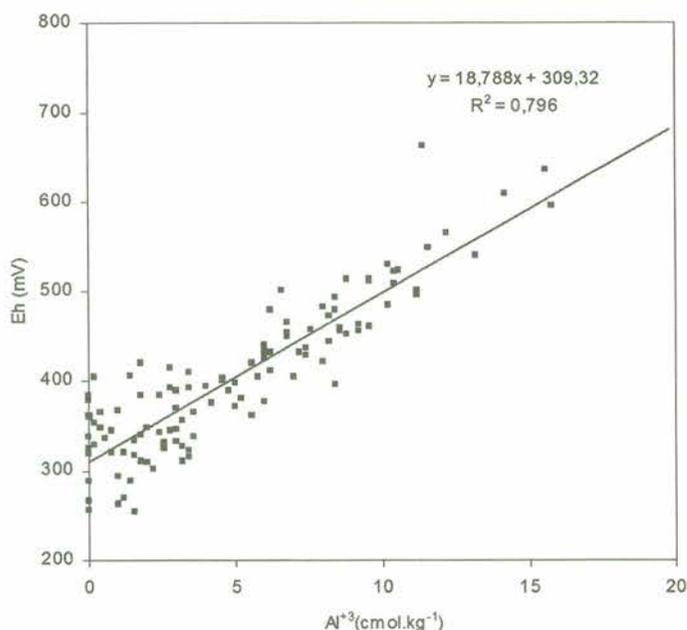
pH	Eh (mV)	Mineral precipitado	Color
< 3,7	400 a 1200	jarosita	Amarillo
2-7	100 a 500	Gohetita	Naranja, pardo rojizo
4,5-12	-400 a 1000	Hidróxidos de hierro	Rojizos
<4	300-400	Sulfatos ferrosos	Gris a negro rojizo
<4	-100 a 200	Sulfuros de hierro	Gris oscuro
5-8	-500 a 0	Pirita	Negro
3,5-7		Yeso	Cristales traslúcidos

**Fuente:** Breemen (1986); Mensvoort & Quang (1988); Gómez *et al.* (2005).

**Relación entre el aluminio de cambio y el potencial redox-Eh (mV).** Aunque la dinámica del  $Al^{3+}$  no depende naturalmente de las condiciones redox, sino de los procesos de hidrólisis (Zapata, 2004), en SSA los productos de hidrólisis del  $Al^{3+}$  se relacionan indirectamente con las condiciones redox, por la reacción con compuestos oxidados que forman sulfatos metálicos como la alunita, jurbanita y la disolución de minerales arcillosos por parte del ácido sulfúrico que produce formas libres de  $Al^{3+}$  en solución (Frink, 1972; Gómez *et al.*, 2005). Estas formas solubles iónicas y de sulfatos de aluminio se especiaron en horizontes sulfúricos en los suelos de estudio.

Con la relación significativa y consistente del número de muestras analizadas (n=117) en SSA continentales del valle alto del Chicamocha, se estableció un modelo para estimar la medida del potencial redox (Eh), utilizando como variable el  $Al^{3+}$  intercambiable:

$$Eh(mV) = Al \text{ intercambiable (cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}) \cdot 18,788 + 309,32 \quad (4.19)$$



**Figura 4.24** Comportamiento del potencial redox y aluminio de cambio ( $Al^{3+}$ ) KCl 1N, en horizontes diagnósticos de SSA actuales. Valle alto del río Chicamocha-Boyacá.

**Fuente:** Gómez et al. (2005).

Lo anterior se ilustra en la Figura 4.24 donde se observa una correlación significativa directa y proporcional entre el Eh (mV) y el aluminio de cambio, de tal manera que la mayor oxidación genera mayor acidificación y disolución de formas de aluminio intercambiable en un rango crítico que identifica horizontes sulfúricos con valores superiores a 5  $cmol \text{ kg}^{-1}$  de  $Al^{3+}$ ,  $pH < 4$  y  $Eh > 400$  mV, parámetros que, en conjunto, se utilizan para la identificación de SSA oxidados. Se estima igualmente que cuando el  $Eh > 330$  mV, el aluminio comienza a ser tóxico (Gómez et al., 2005).

**4.2.5 Maduración de SSA.** El concepto de maduración incluye los procesos físicos, químicos y biológicos de depositación de materiales lacustres y

---

su posterior transformación, después del desecamiento o drenaje de los suelos (Dent & Pons, 1995).

La maduración física está relacionada directamente con la pérdida irreversible del agua. Los sedimentos arcillosos y orgánicos depositados en medios lacustres anegados presentan una débil estructura y consecuentemente, el espacio poroso está saturado de agua. La estructura es fácilmente deformada con una alta porosidad total dentro de los agregados, y no existen poros gruesos, de tal manera que la conductividad hidráulica es baja, a excepción de la presencia de poros gruesos dejados por raíces antiguas (Dent & Pons, 1995).

Durante la sedimentación en medios lacustres, el agua se pierde como resultado del drenaje, evaporación y extracción por las plantas. La evaporación y transpiración son procesos que aceleran el estado de maduración del suelo, por la mayor resistencia que se necesita para remover el agua de los pequeños poros de los sedimentos.

***Estimativos de propiedades mecánicas relacionadas con la humedad del suelo y procesos de maduración (n-value).*** Concepto utilizado para simplificar y definir el grado de madurez física de sedimentos lacustres (materiales sulfídicos y horizontes sulfúricos). Según Soil Survey Staff (2010), el valor *n* es útil para predecir si un suelo puede ser pastoreado por el ganado o está en capacidad de soportar otras cargas, y para predecir el grado de subsidencia que puede ocurrir después del drenaje. Para materiales minerales del suelo que no sean tixotrópicos, el valor de *n* se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\text{valor } n = (A - 0.2R) / (L+3H) \quad (4.20)$$

**A**= % de agua en el suelo en condiciones de campo calculado con base en el peso de suelo seco. **R**= % de limo + arena. **L**= % arcilla. **H**= % de materia orgánica (% carbono x 1.724)

Para la interpretación de este parámetro, se utilizan los siguientes valores:

---

$n < 0,7$ : material maduro, firme, particularmente no pegajoso, no puede ser apretado entre los dedos.

$n = 0,7$  a  $1,0$ : material medianamente maduro; es moderadamente firme, tiende a pegarse a las manos, y puede ser amasado pero no apretado entre los dedos. Su contenido de agua se encuentra entre 55 y 65 %. En suelos no alterados puede soportar el peso de maquinaria liviana, dificultad en la labranza.

$n = 1,0$  a  $1,4$ : material moderadamente blando, pegajoso y puede ser apretado entre los dedos. Su contenido de agua es entre 65 y 70 % y su fuerza mecánica es baja cuando es alterado. Labranza muy limitada por hundimiento y pegajosidad.

$n = 1,4$  a  $2,0$ : material prácticamente inmaduro, es muy blando (lodo); puede ser apretado entre los dedos por una presión ligera. Su contenido de agua es entre 70 y 80 %. Un hombre se puede hundir hasta sus muslos a menos que haya vegetación de soporte.

$n > 2,0$ : barro totalmente inmaduro, es fluido, fluye entre los dedos. En sedimentos predominantemente minerales, el contenido de agua es  $> 80$  % en masa.

***Evaluación de la madurez de SSA del valle alto del río Chicamocha.*** De acuerdo con la determinación del valor  $n$  realizado para SSA de estudio, se observa que, en general, los suelos del distrito son medianamente maduros, con *valor n* que varía entre 0,7 a 1,0 (Figura 4.25). Esto se explica por la mayor oxidación y acidificación causada por más de 60 años de drenaje a las tierras que conforman la planicie fluvio lacustre del valle.

De esta manera se observan horizontes inmaduros orgánicos correspondientes a SSA potenciales de los *Typic Sulfihemists* con un *valor n* de 1,1, para suelos de madurez intermedia, como los *Typic Sulfosaprists* y *Typic Sulfohemists*, se observan *valores n* entre 0,7 a 1,0 y SSA maduros como los *Typic Sulfaquepts* y *Sulfic Endoaquepts* con  $n < 0,7$ . La densidad aparente es usualmente un indicador de la madurez para SSA, como se observa en la Figura 4.25, lo que coincide con relaciones encontradas por

Dent (1986) para suelos fluvio-marinos en el norte de Nueva Zelanda, donde, densidades mayores a  $0,8 \text{ g cm}^{-3}$  generalmente expresan madurez y oxidación en condiciones sulfatadas ácidas. Esta característica facilita reconocer las restricciones en el uso de maquinaria, de tal manera que suelos con  $n > 0,7$  comienzan a presentar restricciones en el uso de maquinaria pesada en su laboreo.

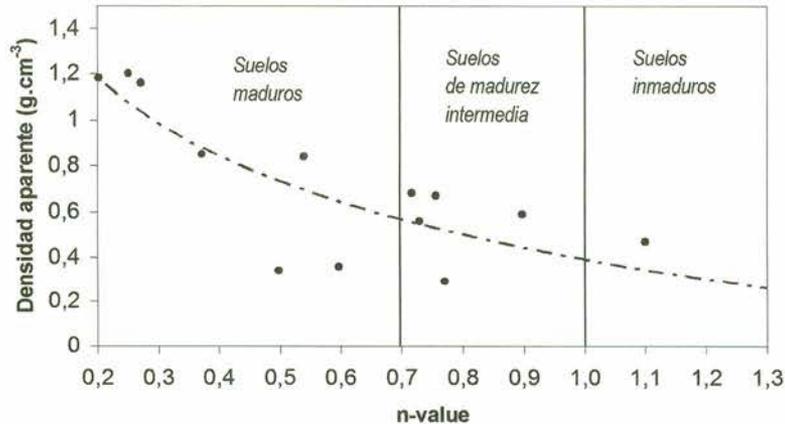


Figura 4.25 Relación entre la densidad aparente y la madurez del suelo (valor n) en SSA del valle del río Chicamocha.

Fuente: Gómez (2006).

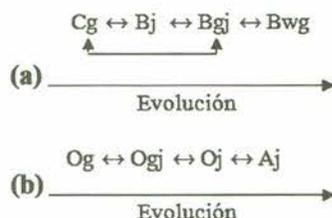
### 4.3 EVOLUCIÓN DE SSA EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CHICAMOCHA

**4.3.1 Secuencia evolutiva de horizontes diagnósticos y su relación con perfiles pedogenéticos.** A partir del muestreo y análisis detallado en campo y laboratorio de las 2756 ha inventariadas en este estudio, junto con el conocimiento de los factores y procesos ya analizados, se pudo establecer la relación entre las características diagnósticas de SSA y la secuencia de horizontes y perfiles pedogenéticos. Las propiedades identificadas en cada horizonte, que en su conjunto caracterizan el perfil modal de suelos, están asociadas con características geomorfológicas, químicas, físicas, morfológicas y micromorfológicas de horizontes sulfúricos o materiales sulfídicos.

En este análisis se determinaron y aplicaron subíndices específicos que distinguen la clase de los procesos y describen el desarrollo de horizontes en los perfiles de suelos (Dent, 1986).

Posterior al drenaje, las sales solubles se lavan y comienzan los procesos de maduración de horizontes anegados en áreas fluviolacustres. Donde no hay desarrollo de SSA, el drenaje facilita el normal establecimiento de cultivos en poco tiempo, pero donde se presentan estos suelos y no existe una capacidad de autoneutralización de los productos ácidos provenientes de la oxidación de sulfuros de hierro, el pH cae dramáticamente y se forman horizontes sulfúricos (Dent & Pons, 1995).

Debido a que la zona de estudio ha sido un área drenada, los SSA del DRACH se identifican por ser SSA actuales con el desarrollo principal de horizontes minerales sulfúricos con transición a cámbicos, seguidos por horizontes orgánicos sulfúricos y, en menor proporción, materiales sulfúricos que se encuentran en profundidad.



**Figura 4.26** Secuencia evolutiva en el desarrollo de horizontes en SSA del Valle Alto del Chicamocha. (a) Secuencia en el desarrollo de horizontes minerales. (b) Secuencia en el desarrollo de horizontes orgánicos.

Fuente: Gómez (2006).

La Figura 4.26 ilustra la posible secuencia del desarrollo de horizontes minerales y orgánicos en SSA del DRACH. Esta evolución se manifiesta después del drenaje, debido a los procesos de oxidación, con cambios en la formación de minerales, características morfológicas, químicas, y maduración física (*valor n*), como se describe en la Tabla 4.9.

Tomando como referente lo tratado por Soil Survey Staff (2010), Dent (1986), Pons y Breemen, (1982), a continuación se presenta la descripción de horizontes minerales y orgánicos encontrados en SSA.

**Descripción de horizontes minerales diagnósticos en SSA.** La caracterización de horizontes diagnósticos facilita determinar la evolución dentro del perfil y definir el tipo de SSA para su clasificación y manejo.

Horizonte Cg. Una vez la vegetación se ha establecido en la zona pantanosa, ocurre la sedimentación de partículas minerales finas y orgánicas que constituyen las arcillas lacustres en el fondo del lago. Su formación depende de la ubicación del área depresional y del tiempo de permanencia del régimen ácuico. Son materiales sulfídicos de condición permanentemente reducida. Dent (1986) los define como Gr o G y los denota como materiales hidromórficos inmaduros con *valor n* mayor a 1, y generalmente confinados por una lámina de agua.

**Tabla 4.9** Descripción de horizontes minerales y orgánicos encontrados en SSA continentales lacustres del valle alto del río Chicamocha, Boyacá, Colombia.

Cg	Capas prácticamente inmaduras (valor $n > 1$ ), permanentemente reducidas con acumulación de sulfuros de hierro y color gris gleyzado.
Bj	Horizonte ultraácido, con abundantes y contrastantes características redoximórficas amarillo pálido de jarosita y pocas a comunes rojizas de hidróxidos de hierro, sobre una matriz gris oscura; maduración media o mayor, puede presentar alguna reserva de sulfuros de hierro (valor $n$ 0,7-1,0).
Bgj	Horizonte ultraácido a muy fuertemente ácido con abundantes y contrastantes características redoximórficas rojizas de hidróxidos de hierro amorfos y pocas a comunes, amarillas, de jarosita (por hidrólisis fuerte de jarosita) gris oscura o gris parda; suelo maduro (valor $n < 0,7$ ).
Bwg	Horizonte fuertemente ácido, no presenta condiciones extremas de acidez ni se evidencia jarosita, dominan abundantes características redoximórficas rojizas de ferrihidrita, goetita o hematita contrastantes en una matriz gris pardas oscuras; en algunos casos puede presentar formas de yeso, suelo maduro (valor $n < 0,7$ ).
Aj	Horizonte superficial mineral con alta influencia de materiales orgánicos, reacción ultraácida con evidencia de características redoximórficas de jarosita y rojos naranjas de Shwertmanita. Eh positivos. Horizontes maduros con $n < 0,5$ .
Oj	Horizonte superficial orgánico y ultraácido, no evidencia características redoximórficas de H-jarosita, puede contener partículas de sulfuros de hierro, Eh positivos. Prácticamente maduro con $n < 0,5$ .
Ogj	Horizonte de transición entre materiales orgánicos sulfídicos y horizontes sulfúricos orgánicos Oj, con maduración media, con $n$ entre 0,5 - 1.
Og	Materiales sulfídicos orgánicos prácticamente inmaduros con $n > 1$ y Eh negativos.
Ogy	Horizonte orgánico con presencia de yeso y materiales sulfídicos, caracteriza procesos de autoneutralización.

**Fuente:** Gómez (2006), adaptado de Dent (1986); Dent & Pons (1995); Pons & Breemen (1982) en SSA tropicales.

---

Los materiales orgánicos provenientes de la vegetación lacustre son fuente de energía para la actividad de bacterias reductoras de azufre y la formación de sulfuros de hierro. Esta característica los define como materiales sulfídicos, es el principal horizonte de acumulación de monosulfuros de hierro. La concentración de sulfato total es variable pero puede llegar a valores mayores a 2 % de S total (Dent, 1986), como ocurre con valores de S total descritos en el piso lacustre del DRACH (Gómez, 2006). Sus condiciones redoximórficas se caracterizan por colores grises (gley).

En el desarrollo del horizonte Cg, se distinguen las siguientes características:

- Colores grises oscuros (2,5 Y, 5 Y) o grises verdosos oscuros (2,5 B, 5 B), comúnmente con moteados negros (10 YR) alrededor de las fisuras dejadas por las raíces.
- Prácticamente inmaduros con *valor n* entre 0,7 a 1, sin estructura y con apariencia “mantequillosa”.
- Poros muy finos y dendríticos.
- Respecto al límite del horizonte, son finamente estratificados con mezcla de sedimentos muy finos y orgánicos, no muestran una estratificación regular sin estructura.
- Olor fuerte a sulfuro de hidrógeno
- Se encuentran irregularmente a una profundidad entre 1,2 y 2 m.
- pH entre 5,5 a 6,5.
- Valores de Eh entre 200 mV a -200 mV.
- Valores de S total mayores a 2 %.
- Reacción muy fuerte al peróxido de hidrógeno.
- Permanentemente saturados de agua.

En SSA del valle del río Chicamocha, estos materiales se encuentran de forma irregular dependiendo de la forma de terreno y depositaciones lacustres. Se caracterizaron en los *Typic Sulfosaprists* a una profundidad de 1,2 m, localizados en la cubeta inferior y a profundidad no mayor a 2 m en las demás unidades de suelos. Las características fisicoquímicas del horizonte Cg se describen en la Tabla 4.9.

---

Horizonte Bj. Al drenarse el horizonte Cg, se oxidan rápidamente los materiales sulfídicos con una caída dramática del pH y se forma jarosita en medios ultraácidos, de tal manera que da origen al horizonte Bj. En los suelos de estudio, este horizonte sulfúrico se encuentra en los *Typic Sulfosaprists* con las siguientes características morfológicas, físicas y químicas, que comprueban algunos aspectos diagnósticos descritos por Dent (1986).

- Predominan características redoximórficas de colores amarillos pálidos de k-jarosita (2,5 Y 8/6; 2,5 Y 7/4) entre las caras de los ped y en los poros (recubren canalículos de raíces) abundantes y contrastantes, y pocas a comunes rojizos de oxihidróxidos de hierro, sobre una matriz gris oscura.
- pH menores a 3,5.
- Suelos moderadamente maduros (*valor n* menor a 0,7), textura arcillosa, estructura moderada a débil.
- Pueden contener aún materiales de sulfuros de hierro que estarían en posibilidad de reaccionar y acidificarse.
- La salinidad persiste a profundidad en contacto con el nivel freático.
- Valores de Eh mayores de 400 mV.
- Valores de S total entre 1-1,6 %.
- Espesor del horizonte entre 15-30 cm.
- Se encuentra entre 30 y 80 cm de profundidad de la superficie del perfil.

En la sección delgada de los Bj se evidencia una estructura débil y texturas finas ( $Ar > 60\%$ ), de color pardo grisáceo claro. Como rasgos pedológicos se presentan rellenos completos e incompletos de jarosita en los canales, y hacia el borde de los mismos se observan fenómenos de hidrólisis bajo la forma de recubrimientos de hidróxidos de hierro en capas delgadas (Figura 4.27).

La ocupación del espacio poroso por parte de la jarosita limita físicamente el movimiento interno del agua afectando la conductividad hidráulica.



**Figura 4.27** Sección delgada del horizonte Bj de SSA valle alto del río Chicamocha. Microfotografía de luz polarizada, lente conoscópica, nicols paralelos a 140 aumentos.

Fuente: IGAC (2006).

Horizonte Bgj. Cuando el drenaje se mantiene en suelos bajo condiciones sulfatadas ácidas, el horizonte Bj cambia a Bgj por procesos fuertes de hidrólisis y lavado, este también se puede formar directamente por la transformación del Bwg (Dent, 1986). Su característica típica es el mayor predominio de condiciones redoximórficas de hidróxidos de hierro de color rojizo y naranja sobre la jarosita, distinguiéndose un nuevo horizonte subsuperficial con los siguientes aspectos:

- Matriz gris parda a oscura (10 YR 4/2, 7,5 YR 5/1), con moteados y recubrimientos de jarosita (2,5 Y 8/4) alrededor de los poros y fisuras, con depósitos irregulares delgados de hidróxidos de hierro pardos rojizos (10 YR 5/8, 5YR 4/8) y sobrepuestos y más abundantes que la jarosita. En horizontes Bgj más jóvenes se encuentran masas de hierro rojas oscuras (2,5 YR 2,5/3) cubiertas por precipitados de jarosita.
- Los rangos de pH varían entre 3,5 y 4,0.
- Suelos maduros con  $n < 0,7$ .
- La estructura varía de prismática a bloques angulares, en profundidad se presentan fisuras verticales.
- La salinidad persiste en profundidad en contacto con el nivel freático.
- En la sección control, el horizonte se encuentra entre 30 a 100 cm.
- Espesor del horizonte entre 15 a 40 cm.
- Horizonte de baja conductividad hidráulica.

---

En SSA del valle alto del río Chicamocha, los horizontes B<sub>gj</sub> se encuentran en los *Sulfic Endoaquepts* y en los *Typic Sulfaquepts*. En campo, se describen a una profundidad entre 30 a 80 cm de la superficie, con características típicas redoximórficas de hidróxidos de hierro rojos muy oscuros tipo ferrihidrita (2,5 YR 2,5/3); pocos, rojo amarillentos (5 YR 4/8) comunes y amarillo pálidos de jarosita (2,5 8/4), pocos, presentes en masas irregulares o en hipocutanes recubriendo superficialmente las caras de los pedos, los poros, y asociados a los canalículos de las raíces (Figura 3.3).

Son horizontes sulfúricos de transición con un estado de oxidación intermedia entre los B<sub>j</sub> y los B<sub>wg</sub>, con sulfatos solubles en agua mayores al 0,1 %. Presentan texturas arcillosas y moderado contenido en carbono orgánico.

En la sección delgada de los B<sub>gj</sub> (Figura 4.28) se evidencia un plasma masivo que contrasta con una textura fina con arcillas mayores a 60 %, de color pardo grisáceo claro. Presenta una microestructura surcada por canales elongados, cilíndricos, irregulares y algunos ramificados, y, en menor cantidad, cavidades.

Los poros presentan segregación (manchas de hierro en sus bordes) e hipocutanes de hidróxidos de hierro amorfos (producto de la actividad iónica). Los hidróxidos de hierro son impregnativos en la matriz de arcilla con color amarillo ocre pasando a pardos rojizos en varios tonos, estos se producen por difusión y oxidación en forma de bandas continuas y discontinuas por hidrólisis de la jarosita a diversas formas de hidróxido de hierro como ferrihidrita (Figura 4.28). Estas condiciones muestran claramente los fuertes procesos de oxidorreducción y la transición del horizonte sulfúrico jarosítico a la formación de hidróxidos de hierro como ferrihidrita.

En la Figura 4.28 se observa el canal de una raíz recubierto por jarosita de color amarillo pardo en área adyacente a la matriz arcillosa (izq). Subsecuentemente, la jarosita es hidrolizada y precipita en forma de hidróxidos de hierro amorfos, tornándose de un color pardo rojizo en diversos tonos (der.). La transición anterior muestra la hidrólisis de la jarosita y formación de hidróxidos de hierro, como ferrihidrita-goetita.



**Figura 4.28** Sección delgada del horizonte Bgj (izq). Condiciones redoximórficas en horizontes Bgj (transición de jarosita a ferrihidrita) (der). SSA valle alto del río Chicamocha. Microfotografía con nicoles paralelos a 140 aumentos.

**Fuente:** IGAC (2006), Gissat (2006).

Horizonte Bwg. Son los horizontes de transformación más evolucionados de los SSA; de reacción moderada a fuertemente ácidos, no presentan condiciones extremas de acidez ni se evidencia jarosita, dominan características redoximórficas rojizas de óxidos de hierro, abundantes y contrastantes en una matriz gris parda oscura; suelo maduro (*valor  $n < 0,7$* ). La duración de la etapa de extrema acidez en horizontes Bj o Bgj, depende de la reserva de sulfuros de hierro que contengan y de la tasa de oxidación (Dent, 1986; Breeman, 1982).

El desarrollo del horizonte Bwg puede deberse a varias causas: una, a partir de una fase inicial extremadamente ácida, causada por la oxidación de sulfuros de hierro. Este fenómeno puede permanecer por décadas hasta el agotamiento de la fuente de sulfuros y el lavado continuo de los ácidos libres, formándose hidróxidos de hierro en los poros y fisuras del suelo hasta no evidenciarse jarosita, minimizándose los niveles de sulfato soluble por lavado y facilitando el establecimiento de cultivos.

En este sentido, se forma un horizonte cámbico desaturado en bases, pero con predominio de  $Al^{3+}$ , como es característico en los horizontes Bwg de los *Typic Sulfaquepts* y los *Sulfic Endoaquepts* de estudio, con saturaciones de aluminio mayores a 80 % y sulfatos solubles menores a 0,05 %.

Por otra parte, se puede relacionar con una fase de acidez residual causada por la lenta hidrólisis de la jarosita a hidróxidos de hierro, y procesos alternos

---

de autoneutralización asociados a formas de Ca soluble causado por la estacionalidad climática. En épocas secas existe la liberación de ácidos y en épocas húmedas se dan los procesos de hidrólisis con precipitación de formas de  $\text{Fe}^{3+}$ . Este proceso puede durar años y facilita la colonización gradual de raíces por el lavado de ácidos, dependiendo de la fluctuación del nivel freático. Los efectos negativos en su maduración son de carácter físico con problemas relacionados con el sellamiento del espacio poroso que afectan el comportamiento hidrodinámico del agua.

En suelos del valle alto del río Chicamocha, el desarrollo del horizonte Bwg se observa en los *Sulfic Endoaquepts* y los *Typic Sulfaquepts* y depende de la fluctuación y profundidad del nivel freático, con un mayor desarrollo en la cubeta superior en áreas moderadamente drenadas, con mayor lavado de ácidos solubles. Las siguientes características morfológicas, físicas y químicas que identifican horizontes Bwg, caracterizan los SSA de estudio y se relacionan con descripciones hechas por Breeman (1982).

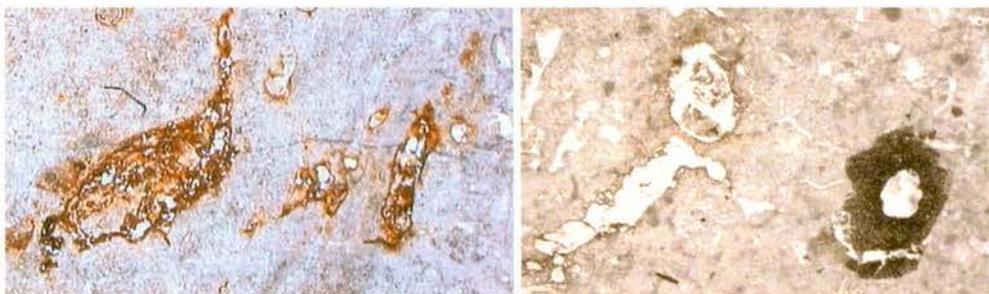
- Físicamente maduro, *valor n* menor a 7,0.
- Características redoximórficas gruesas a medias contrastantes, rango del color de la matriz de pardo grisáceo oscuro (10 YR 2,5/2) a pardo grisáceo rojizo.
- Fuerte desarrollo de estructura, media a gruesa, prismática, recubrimientos orgánicos y férricos entre las caras de los peds y en los poros.
- pH en campo entre 4,0 y 5,0; nivel donde los requerimientos de encalamiento son menores que en horizontes sulfúricos, con un mejor crecimiento de vegetación.
- Baja salinidad, CE menor a 2dS  $\text{m}^{-1}$ .
- Bajo sulfato soluble, menor a 0,1 %.
- Baja saturación de bases, menor a 40 %, alta saturación de aluminio: mayor a 60 %.
- En campo, los Bwg se localizan a una profundidad entre 20 a 60 cm de la superficie, con características típicas redoximórficas de óxidos de hierro, rojos muy oscuros (2,5 YR 2,5/3) abundantes, rojo amarillentos (5 YR 4/8) comunes, presentes en masas irregulares o en hipocutanes,

---

recubriendo superficialmente las caras de los peds, los poros, y asociado a los canalículos de las raíces.

En campo, se observan sobre una matriz parda con formación de óxidos de hierro rojizos oscuros (hematita), pardos rojizos (ferrihidrita), sobre las caras de los peds y recubriendo las fisuras del suelo.

En la sección delgada de los Bwg (Figura 4.29), se evidencia un plasma masivo relacionado con las concentraciones de arcilla mayores a 70 %, surcado por abundante cantidad de canales y cavidades ovoides, irregulares y heterométricos donde se forman nódulos de hierro, que guardan paralelismo con el eje C del perfil. Respecto a los rasgos pedológicos, presentan revestimientos e hiporevestimientos de óxidos hidratados de hierro que impiden el movimiento interno del agua en el suelo, limitando la conductividad hidráulica. Los cutanes son de color rojizo oscuro y los hipocutanes de color naranja; en la matriz se encuentra difundidas manchas de hierro en forma de mosaico.



**Figura 4.29** Sección delgada del horizonte Bwg: óxidos hidratados de hierro, rojizos oscuros (hematita) y naranjas (ferrihidrita) (izq.). Corte transversal mostrando sellamiento de poros por óxidos hidratados de hierro en horizontes Bwg (der). SSA Valle alto del río Chicamocha.

**Fuente:** IGAC (2006).

### ***Descripción de horizontes orgánicos y órgano minerales diagnósticos.***

Horizontes Og - Ogy. Caracterizados por ser materiales sulfídicos orgánicos subsuperficiales y prácticamente inmaduros con  $n > 1$ , Eh negativos y S total mayores a 2 %. En la sección delgada, la materia orgánica se observa como acumulaciones de residuos orgánicos de plantas y raíces abundantes. Estos fragmentos frescos son de color negro y se observan también procesos

de oxidación de formas férricas que se difunden en la matriz (Figura 4.30). Las características anteriores coinciden con la identificación de materiales sulfídicos (formas de sulfuros de hierro asociadas a desechos orgánicos descompuestos) de acuerdo con descripciones de secciones delgadas en SSA hechas por Dent (1986), Wagner *et al.* (1982) y Wada y Seisuwan (1988).

Estas propiedades se identifican en las secciones delgadas de los Aj y Og en SSA orgánicos de los *Typic Sulfosaprists*, *Typic Sulfihemists* y *Typic Sulfohemists* ubicados en la cubeta inferior del valle alto del río Chicamocha.

De acuerdo con Wada y Seisuwan (1988), en horizontes donde se dan las condiciones para la formación de sulfuros de hierro, estos se ubican en racimos dentro de las células de los tejidos de residuos de plantas o dispersos en la matriz del suelo. El número y la densidad de las partículas tienden a aumentar con el mayor estado de descomposición de los materiales orgánicos, y son rodeados por halos rojizos de óxidos de hierro. Las partículas de piritita pueden ser transportadas separadamente y acumularse con los sedimentos arcillosos lacustres en horizontes Cg o Bj.



**Figura 4.30** Partículas de sulfuros de hierro (color negro) asociadas a los residuos de tejidos orgánicos distribuidos en la matriz de SSA. Se observa la oxidación de estos materiales, generando color ocre en la matriz de horizontes Aj, Oj y Og (microfotografía a color con nicols paralelos, luz polarizada a 43,75 aumentos). Valle Alto del Río Chicamocha.

**Fuente:** IGAC (2006).

Como rasgos pedológicos, en algunos horizontes (*Typic Sulfihemists*) se observan abundantes cristales idiotípicos de yeso, característica que identifica a los horizontes Ogy. Los cristales son de tamaño superior a 20 micras, desde muy finos hasta grandes mayores de 1 mm. Estos se

encuentran como unidades individuales y están relacionados con poros inped y exped, que dependen del tamaño de los agregados (Figura 4.31). Esta marca genética demuestra fenómenos de autoneutralización de formas ácidas provenientes de la oxidación de sulfuros de hierro en medios con alta concentración de formas solubles de Ca (Dent, 1986; Nettleton et al., 1982).



**Figura 4.31** Vista microscópica de cristales de yeso en el horizonte Oj de los *Typic Sulfohemists*. Cubeta inferior de la planicie fluvioacustre del río Chicamocha. Se observan cristales de diferentes tamaños que reflejan claramente la luz.

**Fuente:** IGAC (2006).

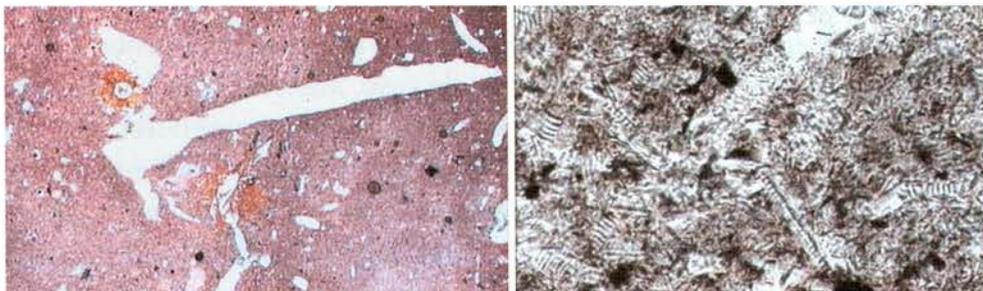
Horizonte Oj. El horizonte Oj se desarrolla a partir del drenaje de materiales orgánicos potenciales Og, con una maduración creciente por la pérdida de agua; además, si se encuentra en superficie, se transforma a horizontes Aj. De otra parte no se evidencian claramente características redoximórficas de jarosita, particularidad común en SSA orgánico (Dent, 1986; Mensvoort, 1988).

La formación de jarosita en los *Typic Sulfohemists* se observa en forma esporádica con la aparición de betas amarillas claras. Esta clase de SSA son reconocidos por su reacción ultraácida ( $\text{pH} < 3,5$ ) y las altas concentraciones de sulfatos solubles superiores a 0,1 %.

Dent (1986) explica que la baja acumulación de jarosita en materiales orgánicos se debe a la liberación continua de formas solubles de hierro. Bajo estas condiciones, los sulfuros de hierro oxidan frecuentemente a formas de sulfatos ferrosos solubles sin precipitar a jarosita (Mensvoort et al., 1988).

Las observaciones micromorfológicas en horizontes Oj de los *Typic Sulfohemists* del valle alto del río Chicamocha, confirman la naturaleza de fragmentos finos orgánicos compactados y la frecuente mezcla con sedimentos minerales finos arcillosos (Figura 4.32), los cuales inciden en una baja conductividad hidráulica y baja porosidad, características observadas por Mensvoort *et al.* (1988) en SSA orgánicos del Delta de Mekong en Vietnam. De otra parte, en la fracción mineral se presentan formaciones de hidróxidos de hierro.

Otro aspecto para resaltar en horizontes sulfúricos orgánicos Oj y que demuestra la transformación de horizontes orgánicos, es la presencia de material silificado de plantas, lo cual evidencia procesos de alteración del Silicio (Si) bajo condiciones sulfatadas ácidas (Figura 4.32). Breemen (1982) explica que la formación de estos fósiles microscópicos se debe a la alta disolución del Si en medios sulfatados ácidos, con una acumulación de SiO<sub>2</sub> amorfo sobre las plantas (calculado también como producto de actividad iónica IAP), constituyendo réplicas que permanecen con una excelente preservación, como se observa microscópicamente en detalle en la sección delgada de horizontes Oj de *Typic Sulfohemists*.



**Figura 4.32** Microfotografías en horizonte Oj: fragmentos finos orgánicos mezclados con sedimentos minerales finos (izq); material de plantas silificadas en *Typic Sulfohemists* (der).

Fuente: IGAC (2006).

Horizonte Aj. Horizonte superficial resultado de la maduración de horizontes Oj, con alta influencia de material orgánico. Se presenta en *los Typic Sulfosaprists* y *Typic Sulfohemists*, manifiesta una mayor dinámica de oxidorreducción que los Oj, evidenciándose características redoximórficas de K-jarosita e hidróxidos de hierro amorfos.

---

Estos horizontes se encuentran en los *Typic Sulfosaprists* y *Typic Sulfohemists* que se desarrollan en suelos de la cubeta inferior por exposición de materiales sulfídicos orgánicos en superficie, los cuales, al drenarse, se oxidan perdiendo gradualmente el carbono y se convierten así en un horizonte mineral Aj por transformación del Oj. Las áreas lacustres más bajas de la planicie, se caracterizan por presentar una menor influencia de material coluvial y por ser las últimas áreas drenadas, por ello la característica orgánica y órgano-mineral de estos horizontes (sector Vueltas y Vargas).

**4.3.2 Secuencia evolutiva de perfiles modales de SSA en la planicie fluvio lacustre del valle alto del río Chicamocha.** La Figura 4.33 ilustra una posible secuencia evolutiva de los SSA del valle alto del río Chicamocha. Primero se definen dos grandes grupos de evolución: SSA orgánicos y SSA minerales. La evolución de los SSA de estudio depende de la posición dentro de la planicie fluvio-lacustre, el espesor de colmatación de los materiales coluvio-aluviales y la proximidad de los horizontes sulfúricos a superficie.

De acuerdo con las Figuras 4.33 y 4.34, en la cubeta inferior próxima al área pantanosa y lacustre, en el reborde de los coluvios, se encuentra el **estado A**, que representa el suelo más joven. Es un SSA orgánico (*Typic Sulfohemists*), que puede llegar a oxidarse, pero presenta fenómenos fuertes de autoneutralización con la formación de yeso, identificado en horizontes Oey. El suelo presenta el mayor % S total con valores superiores a 2 % y hasta 16 %, lo cual demuestra condiciones de SSA potenciales inmaduros. Estos se encuentran en zonas depresionales con mayor acumulación de materiales orgánicos (MO > 30 %) e influencia de material coluvial calcáreo (Figura 4.34). El **estado B** representa suelos orgánicos (*Typic Sulfohemists*), los cuales se encuentran en la cubeta inferior, en el área depresional de la planicie fluvio-lacustre, en una etapa de evolución intermedia y presencia de horizontes sulfúricos hísticos muy superficiales, lo cual demuestra la fuerte oxidación de materiales, originando áreas escaldadas. El **estado C** (*Typic Sulfosaprists*) constituye una etapa de transición entre SSA orgánicos y minerales (*Typic Sulfaquepts*), que se encuentra entre la cubeta superior e inferior, cuya evolución de horizontes sulfúricos evidencia jarosita. Este perfil puede representar el último estado de acidificación identificando SSA de maduración intermedia.

---

En la secuencia evolutiva siguen los SSA minerales distribuidos en la cubeta superior cercanos a las áreas coluvio-aluviales. Estos presentan una mayor evolución y definen el **estado D** (*Typic Sulfaquepts*) con horizontes sulfúricos superficiales (más cercanos a la cubeta inferior) y el **estado E** (*Sulfic Endoaquepts*), los cuales presentan horizontes sulfúricos a profundidad y horizontes cámbicos en superficie con mayor espesor de materiales coluvio-aluviales. Allí, alguna vez se manifestaron procesos de sulfatación, y, por efecto del lavado y transformación de minerales de Fe y S, muestran la fuerte evolución de estos hasta convertirse en horizontes desaturados con presencia de óxidos de hierro (cámbicos).

Los materiales sulfúricos se transformaron en horizontes sulfúricos en unas pocas décadas, cuando la zona sufrió el proceso de drenaje hace 60 años (maduración). Los sulfatos ferrosos provenientes de la oxidación formaron ácido sulfúrico y sulfatos solubles. En ausencia de sedimentos minerales, se conformaron horizontes sulfúricos hísticos (estado B), como en suelos minerales, donde se evidencia claramente jarosita producto de la oxidación de sulfatos ferrosos que se difunden dentro de las zonas de oxidación y se acumulan en profundidad bajo condiciones redoximórficas amarillas pálidas sobre materiales lacustres finos, formando horizontes sulfúricos minerales en profundidad (estados C y D).

A medida que existe mayor lavado de sulfatos y el pH sube a valores superiores a 4,0, la jarosita es lentamente hidrolizada a hidróxidos de hierro (ferrihidrita) y en superficie aparecen moteados pardos rojizos (estados D y E). La diferencia entre estos dos estados es la profundidad a la cual aparece del horizonte sulfúrico (Bgj), que para el estado D aparece más superficial con respecto al estado E.

En épocas de lluvia, los procesos de reducción movilizan el hierro y el sulfato de la superficie y de forma descendente lavan las formas ácidas, mejorando las condiciones químicas del suelo. A lo largo del tiempo se forman más óxidos férricos y estos suelos llegan a ser los más evolucionados (en términos de madurez pedológica, no de edad absoluta) y más drenados (*Sulfic Endoaquepts*, estado E), perdiendo más agua y acelerando el proceso de maduración física con un aumento progresivo de la densidad aparente y menores valores de *valor n*.

La diferencia entre horizontes se encuentra a profundidad. La mayor evolución se presenta en la superficie y menor evolución en horizontes profundos saturados con aguas freáticas, donde se estiman formas de monosulfuros de Fe, por las mayores concentraciones de S total, Fe total, pH cercanos a la neutralidad y Eh negativos, que indican procesos de sulfhidrización actuales en el piso lacustre (Figura 4.34).

Un indicativo químico de evolución u oxidación se puede observar con los parámetros de S total y el porcentaje de materia orgánica, donde los procesos de drenaje y acidificación muestran una relación con valores de S total menores a 1 % en SSA evolucionados (*Typic Sulfaquepts* y *Sulfic Endoaquepts*), entre 1-2 % para una evolución intermedia, y mayores a 2 % S total, para SSA más jóvenes, generalmente relacionados con materiales sulfídicos (Figura 4.34).

Los SSA jóvenes presentan mayor contenido de materia orgánica, con contenidos superiores al 30 % (*Typic Sulfohemists*); los procesos de drenaje generan oxidación con una pérdida gradual de carbono orgánico a medida que el suelo es más evolucionado. La evolución antes mencionada está relacionada directamente con el grado de oxidación.



Figura 4.33 Secuencia evolutiva de perfiles modales de SSA de la planicie fluvio lacustre del Valle Alto del río Chicamocha.

Fuente: Gissat (2006)





# CAPÍTULO 5

---

## **MANEJO ESPECÍFICO POR SITIO DE LOS SUELOS SULFATADOS ÁCIDOS DEL VALLE ALTO DEL RÍO CHICAMOCHA**



## 5. MANEJO ESPECÍFICO POR SITIO DE LOS SUELOS SULFATADOS ÁCIDOS DEL VALLE ALTO DEL RÍO CHICAMOCHA

De acuerdo con la investigación desarrollada por el Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos (Gissat), durante el periodo 2002-2012, mediante trabajos científicos de laboratorio, invernadero y campo, y teniendo en cuenta las características propias de los SSA, se definieron los siguientes lineamientos para abordar el manejo específico por sitio de los SSA:

1. Identificación *in situ* de características sulfatadas ácidas a través de indicadores.
2. Definición de unidades o fases de manejo de SSA, de acuerdo con su grado de limitación.
3. Prácticas de manejo recomendadas para superar limitaciones en SSA.

Cada uno de estos planteamientos propuestos y validados por Gissat, se discuten a continuación, centrando la atención en el manejo más apropiado que deben recibir los SSA del valle alto del río Chicamocha, según su grado de limitación o improductividad.

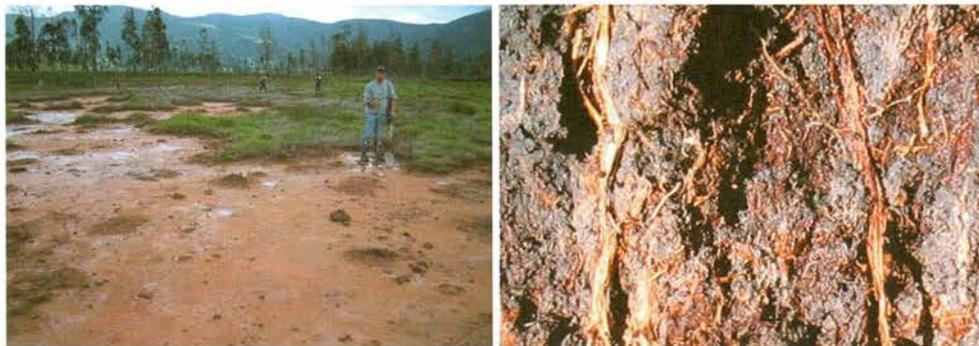
### 5.1 IDENTIFICACIÓN *IN SITU* DE CARACTERÍSTICAS SULFATADAS ÁCIDAS A TRAVÉS DE INDICADORES

La inspección en campo de las características del suelo, del agua y de la cobertura vegetal de las áreas afectadas, proporciona una clara evidencia para diagnosticar la presencia de SSA *in situ* y proyectar el manejo de los aspectos relacionados con su problemática. Durante la realización del levantamiento y muestreo de los suelos del DRACH, se evidenciaron

características importantes para la identificación de SSA continentales, que sirven de indicadores para conocer el estado actual o potencial de la acidez y las limitaciones que asociadas a esta afectan en diferente grado la productividad del suelo.

**5.1.1 Identificación de características redoximórficas y morfogenéticas en campo.** Las características redoximórficas y morfogenéticas visibles de mayor reconocimiento en la identificación de SSA tienen que ver con la presencia de superficies escaldadas con recubrimientos superficiales de sales metálicas, precipitados férricos recubriendo raíces, exposición de materiales oxidados por efecto de drenajes y detección de horizontes sulfúricos y cristales de yeso en el interior del perfil del suelo.

**- Recubrimientos superficiales de sales metálicas.** Este fenómeno se observa en los SSA bajo estudio, limitando considerablemente el comportamiento hidrodinámico (conductividad hidráulica e infiltración) y el crecimiento vegetal. Esta característica se deriva principalmente del ascenso de aguas freáticas cargadas de sales metálicas de hierro y aluminio que, bajo condiciones de extrema oxidación y acidez, se disuelven y luego precipitan como formas amorfas de hidróxidos de hierro y férrico-alumínicas, creando en la superficie capas de suelos improductivas (Figura 5.1).



**Figura 5.1** Superficies afectadas por recubrimientos superficiales de sales metálicas causados por precipitados de hierro en SSA (izq.). Precipitados férricos que recubren las raíces y sellan el espacio poroso en SSA (der). Valle alto del Chicamocha.

**Fuente:** Gissat (2006).

**- Características redoximórficas fuertes en el perfil.** Condiciones redoximórficas pardo rojizas o amarillas pálidas abundantes en una matriz

gris clara a oscura, al voltear los suelos y exponerlos al aire, son indicativos de SSA actuales. Esta evidencia se observa en las áreas circundantes a los drenajes y al realizar el volteo superficial con la labranza del suelo (Figura 5.15, sección 5.3.1).

En estados evolucionados de oxidación, los SSA presentan características redoximórficas y recubrimientos amarillos pálidos de jarosita, como sucede en los *Typic Sulfosaprists* y *Typic Sulfaquepts*, de los sectores Vueltas y Duitama, respectivamente.

Una característica típica de estos suelos es la matriz gris oscura con características redoximórficas contrastantes; moteados amarillos pálidos claros de jarosita en *Typics sulfosaprist* y pardo rojizos en *Typic Sulfaquepts*, generalmente en el límite del nivel freático (Figura 5.2).



**Figura 5.2** Horizontes sulfúricos en SSA: presencia de moteados de jarosita en *Typic Sulfosaprist* (izq) y de hidróxidos de Fe en *Typic Sulfaquepts* (der.) sobre una matriz gris oscura a clara en límites con el nivel freático.

**Fuente:** Gissat (2006).

Por debajo del nivel freático o en áreas continuamente saturadas de agua, se observa en algunos suelos una apariencia gleyzada o pardo grisácea con la exposición al aire. El color gris es característico de áreas inundadas y procesos redox. El gris verdoso oscuro y el gris oscuro son indicadores de la formación continua de sulfuros debido a una fuente permanente de

---

sulfatos por vertimiento de aguas subsuperficiales. En el área estudiada, estas condiciones se observan en suelos mal drenados y susceptibles de inundación, lo que determina la presencia de SSA.

Los SSA ricos en materia orgánica que permanecen pobremente drenados no presentan jarosita. Esos suelos generalmente se caracterizan por moteados pardo-rojizos. Los SSA turbosos rara vez muestran jarosita y son difíciles de identificar mediante esta caracterización cualitativa de condiciones redoximórficas (Mensvoort, 1988).

- **Presencia de cristales de yeso a través del perfil.** Se pueden observar también depositaciones superficiales o a profundidad de cristales de yeso en las fisuras superficiales que deja el suelo en épocas secas como sucede en los *Typic Sulfihemists* (Figura 5.3), lo cual demuestra la fuente continua de sulfatos y la capacidad de neutralización de los mismos por la asociación de diferentes formas del calcio en el suelo.



**Figura 5.3.** Presencia de cristales de yeso a través del perfil de SSA, caracterizados por procesos de autoneutralización, *Typic Sulfihemist*, sector Vueltas, Cucho.

**Fuente:** Gissat (2006).

El yeso es producido como resultado de la neutralización de ácido sulfúrico por prácticas de enclamiento o por la presencia de cationes básicos dominantes como Ca, Mg y Na en el suelo; esto puede ser un indicativo visible en SSA orgánicos o de horizontes hísticos por el mayor tiempo de contacto de sus componentes y menor interferencia con otros minerales que afecten su estabilidad (Dent & Dawson, 2000).

En el sector norte de los límites del DRACH existe la presencia de materiales y sedimentarios calcáreos originados por sedimentos superficiales de la formación Tibasosa que afloran originando importantes depósitos de calizas en el sector de Nobsa-Belencito y Tibasosa-Sogamoso. Estos sedimentos están colmatando la planicie lacustre (materiales sulfídicos y horizontes sulfúricos) y forman en profundidad abundantes cristales de yeso, observados en los *Typic Sulfihemists* y en los *Sulfic Endoaquepts*, que se caracterizaron en los sectores de Ministerio, Monquirá y Cuche. Este atributo facilita la productividad e incide en menores limitaciones de tipo agrícola. Son características típicas de suelos pseudosulfatados.

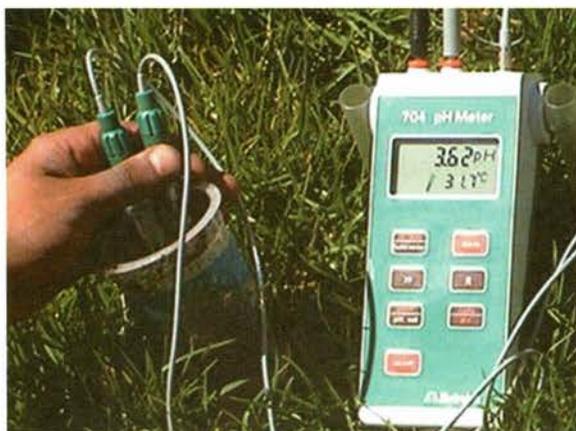
Es importante notar que la construcción de drenajes puede exponer materiales sulfídicos profundos, por esto en muchos casos es necesario examinar cuidadosamente el perfil y cada uno de sus horizontes. Es posible encontrar materiales calcáreos de tipo geogenético enterrando materiales sulfídicos, en cuyo caso se pronostica un proceso de autoneutralización del suelo (Castro et al., 2006).

**5.1.2 Valoración de parámetros químicos del suelo en campo.** Los análisis de campo pueden usualmente confirmar la presencia de suelos sulfatados ácidos, porque son, en la mayoría de los casos, un indicador confiable para diagnosticar la severidad y riesgos de la acidez. A continuación se describen algunas determinaciones químicas que se pueden obtener en campo para identificar SSA:

- **pH del suelo in situ menor a 3,5:** si el pH determinado en campo es menor a 3,5 o se encuentra en el rango de 3 a 3,6, tiene alta tendencia a ser SSA actual; si el pH del suelo se encuentra entre 4 y 4,5, dicha tendencia disminuye. Los pH mayores a 4,5 en SSA disminuyen significativamente su riesgo de toxicidad de  $Al^{3+}$  (Gissat, 2006). La extrema acidez es definitiva para detectar la presencia de SSA actuales y además permite diferenciarlos de otros suelos minerales u orgánicos donde no ocurre este rango de pH (Figura 5.4).

- **Medida del potencial redox (Eh) mayores a 400 milivoltios (mV):** la alta dinámica de oxidación del Fe y el S en SSA, hace que esta medida sea

muy importante para conocer el estado de los procesos redox, tal como lo resaltan en sus investigaciones Breemen (1982), Mensvoort y Quang (1988). El Eh en SSA actuales u oxidados debe ser mayor a 400mV, lo que se correlaciona con los horizontes sulfúricos de estudio (sección 4.2.5). Eh mayores a 330 mV comienzan a ser restrictivos por la relación que existe con el aumento en las concentraciones permisibles de aluminio ( $1,5 \text{ Cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ ) para ciertos cultivos como maíz, arveja y lechuga. Según Zapata (2004), los  $\text{Eh} < 90\text{mV}$  ya comienzan a reflejar toxicidad por sulfuros.



**Figura 5.4** Medición de pH en campo: obsérvese como el SSA muestreado presenta condiciones ultraácidas de 3,61.

**Fuente:** Gissat (2006).

- **Reacción al peróxido de hidrógeno:** si en suelos con pH mayores a 4, después de aplicar a 5 g de suelo en un *beaker* de polietileno 10 cc de peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), el pH baja 1,5 unidades en suelos arenosos, o 2,5 unidades en suelos arcillosos y orgánicos, existe una alta probabilidad de la presencia de SSA.

Lo anterior se debe a que el agente oxidante ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ataca los sulfuros de hierro y los oxida rápidamente a ácido sulfúrico y a  $\text{SO}_2$  en forma de gas, produciendo una caída dramática del pH, lo cual identifica SSA potenciales si el pH ha caído a valores cercanos o menores a 4.

El uso de esta prueba permite evaluar y caracterizar la profundidad de ocurrencia de los materiales sulfúricos, lo cual puede emplearse como criterio para formular prácticas de adecuación física que eviten perturbar

---

en profundidad dichos materiales. Usualmente, la reacción al término de la mezcla suelo-reactivo se torna de color verde, si genera una acidez severa. Las evaluaciones realizadas mostraron que para SSA minerales y orgánicos es una prueba importante de identificación. Debido a la velocidad de reacción, el pH obtenido por el tratamiento con peróxido es mucho más bajo que el pH obtenido por oxidación durante la prueba de incubación (Soil Survey Staff, 2010).

- **Incubación del pH:** si después de la incubación del suelo, el pH ha caído en media unidad por debajo de pH 4 tomado *in situ*, es un indicativo eficaz de la presencia de SSA potenciales. Para esta prueba, después de muestrear el suelo a través del perfil, si el pH *in situ* es mayor a 4, se guarda la muestra húmeda en una bolsa de polietileno sin sellar y después de un mes se toma el pH. La incubación del suelo en un medio aireado estimula la oxidación de sulfuro, lo cual nos puede indicar la acidez que se genera en SSA. Una vez se hagan los muestreos y mapeos de este indicador de alta tendencia a la oxidación, los resultados de la prueba permiten identificar zonas de alto riesgo de acidificación y zonas de menor riesgo e impacto.

- **Prueba cualitativa de sulfuro de hidrógeno:** el olor característico del ácido sulfídico, como a huevo podrido, indica una fuerte reducción de sulfato a sulfuro, relacionado con la presencia de SSA potenciales. Este cuadro igualmente es producto de la acumulación de materiales y minerales de sulfuro, tipo piritas ( $\text{FeS}_2$ ). En los SSA bajo estudio, este olor se percibe generalmente en el contacto de horizontes orgánicos profundos (>1m) con niveles freáticos.

**5.1.3 Presencia de aguas sulfatadas en canales de drenaje.** Las características percibidas en campo en aguas de drenaje y la determinación de parámetros químicos en aguas de drenaje y de pozos freáticos, se convierten en indicadores confiables para el diagnóstico de problemas de acidez y sulfatación en áreas influidas por SSA actuales oxidados; sin embargo, en SSA potenciales bajo estados de anegamiento, las muestras de agua pueden no cumplir todos los parámetros que se relacionan a continuación:

- **Identificación por color ocre del agua y apariencia de depósitos superficiales:** las aguas de drenaje y superficiales de vallados o desagües adyacentes a los SSA del DRACH, son periódicamente de color ocre traslucido como producto de la oxidación bioquímica del hierro y el azufre a pH <4. (Figura 5.5). En este ambiente de oxidación bioquímica se origina igualmente una apariencia aceitosa metálica sobre la superficie del agua y algunas veces gelatinosa. Esta característica es típica de las aguas de drenaje donde se vierten los productos de la oxidación bioquímica del azufre y el hierro, donde participan las bacterias del género *Acidithiobacillus*.



**Figura 5.5** Aguas de drenaje producto de la oxidación de SSA actuales: se observa el color ocre por precipitados de hierro en fondos de canales y apariencia traslúcida del agua (izq); natas metálicas aceitosas sobrenadando en la superficie (der).

**Fuente:** Gissat (2006).

La extrema acidez asociada con SSA actuales disuelve el aluminio de los minerales del suelo. El aluminio floclula de la suspensión de las arcillas, y en solución se vierte al agua de drenaje, arroyos o ríos. Este elemento es el que da el aspecto traslúcido y cristalino por la disolución de sulfato metálico, indicador altamente confiable de SSA actuales (Figura 5.5).

Cuando las aguas de drenaje sulfatadas ácidas son neutralizadas por materiales básicos *in situ* o se han realizado prácticas agrícolas con materiales encalantes en el suelo, se produce yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) en grandes concentraciones y el agua se torna turbia y de apariencia lechosa y el pH se incrementa. Esta apariencia refleja una sustancial capacidad

de neutralización de SSA, lo cual está asociado con la existencia de suelos pseudosulfatados, los cuales ofrecen menor impacto ambiental y condiciones más favorables para la actividad agrícola.

- **Prueba de sulfatos en aguas freáticas y de drenaje:** el método empleado en campo para verificar la existencia de sulfatos y sulfuros en aguas del DRACH, estuvo dado por la aplicación de cloruro de bario ( $\text{BaCl}_2$ ) al 10 %. Al aplicar al agua freática o de drenaje este reactivo como indicador, se forma un precipitado lechoso de sulfato de bario, su intensidad en el color blanco, indica la presencia de sulfatos en solución (Figura 5.6).



**Figura 5.6** Prueba del  $\text{BaCl}_2$  para identificar sulfatos en aguas freáticas y de drenaje de SSA. La reacción produce un precipitado lechoso.

Fuente: Gissat (2006).

**5.1.4 Afectación de la población biológica en aguas freáticas y de drenaje.** Frecuentemente, los impactos más evidentes causados por la oxidación de SSA, han sido sobre los organismos acuáticos. Al producirse la desoxigenación del agua, se disminuye el contenido de oxígeno disuelto y se afectan comunidades acuáticas de plantas, peces, ranas y aves. Los altos niveles de aluminio en las aguas ácidas pueden causar la frotación de partículas (debido a su efecto floculante), las cuales se agrupan y caen al fondo, dejando el agua con una apariencia cristalina. Esta claridad puede aparecer atractiva, pero indica que el agua es extremadamente ácida para la vida acuática (Sammut, 2000).

En el área de estudio, la ausencia de vida acuática es un indicador sensible de la baja calidad del agua en canales de drenaje y en general del impacto al hábitat. En condiciones extremas de acidez y salinidad, en áreas pantanosas y bordes de canales, es posible encontrar el desarrollo de juncos, como la especie primigenia tolerante, plenamente naturalizada en estos medios (Figura 5.7).



**Figura 5.7** Aguas de drenaje que fluyen de SSA, su condición de extrema acidez y toxicidad por metales tóxicos, impide el crecimiento y proliferación de todo tipo de vida acuática. Se observa solamente el crecimiento de juncos.

**Fuente:** Gissat (2006).

**5.1.5 Formación de áreas escaldadas improductivas y afloramientos salinos.** La ausencia de vegetación es un indicador confiable de condiciones naturales donde se desarrollan SSA. Esta característica muestra localmente sitios donde se manifiesta con mayor severidad el problema de acidez o salinidad e identifica áreas donde se presentan horizontes sulfúricos y características sulfatadas ácidas actuales.

Generalmente, en las posiciones más bajas del paisaje, con una afectación mínima de materiales coluvioaluviales finos en la superficie, se presentan áreas cubiertas por antiguos pantanos que desarrollaron por acumulación de material vegetal, horizontes orgánicos espesos. Al ser drenadas estas áreas, los horizontes orgánicos disminuyeron su espesor quedando expuestos los materiales sulfídicos en superficie. Al oxidarse estos materiales generaron un medio extremadamente ácido y tóxico por metales en solución como Al

y Fe que afectan nocivamente el crecimiento vegetal (Figuras 5.8 izq). De acuerdo con Rosicky *et al.* (2004), el proceso que contribuye a la formación de áreas escaldadas en SSA esta relacionado con la exposición superficial de materiales sulfídicos.



**Figura 5.8** Áreas escaldadas en los *Typic Sulfohemists* del sector Vargas (izq); vegetación de helechos indicadora de condiciones sulfatadas ácidas (der).

**Fuente:** Gissat (2006).

Una vez el área es descubierta por este fenómeno, se acelera la evaporación del agua del suelo facilitando la precipitación de sales metálicas tóxicas. En periodos secos se acrecienta más esta problemática con mayor acumulación de acidez y salinidad. En épocas lluviosas se lavan estos productos tóxicos y pueden contaminar las aguas de drenaje y otras áreas de vegetación adyacentes.

En las unidades de suelos de los *Typic Sulfohemists*, *Typic Sulfosaprists* y *Typic Sulfaquepts* del área de estudio, se presentan zonas escaldadas, principalmente en los sectores Vargas, Vueltas y Cucho, relacionadas con la presencia de horizontes sulfúricos en los primeros 10 cm de profundidad y severos procesos de sulfatación. Esta característica permite la designación de los horizontes Aj u Oj.

Los estudios realizados por Gissat permitieron identificar que SSA actuales muy superficiales, con pH menores a 3,3, generalmente constituyen áreas escaldadas, mientras si el pH se encuentra entre 3,5 a 4,0, el pasto kikuyo comienza a subsistir con pobre anclaje y crecimiento restringido. En estas condiciones pueden aparecer también helechos como indicadores de ambientes edáficos extremadamente ácidos (Figura 5.8 der).

---

Otros factores indirectos asociados con la formación de áreas escaldadas en SSA del valle alto del río Chicamocha se describen a continuación:

- **Transición de la cobertura vegetal de pantano a pasturas:** en áreas drenadas de pantano, una vez el suelo adquiere alguna capacidad de madurez y soporte, es posible, aunque no en todos los casos, el crecimiento incipiente del kikuyo, como una de las especies de mayor tolerancia a estos medios. Si este paso de resiliencia natural o inducida por encalamiento no se sabe interpretar y se asume erróneamente como un área recuperada, se termina pastoreando ganados y descubriendo áreas que debilitan por sobrepastoreo el resurgimiento de vegetación.

- **Desborde de canales de drenajes sulfatados ácidos:** las aguas sulfatadas ácidas producto del drenaje pueden extinguir aun especies vegetales tolerantes, dejando superficies *escaldadas* expuestas a evaporación. Esta condición ocurre con frecuencia en los *Typic Sulfaquepts* y *Typic Sulfohemists* de los sectores Vargas y Ayalas, donde en épocas lluviosas se desbordan los drenajes ocasionando “quemazón” de pasturas.

- **Cambios en el régimen de salinidad:** generalmente en épocas secas se experimentan cambios drásticos en la salinidad de SSA, como se observa en los *Typic Sulfosaprists* del sector Vueltas, lo que llega a incidir en la formación de áreas escaldadas por afloramientos de sales metálicas sulfatadas (Figura 5.9). En el DRACH, este fenómeno también ocurre por la descarga salina no controlada de aguas termales provenientes de las piscinas del municipio de Paipa.

Al ser evacuadas aguas arriba, estas aguas confluyen internamente a las zonas más bajas del valle, aumentando el nivel del caudal y las concentraciones salinas en canales de drenaje, lo que finalmente puede llevar a la formación de áreas escaldadas por desborde de canales o ascenso de aguas freáticas saladas a la superficie. Esta situación afecta considerablemente áreas depresionales del valle, donde se encuentran los *Typic Sulfihemists* y *Typic Sulfohemists* en los sectores Vargas y Vueltas (Figura 5.9).



**Figura 5.9** Áreas escaldadas por efecto de sales y sodio en *Typic Sulfihemists*, unidad de riego Vueltas. Nótese la formación de álcali negro (dispersión de humus) y de álcali blanco (manchas salinas).

**Fuente:** Gissat (2006).

- **Remoción de materiales sulfídicos a superficie:** cuando se remueven o se exponen por acción antrópica materiales sulfídicos a la superficie, debido al laboreo, a la construcción de obras de drenaje, o se realiza la limpieza de vallados en áreas de SSA, se promueve la formación de superficies escaldadas. Este fenómeno se observa en el DRACH y en ocasiones por desconocimiento se incurre en nivelación de terrenos con estos materiales, contribuyendo de esta forma a la ampliación de áreas escaldadas.

## 5.2 DEFINICIÓN DE UNIDADES DE MANEJO DE SSA DE ACUERDO CON SU GRADO DE LIMITACIÓN

Las unidades o fases de manejo se determinaron 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). Este sistema toma características individuales de SSA con valores limitantes que determinan su manejo. Dichas características están relacionadas con la profundidad efectiva del suelo y su estado de acidez (SSAA-SSAP), salinidad, nivel freático, grado de madurez (valor n), textura, clase y disposición de materiales sulfúricos y sulfídicos (Tabla 5.1).

**Tabla 5.1** Criterios para definir unidades de manejo y nomenclatura de leyenda según la valoración de características y limitaciones específicas para SSA.

CLASIFICACIÓN DE LA LIMITACIÓN POR PROFUNDIDAD	Horizonte sulfúrico*o materiales sulfídicos** (a)	Salinidad CE > 4 dS m <sup>-1</sup> (s)	Nivel freático (n)
Muy superficial (< 20 cm)	a <sub>1</sub>	s <sub>1</sub>	n <sub>1</sub>
Superficial (20 - 50 cm)	a <sub>2</sub>	s <sub>2</sub>	n <sub>2</sub>
Moderadamente profundos (50 -80 cm)	a <sub>3</sub>	s <sub>3</sub>	n <sub>3</sub>
Profundos (> 80 cm)	a <sub>4</sub>	s <sub>4</sub>	n <sub>4</sub>

\*pH<3,5/4 ó evidencia de moteados de jarosita ó sulfatos solubles >0,05 % ó S extractable > 300mg kg<sup>-1</sup>; \*\* pH >4-6 y S Total>2 % ó S extractable > a 800 mg kg<sup>-1</sup>.

**Fuente:** adaptado de IRLI (Dent, 1986).

Con base en la información de tipo genético, fisicoquímico y de evaluación de características limitantes tratada en la descripción de perfiles modales de SSA, se crearon tres grupos de manejo diferenciados por la proximidad a la superficie de horizontes sulfúricos o materiales sulfídicos, salinidad y nivel freático. De esta manera se hablará en adelante de los SSA con moderadas, fuertes, y severas limitaciones, lo que se correlaciona en campo respectivamente, con la existencia de áreas productivas, áreas que requieren tratamiento correctivo y áreas escaldadas o improductivas.

Cada delineamiento cartográfico en el mapa está representado por un símbolo, cuya composición y significado se explica con el siguiente ejemplo:

- Símbolo cartográfico identificado en el mapa: **MI**- a<sub>3</sub>s<sub>3</sub>n<sub>4</sub>

**MI:** nomenclatura en mayúscula y negrilla integrada por dos letras que identifican la unidad de suelos y su componente taxonómico, incluyendo el código del perfil modal (ver leyenda mapa de suelos, Anexo 1-CD). Estas dos letras ayudan igualmente a ubicar al usuario que consulta el estudio por corresponder localmente a las iniciales de la unidad de riego del DRACH donde ocurren o tienen dominio los suelos descritos.

a<sub>3</sub>s<sub>3</sub>n<sub>4</sub>: nomenclatura integrada por letras minúsculas y números subíndices que representan en la leyenda las unidades o fases de manejo y su grado de limitación, según los criterios expuestos en la Tabla 5.1. Cada fase de

---

manejo se encuentra identificada en el mapa por un símbolo cartográfico y un color.

**5.2.1 Suelos sulfatados con moderadas limitaciones.** Se relacionan directamente con suelos pseudosulfatados ácidos de origen mineral (*Sulfic Endoaquepts*) y suelos sulfatados potenciales de origen orgánico (*Typic Sulfihemists*), caracterizados por procesos de autoneutralización. Son suelos donde se registran las mejores condiciones para el establecimiento de cultivos y pasturas; cuentan para su manejo con 50 a 60 cm de espesor en su capa arable, por lo que se les agrupa dentro de la fase de manejo moderadamente profunda. Presentan igualmente niveles freáticos fluctuantes, moderadamente profundos a profundos con predominio de aguas ácidas o salino-sódicas, esto último en los SSAP.

Los suelos sulfatados con moderadas limitaciones se encuentran distribuidos espacialmente en la Consociación Ministerio y en la Consociación Cucho, las cuales se describen seguidamente:

**Consociación Ministerio "MI". Fase de Manejo  $a_3s_3n_4$**

Está integrada por suelos minerales que ocupan una área de 667,53 ha de la planicie lacustre del valle alto del Chicamocha (unidades de riego Ministerio, Monquirá y Surba). Esta consociación presenta un nivel de fertilidad medio a alto para cultivos hortícolas y pasturas.

- Componente taxonómico: está representado en el 95 % por los *Sulfic Endoaquepts*, familia muy fina sobre orgánica, caolinítica, semiactiva, isomésica, (fase moderadamente profunda). Es la unidad cartográfica que exhibe el mayor nivel de fertilidad respecto a las demás unidades de estudio.
- Diagnóstico, uso y manejo de la fertilidad: relieve plano a ligeramente plano (0-3 %), suelos moderadamente bien drenados a mal drenados, moderadamente profundos (>50 cm), limitados por horizonte sulfúrico por debajo de 50 cm y nivel freático de aguas sulfatadas salino-sódicas (>80 cm) con  $CE > 4dS\ m^{-1}$  y  $RAS > 15\ %$ , no aptas para riego ni consumo, pueden

---

ascender afectando los cultivos. Capa arable mineral de texturas finas a muy finas y rango de variación en su espesor de 30 a 50 cm, con alta capacidad de soporte (valor  $n < 0,7$ ).

Las limitaciones de típico físico son debidas a las texturas muy finas y a la oclusión del espacio poroso de horizontes subsuperficiales por parte de oxihidróxidos de Fe que impiden una normal aireación, dificultan el laboreo y simultáneamente inciden en una baja infiltración y conductividad hidráulica, por ello se debe propender a riegos más frecuentes y de menor intensidad.

Los suelos de esta consociación presentan densidades aparentes cercanas a  $1,3 \text{ gcm}^{-3}$  en sus horizontes subsuperficiales, definidos por Castro y Gómez (2010) como límite de compactación para subsuelos arcillosos. Esta condición repercute directamente en la disminución del espacio poroso y la difusión de aire en la zona de raíces. Otra limitación tiene que ver con el límite plástico de estos suelos, que se presenta a bajos contenidos de humedad gravimétrica en el horizonte Bwg.

Se sugiere preferiblemente mecanización moderadamente profunda de tipo vertical (rayado con cincel rígido y posterior labranza con cavadora de azadones), evitar el volteo con arado de disco y drenar periféricamente los lotes hasta el límite con el horizonte sulfúrico que se encuentra a partir de los 50 cm de profundidad.

En el componente químico, los *Sulfic Endoaquepts* presentan reacción muy fuerte a fuertemente ácida (pH 4,5-5,5), tendencia baja en materia orgánica (2-6 % CO), concentraciones altas de aluminio ( $>4 \text{ Cmol}^{(+)} \text{ Kg}^{-1}$ ) y azufre extractable ( $>120 \text{ mg Kg}^{-1}$ ), saturación baja de bases ( $<60$  %) con niveles adecuados de K, potenciales deficiencias de N, P, y Mg, este último por desbalances con Ca, K y precipitación por sulfatos (Anexo 3). Respecto a los elementos menores, podría presentarse deficiencia de Zn, Mn y Cu, debida a su bajo contenido nativo, antagonismos con Fe, además de contenidos medios a adecuados de B.

Por considerarse suelos pseudosulfatados, su grado de acidez por sulfatación es menos severo, por ello no se requiere un manejo intensivo de enmiendas calcáreas, máximo  $2\text{tha}^{-1}$ , pero se debe propender a la incorporación de materiales orgánicos para estabilizar, en algún grado, procesos de intercambio iónico y mejorar las propiedades biológicas.



**Figura 5.10** Consociación Ministerio: uso actual en cultivos de cebolla de bulbo.

**Fuente:** Gissat (2006).

El uso actual está dominado por pastos y cebolla de bulbo (Figura 5.10). Otros cultivos importantes pero de menor cobertura son arveja, fríjol, maíz y papa. Baja aptitud para frutales de raíz profunda como feijoa o caducifolios.

Respecto al manejo de la fertilidad química, una vez superadas las limitaciones de acidez, se deben realizar, según análisis de suelos y tipo de cultivo, aplicaciones fraccionadas de fertilizantes con aporte de N, P, Mg y elementos menores como B, Zn, Cu y Mn; preferiblemente que no provengan de fuentes portadoras de azufre, sino de nitratos, óxidos y cloruros, para contrarrestar el antagonismo con sulfatos.

En épocas secas se pueden presentar limitaciones de tipo químico por acumulación de sales, debido a la evaporación de aguas freáticas con altos contenidos de sulfatos ( $>1000\text{mg L}^{-1}$ ) y sales metálicas solubles de Fe y Al. Por lo anterior, se debe, en lo posible, mitigar este efecto haciendo uso

---

del riego suplementario para mantener los suelos bajo una condición de humedad próxima a capacidad de campo.

**Consociación Cuche. "CU". Fase de Manejo  $a_3s_2n_3$**

Está integrada por suelos de origen orgánico, cuya pedogénesis corresponde a suelos sulfatados potenciales, susceptibles de acidificación por oxidación, pero con alta capacidad de autoneutralización por presencia de calcio nativo en el medio. Se ubican en un área de 244,63 ha de la planicie lacustre del valle alto del río Chicamocha y se distribuyen mayormente en las unidades de riego Cuche y Vueltas, en posiciones del valle que hacen contacto cercano con coluvios (ver mapa-leyenda. Anexo 1, CD adjunto).

- Componente taxonómico: está representado en un 85 % por los *Typic Sulfihemists*, familia díscica, isoméscica (fase moderadamente profunda).

- Diagnóstico, uso y manejo de la fertilidad: la unidad o fase de manejo  $a_3s_2n_3$  corresponde a suelos ubicados en la posición de cubeta inferior en relieve plano, ligeramente cóncavo (0-1 %). Sus características muestran suelos moderadamente profundos (>50 cm), moderadamente bien drenados a imperfectamente drenados, susceptibles de encharcamiento; limitados por materiales sulfídicos dentro de los 100 cm de la superficie, nivel freático moderadamente profundo, fluctuante y con predominio de aguas ligeramente ácidas o salino-sódicas. Capa arable franco limosa de 25-30 cm de espesor; se encuentran cristales de yeso ( $Ca SO_4 \cdot 2H_2O$ ) a partir de los 25 cm, como producto de los procesos de autoneutralización de la acidez potencial (Figura 3.10). Moderada madurez (valor  $n > 0,7$ ). Químicamente registran una reacción ligera a moderadamente ácida (pH 5,6-6,5) y altas concentraciones de bases, dominando las formas coloidales y solubles de calcio y sodio (Anexo 3). Presentan igualmente excesos de azufre y hierro. El contenido de materia orgánica en todos los casos es superior a 30 %.

Vistos en su condición natural, no disturbada, son suelos de moderada a alta fertilidad física, química y biológica, con desbalances nutricionales principalmente de Mg y K, por la alta saturación de calcio proveniente de

las formas solubles y medianamente solubles de sulfato de calcio; por lo tanto, se recomienda utilizar óxido de magnesio o cloruro de potasio para evitar deficiencias de estos elementos.

Respecto a elementos menores, se podría presentar deficiencia de elementos metálicos como Zn, Mn y Cu, por antagonismos con Fe y fijación por materiales orgánicos. Se advierte sobre los contenidos de boro, cuyas concentraciones suelen ser altas.

Uso actual en ganadería con praderas de kikuyo de alta productividad (Figura 5.11). Debido a que son suelos sulfatados potenciales con susceptibilidad de oxidación, pero con alta capacidad de neutralización, se recomienda mantenerlos en condiciones controladas de humedad y drenaje, y bajo los usos actuales de pasturas, así como evitar el laboreo intensivo y la mecanización profunda de volteo con cualquier artefacto.



**Figura 5.11** Consociación Cuche representada por suelos sulfatados ácidos potenciales (SSAP).  
Uso actual praderas y transición con papa.

**Fuente:** Gissat (2006).

**5.2.2 Suelos sulfatados con fuertes limitaciones.** Se relacionan directamente con suelos sulfatados ácidos actuales minerales (inceptisoles mal drenados), caracterizados por presentar a profundidad procesos de oxidación y sulfatación que transmiten al suelo los más altos niveles de acidez. Cuentan para su manejo con 20-30 cm de espesor en su capa arable,

---

por lo que se agrupan dentro de la fase de manejo superficial. Presentan igualmente niveles freáticos fluctuantes salinos ascendentes. Los suelos sulfatados con fuertes limitaciones se encuentran distribuidos espacialmente en la Consociación Duitama, la cual se describe a continuación:

**Consociación Duitama- "DU". Fase de Manejo  $a_2s_3n_3$**

Está integrada por SSAA de origen mineral, que se ubican en paisaje de cubeta superior y cubren la mayor área de la planicie fluviolacustre. Administrativamente, los suelos de esta consociación se localizan en las unidades de riego Duitama, Ayalas y San Rafael, en un área de 1098 ha. Limitan con la consociación Ministerio (ver mapa, Anexo 1).

- Componente taxonómico: esta consociación está compuesta por los *Typic Sulfaquepts*, familia muy fina sobre orgánica, caolinítica, semiactiva, isomésica, (fase superficial), representa el 95 % de la unidad cartográfica.

- Diagnóstico, uso y manejo de la fertilidad: relieve plano a ligeramente plano (0-3 %), suelos imperfectamente drenados, superficiales, ocasionalmente encharcables, limitados en profundidad por el contacto de un horizonte sulfúrico mineral a los 30 cm de profundidad, con fluctuación de aguas freáticas sulfatadas ácidas-salinas ( $CE > 4,0 dS m^{-1}$ ) que pueden ascender capilarmente afectando la vegetación. La capa arable de 20-30 cm de espesor con contenidos bajos a medios de materia orgánica (5-8 %), texturas finas y muy finas, altamente adhesiva y plástica, subsuelo maduro ( $n < 0,7$ ).

Respecto al componente químico, son suelos de reacción ultraácida a extremadamente ácida (pH 3,5-4,0), severa toxicidad por aluminio ( $> 10 Cmol kg^{-1}$ ), no salino en horizontes superficiales, pero salino en subsuperficiales. Pueden presentar deficiencias de N por baja tasa de mineralización de materia orgánica en condiciones de mal drenaje y por antagonismo con sulfatos; concentraciones limitadas de P, debidas a mecanismos de insolubilización promovidos por las altas concentraciones de aluminio y hierro. Presentan igualmente bajos contenidos de bases (< 20 %) especialmente K, Mg.

---

La acidez limita notablemente el establecimiento de cultivos. En épocas secas, se suma a esta problemática la aparición de áreas *escaldadas*, producto de la evaporación y posterior acumulación de sales metálicas en la superficie del suelo. Para el manejo de la acidez, se recomienda la aplicación de enmiendas complejas (calcáreas y orgánicas), que aporten Ca, Mg y P, hasta neutralizar el aluminio por debajo del 20 %. Investigaciones de Castro *et al.* (2006) demostraron que en estos suelos, para obtener pH mayores a 5, considerados después de la corrección química como suelos mejorados, se requieren aplicaciones de 8 a 10 t ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub> expresado en equivalente químico. El aporte de materia orgánica, en conjunto con fuentes calcáreas, aumenta la actividad biológica y optimiza la reacción de las enmiendas.

Por exceso en las concentraciones de Fe, se encuentran mitigados elementos como Zn, Mn y Cu. Los contenidos de B aparecen en niveles medios. Las anteriores características denotan un bajo nivel de fertilidad química.

La aptitud de estos suelos se ve mejorada para cultivos de raíces superficiales y pasturas (kikuyo), mediante técnicas de recuperación y de control de acidez. En lotes que hayan recibido tratamiento de corrección química, se debe establecer seguidamente avena sativa como cultivo indicador pionero, por ser una especie acidófila salino tolerante probada en estos medios. Después de un ciclo de avena, debe continuarse con un monitoreo de los parámetros de acidez (pH-Al<sup>3+</sup>), para ajustar planes de enclavamiento e ingresar a ciclos de rotación con cultivos de hortalizas, tubérculos (*Solanum pureja*) y cereales (maíz). Suelos no aptos para frutales de raíz profunda.

Mecánicamente se recomienda no voltear el suelo para evitar la exposición del horizonte sulfúrico que se presenta a partir de los 30 cm. Se sugiere distribuir los correctivos usando encaladora, incorporarlos al suelo mediante cavadora de azadones, adecuar drenajes y proceder a la siembra 30 días después, atendiendo necesidades de riego (Gissat, 2006).

El uso actual del suelo se encuentra dominado por pasturas de baja productividad (Figura 5.12) y en áreas con algún grado de recuperación, por cultivos de avena y papa.



**Figura 5.12** Praderas de *kikuyo* de baja productividad en suelos sulfatados ácidos con fuertes limitaciones. Unidades de riego Duitama-Ayalas-San Rafael.

**Fuente:** Gissat (2006).

**5.2.3 Suelos sulfatados con severas limitaciones.** Se relacionan directamente con suelos sulfatados ácidos actuales de origen orgánico (histosoles sápricos y hémicos sulfúricos), caracterizados por presentar superficialmente procesos de oxidación y sulfatación muy severos, que impiden del todo el crecimiento vegetal, conforman áreas escaldadas improductivas con costras salinas. Por la condición de esta limitación química tan severa, los autores han decidido denominar estos suelos como “suelos sulfatados ácidos improductivos”.

Los SSA con severas limitaciones se encuentran distribuidos espacialmente en el complejo Vueltas y la consociación Vargas que se describen a continuación:

#### **Complejo Vueltas“VU”.** Fase de Manejo $a_1s_2n_2$

Está integrado por SSAA de origen orgánico, que se ubican en un área de 370 ha de la planicie lacustre del valle alto del río Chicamocha, y se distribuyen principalmente en sectores de las unidades de riego Vueltas y Vargas, en proximidad a paisajes de coluvios. Este complejo aparece como inclusiones irregulares en las demás unidades cartográficas de estudio.

---

- Componentes taxonómicos: este complejo está compuesto por los *Typic Sulfosaprists*, familia ferrihúmica, dísica, isomésica, micro, (fase ultraácida, ligeramente salina), en un 50 % de la unidad cartográfica, y el otro 50 % corresponde a *Typic Sulfohemists*, familia ferrihúmica, dísica, isomésica, micro (fase ultraácida, encharcable).

- Diagnóstico, uso y manejo de la fertilidad: relieve plano, pendientes entre 0-1 %, suelos muy superficiales, limitados severamente por horizontes sulfúricos en el rango de 10-20 cm y fluctuación de aguas freáticas ácido-salinas o sódicas. Son suelos imperfectamente drenados y susceptibles de encharcamiento.

Capa arable órgano-mineral de 10-20 cm de espesor con texturas finas a muy finas, constituida por materiales orgánicos descompuestos, intercalados con sedimentos aluviales y fluvio-lacustres finos. En el subsuelo se presenta el horizonte sulfúrico mineral Bj, de estructura débil, masivo y arcilloso, además presenta horizontes orgánicos Oaj y Oej inmaduros (valor-n >0,7) con baja capacidad de soporte (subsistencia). Mecánicamente se recomienda no voltear el suelo para evitar la exposición del horizonte sulfúrico.

Químicamente son suelos de reacción ultraácida ( $\text{pH} < 3,5$ ), severamente afectados por concentraciones tóxicas de Fe, S y niveles freáticos salinos, condiciones que hacen imposible el crecimiento vegetal (Anexo 3). Se consideran tierras en el máximo estado de degradación química, cuyos suelos muestran una realidad de improductividad agropecuaria manifiesta en la presencia de calvas o superficies escaldadas de gran impacto ambiental y social en la región.

Investigaciones Gissat reportadas por Castro *et al.*, (2006), Gómez *et al.*, (2005), Munevar y Pérez (2006), validaron experimental y predialmente la tecnología que requieren integralmente estos suelos para pasarlos de una realidad improductiva a una realidad productiva. Este tema se trata en detalle en la sección 5.3 de este documento.

El uso actual está restringido a la presencia de áreas escaldadas con pastos (kikuyo) de muy baja productividad. Se recomienda la aplicación

---

combinada de enmiendas orgánicas y calcáreas, a fin de aportar Ca, Mg y P hasta neutralizar el aluminio por debajo del 20 % y lograr pH superiores a 4,5. Estudios en la zona (Gissat, 2006) han demostrado que el manejo de cal en SSA con áreas escaldadas puede estar entre 10 -12t ha<sup>-1</sup> para iniciar una recuperación gradual.

### **Consociación Vargas “VA”. Fase de Manejo a<sub>1</sub>s<sub>3</sub>n<sub>2</sub>**

Está integrada por SSAA de origen orgánico que se ubican en el paisaje de cubeta inferior de la planicie fluviolacustre. Administrativamente, los suelos que conforman esta consociación se encuentran ocupando un área de 377 ha de las unidades de riego Vargas y Cuche del DRACH (Ver mapa y leyenda, Anexo 1 en CD adjunto).

- Componente taxonómico: esta consociación está constituida en un 95 % por los *Typic Sulfohemists*, familia ferrihúmica, dísica, isomésica, micro, (fase ultraácida encharcable).

- Diagnóstico, uso y manejo de la fertilidad: suelos de relieve plano (0-1 %) e imperfectamente drenados, muy superficiales, susceptibles de encharcamiento, algunos están ubicados en el reborde de áreas pantanosas, limitados por horizontes sulfúricos en el rango de 10 a 20 cm y por fluctuación de aguas freáticas ultraácidas, ligeramente salinas, con presencia de sales metálicas (sulfatos de Fe y Al) que afectan los agregados del suelo con la consecuente degradación física y química del suelo, lo cual se ve expresado por la presencia de áreas escaldadas (Figura 5.13).

Capa arable organo-mineral de 10-20 cm de espesor, texturas finas, subsuelo orgánico (Oa, Oe, Oi), inmaduro (valor n>0,7), lo que induce una baja capacidad de soporte (subsistencia), limitando la mecanización.

Los suelos de la Consociación Vargas (*Typic Sulfohemists*) ubicados en las unidades de riego Vargas-Cuche, son químicamente similares a los suelos del complejo Vueltas (*Typic Sulfosaprists*), descritos anteriormente dentro del grupo de suelos sulfatados ácidos improductivos o de severas limitaciones.

Por el carácter ultraácido de su reacción ( $\text{pH} < 3,5$ ) y las altas concentraciones de Al de cambio ( $> 10 \text{Cmol kg}^{-1}$ ), sulfatos solubles ( $> 0.05 \%$ ), Fe ( $250\text{-}350 \text{mg kg}^{-1}$ ) y salinidad tanto en suelo como en niveles freáticos, este medio resulta totalmente adverso para el crecimiento vegetal, tal como lo registra la Figura 5.13.



**Figura 5.13** Consociación Vargas-Cuche en sectores donde se presentan las mayores limitaciones por la ocurrencia de áreas escaldadas improductivas.

**Fuente:** Gissat (2006).

Es la unidad de suelos con la mayor problemática de improductividad y, por ende, en ella se dificultan las prácticas de manejo que, en principio, deben mitigar los efectos de degradación química por aluminio llevando los pHs originales ( $\text{pH} < 3.5$ ) a pH de 4.8-5.2, donde se ha comprobado la neutralización del  $\text{Al}^{+3}$  por debajo del 20 % con aplicaciones entre 12 y  $15 \text{t ha}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$  equivalente (Gissat, 2006). Otra limitación importante en estos suelos es el encharcamiento causado en periodos críticos de lluvia por drenajes ácidos que al desbordarse o subir los niveles freáticos, hacen retornar a la superficie las características iniciales de sulfatación en suelos ya corregidos.

Se recomienda una recuperación gradual con aplicación combinada de enmiendas calcáreas y orgánicas de alta reactividad, buscando aportar Ca, Mg y P. Antes de asumir la siembra de otros cultivos, se debe trabajar con especies acidófilas salino tolerantes como la avena sativa, por ser el cultivo pionero en la recuperación de estos suelos. Es necesario, para todos los casos, monitorear las condiciones de acidez posterior a los tratamientos de corrección química, teniendo en cuenta la capacidad de los SSAA para restituir la acidez.

---

Las investigaciones Gissat, como se anotó anteriormente, plantean alternativas para la corrección y rehabilitación agrícola de estas áreas escaldadas e improductivas, asunto que se trata en la sección 5.3 de esta publicación.

### **Inclusión Cuche "CU". Fase de Manejo $a_3s_1n_2$**

Suelos orgánicos sulfatados potenciales que se ubican en un área de 40 ha de la planicie fluvio lacustre, se distribuyen mayormente en el sector de la unidad de riego Vueltas (ver mapa y leyenda. Anexo1, CD adjunto).

- Componente taxonómico: inclusión de *Typic Sulfihemists*, familia dísica, isomésica, micro (fase salina sódica), distribuida en el 15 % de la Consociación Cuche. Aunque sus características morfogenéticas son similares a las descritas para los *Typic Sulfihemists*, fase moderadamente profunda, su diferencia radica en que a nivel de familia son suelos muy superficiales (identifica el término micro de la clasificación), con una fase de manejo salino-sódica por las altas concentraciones de sodio provenientes de aguas freáticas ( $CE > 14 dS\ m^{-1}$  y  $RAS > 20$ ) enriquecidas en sulfato de sodio; característica que afecta principalmente el balance catiónico con Ca, Mg y K, respecto a la fertilidad química y dispersa, desde el punto de vista físico, de las partículas minerales y la materia orgánica, originando pérdida de estructura e permeabilidad (Figura 5.9).

- Diagnóstico, uso y manejo de la fertilidad: la fase de manejo  $a_3s_1n_2$  de los *Typic Sulfihemists* corresponde a una inclusión de suelos de relieve plano (0-1 %), muy superficiales (0-10 cm), imperfectamente drenados, impermeables, susceptibles de encharcamiento; algunos ubicados en el reborde de áreas de pantanosas, materiales sulfídicos en los primeros 50 cm, nivel freático con predominio de aguas salino- sódicas que pueden ascender a la superficie. Áreas escaldadas con afloramiento de sales y sodio, no aptas para uso agropecuario, difícil recuperación debido a sus severas limitaciones.

---

### 5.3 RECOMENDACIONES DE MANEJO AGRONÓMICO PARA SUPERAR LIMITACIONES EN SUELOS SULFATADOS ÁCIDOS

Una vez identificada y reconocida la problemática de SSA tratada en la sección 5.1 y definidas las unidades o fases de manejo descritas en la sección 5.2, representadas cartográficamente en el mapa de SSA (adjunto en CD-Anexo 1), el Grupo de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales, Gissat-UPTC, desarrolló diferentes proyectos de investigación en laboratorio y campo, cuyos resultados validaron y definieron las prácticas más apropiadas para la recuperación y manejo de SSA, en predios del Distrito de Riego del Alto Chicamocha, Boyacá.

El compendio de estos resultados de investigación se encuentra registrado en los trabajos realizadas por Bello y Gómez (2001), Arguello y Romero (2002), Sotelo y Pulido (2003), Rincón y Ruiz (2005), Gómez *et al.* (2005), Gómez (2006), Castro *et al.* (2006), Hernández y Viteri, 2006, Munevar y Pérez, (2006), Rincón *et al.* (2008), Combatt *et al.* (2009), Castro y Gómez (2012), Castro y Munevar (2013), muchos de las cuales fueron publicados en revistas indexadas de alto reconocimiento.

A fin de socializar en el ámbito predial los avances de las investigaciones, se establecieron en diferentes unidades de riego del DRACH, pruebas semicomerciales experimentales para demostrar, frente a tratamientos de control, el impacto de la tecnología aplicada a la rehabilitación agrícola de áreas improductivas (Figura 5.14). Con la participación de productores, comunidad académico-científica, entidades regionales e instituciones del sector productivo y ambiental, se organizaron igualmente giras, reuniones y días de campo.

Teniendo en cuenta las limitaciones que rodean esta clase particular de suelos por su extrema acidez y el impacto causado al medio ambiente, su manejo debe proyectarse inicialmente de acuerdo con el entendimiento de su distribución espacial y el conocimiento específico de sus características bioquímicas y físicas relacionadas con su formación, degradación y estado de improductividad, para así, establecer posteriormente, estrategias de manejo que contrarresten gradualmente la problemática agronómica

y ambiental que afecta en diferente medida el desarrollo de sistemas agropecuarios de producción, la calidad del agua y la supervivencia de comunidades bióticas (Castro & Gómez, 2012).



**Figura 5.14** La socialización del conocimiento generado a través de la investigación incluyó, en el ámbito predial, el montaje de pruebas experimentales.

Técnica de microparcels para evaluar requerimientos de encalamiento en SSA.

**Fuente:** Gissat (2008-2010).

Antes de tratar puntualmente las prácticas más relevantes en el manejo de SSA, se presentan de manera integrada, algunas consideraciones para tener en cuenta:

- No se debe asumir ninguna decisión sobre manejo, hasta que no se realice un diagnóstico sobre la clase de SSA por tratar: SSA actuales oxidados (presencia de horizonte sulfúrico orgánico o mineral, pH 3,5-4,0, azufre soluble  $>0,05\%$  o evidencia de moteados claros de jarosita en el perfil); SSA potenciales (presencia de materiales sulfídicos, pH 4-6 o azufre total  $> 2\%$ ); SPSA (suelo pseudosulfatado ácido con procesos de autoneutralización, presencia de cristales de yeso en el perfil, pH  $> 4,5$  o azufre soluble  $< 0,04\%$ ).

- 
- Entender que la recuperación y el manejo de las áreas improductivas afectadas por SSA, es compleja y solo factible cuando, después de un diagnóstico sobre su estado químico, se plantean adecuadas prácticas de manejo que integren técnicas de labranza, adecuación de drenajes, control de acidez, uso de materia orgánica, irrigación, lavado de sales, y empleo de especies acidófilo-salinas tolerantes, incluyendo su fertilización para primeros ciclos de recuperación.
  - El manejo estratégico de la productividad agrícola de SSA debe fundamentarse en el establecimiento de técnicas y planes integrales que, en conjunto, permitan a los cultivos encontrar el medio físico adecuado que garantice su crecimiento radical y la toma de agua y nutrientes para el aprovechamiento y conversión eficiente de energía en la producción de alimentos.

**5.3.1 Manejo físico del suelo (labranza, riego y drenaje).** Debido al dinamismo químico de estos suelos y a la estrecha relación entre sus propiedades físicas, químicas, biológicas y mineralógicas, es conveniente advertir que su manejo debe ser cuidadoso por la alta susceptibilidad de ser degradados en corto tiempo con prácticas mecánicas que no corresponden a la interpretación y conocimiento de sus propiedades.

El carácter atípico de estos suelos, por combinar sedimentos minerales y materiales orgánicos sulfatados ácidos dentro del perfil, hace necesario considerar los resultados de la investigación realizada por Rincón *et al.* (2008) sobre la caracterización física de SSA del DRACH, para dirigir labores técnicamente adecuadas que contribuyan a su recuperación química, orientando estratégicamente su manejo en labranza, riego y drenaje.

**Labranza.** El ascenso capilar de aguas freáticas generalmente ácido-salinas, los altos contenidos de arcilla en horizontes minerales y de materiales finos en complejos organo-minerales de horizontes superficiales, y la ocurrencia de horizontes sulfúricos subsuperficiales, representan las mayores limitaciones para abordar la labranza en SSA. Debido a estas condiciones, la profundidad efectiva radical disponible para el establecimiento de cultivos se ve afectada y resulta ser una característica determinante para definir el sistema de labranza más apropiado. Un aspecto trascendental en

la mecanización de SSA consiste en no exponer a la superficie horizontes sulfúricos subsuperficiales por acción del arado, para evitar el descenso significativo del pH por oxidación de materiales sulfúricos o sulfídicos; además, en SSA orgánicos, la exposición de materiales a la superficie desnaturaliza los componentes orgánicos con pérdida irreversible de la humedad (Figura 5.15 der). En este sentido, es recomendable realizar un tipo de labranza vertical con implementos como la cavadora de azadones o cinceles vibratorios, sin llegar a disturbar los horizontes sulfúricos, acción que se debe complementar con una labranza secundaria que garantice un perfil de desterronamiento superficial adecuado para siembra.

Al no considerarse técnicamente el volteo de las capas superficiales del suelo como una decisión acertada, la labranza de tipo vertical surge como la mejor alternativa de mecanización. Por la baja estabilidad estructural de los SSA de origen orgánico, no es conveniente la utilización de implementos que causen la pulverización del suelo, como el arado rotativo (Castro, 2013).

La profundidad efectiva varía para los SSA del Distrito de Riego desde superficial (< 10 cm) hasta moderadamente profunda (>50 cm). En los SSA que presentan horizontes extremadamente ácidos en superficie (pH<4), la corrección química con materiales encalantes y su incorporación con los implementos mencionados anteriormente, combinados con una buena adecuación del sistema de drenaje, resultan apropiados para la preparación de estos suelos en actividades agrícolas (Figura 5.15 izq.).



**Figura 5.15** Labranza apropiada e incorporación de correctivos con cavadora de azadones, práctica recomendada para la restauración de áreas improductiva con SSA (izq). Exposición a la superficie de horizontes sulfúricos por acción del arado en SSA, práctica no recomendada (der).

**Fuente:** Gissat (2006).

---

El laboreo y la incorporación de correctivos deben realizarse cuando los suelos se encuentren ligeramente por debajo de capacidad de campo, condición de humedad apropiada para garantizar, en un tiempo no inferior a 30 días, la reacción de las enmiendas.

**Riego.** Es una aplicación controlada y uniforme de agua al suelo, para suplir las necesidades hídricas de las plantas, de manera equitativa, oportuna y eficiente (Vásquez & Valderrama, 2000). En este aspecto, las necesidades de riego dependen de las características físicas del suelo, y, de manera especial, de la porosidad, de los contenidos de humedad a capacidad de campo y de la marchitez permanente, así como del movimiento del agua en el suelo, teniendo en cuenta además las condiciones fisiológicas del cultivo, el régimen de lluvias y la evapotranspiración.

En SSA, la aplicación de riego debe estar sujeta al contenido de humedad aprovechable y a la profundidad efectiva radical del cultivo. Las condiciones estructurales del suelo, su contenido de materia orgánica y textura condicionan la frecuencia, tiempo y selección de implementos para el riego.

Con el fin de aprovechar al máximo la retención de humedad y evitar encharcamientos por sobresaturación del suelo, en la Tabla 5.2 se presenta el cálculo de las láminas, las frecuencias y los tiempos de riego aplicados a horizontes superficiales de SSA para el cultivo de hortalizas. Según estos resultados, se deduce que SSA de origen mineral (*Sulfic Endoaquepts* y *Typic Sulfaquepts*), con los más altos contenidos de arcilla y mayor estabilidad estructural, requieren riegos con frecuencia de 8 días e intensidad de 3,7 horas.

En el caso de los SSA orgánicos (*Typic Sulfosaprists*), sus características hidrodinámicas (Anexo 3) muestran un comportamiento similar al de los suelos minerales con intensidades de riego de 4 horas y frecuencia de 7 días. En contraste, los *Typic Sulfohemists* y *Typic Sulfihemists* requieren riegos frecuentes (4-6 días) con una duración de 40 a 50 minutos (Tabla 5.2).

**Tabla 5.2** Láminas, frecuencias y tiempos de riego estimados para cultivo de hortalizas en SSA.

Perfil modal	KSAT (mm/h)	LN (mm)	LB (mm)	FR (días)	TR (horas)
<i>Sulfic Endoaquepts</i>	15,3	56,85	75,80	8	3,71
<i>Typic Sulfaquepts</i>	73,3	61,34	81,79	9	0,84
<i>Typic Sulfosaprists</i>	8,4	49,84	66,45	7	5,93
<i>Typic Sulfohemists</i>	60,9	39,57	52,76	6	0,65
<i>Typic sulfihemists</i>	45,6	29,84	39,79	4	0,65

KSAT (conductividad hidráulica saturada), LN (lámina neta),  
LB (lámina bruta), FR (frecuencia de riego), TR (tiempo de riego).

**Fuente:** Rincón & Ruíz (2005).

El riego planificado en lotes productivos debe orientarse bajo criterios técnicos, a fin de suministrar las láminas de agua apropiadas, sin incurrir en excesos que induzcan escorrentía e incrementen el nivel freático. En la recomendación de hacer calibración de los equipos de aspersión para calcular la tasa de aplicación, hay que tener presente que no se debe aplicar más agua de la que el suelo es capaz de retener; además, la realización de un monitoreo climático, especialmente de la precipitación, mediante la instalación de pluviómetros en cada estación de riego, es una práctica deseable. De igual manera, se sugiere hacer uso de programas informáticos para la planificación del riego, como CROPWAT, AQUACROP e IRRICEB, siendo este último una herramienta tecnológica propuesta por el Gissat UPTC (Castro et al., 2009).

**Drenaje.** El drenaje tiene como función eliminar el exceso de agua en el suelo, para mantener las condiciones necesarias de aireación y actividad biológica del mismo y permitir a las plantas el adecuado desarrollo de su sistema radical y, por ende, de su parte aérea (Kirkham, 2005). En los SSA, la labor de drenaje es más compleja, como consecuencia de las implicaciones ya conocidas de sus propiedades químicas.

Un drenaje excesivo de los SSA en contacto con materiales sulfídicos, implica un descenso dramático en el pH, debido a la producción de ácido sulfúrico por oxidación de los materiales ricos en sulfuros.

---

El drenaje de los suelos orgánicos produce subsidencia, es decir, reducción en el espesor de un suelo hidromórfico por oxidación de los materiales orgánicos. El amplio espacio poroso se llena de aire, se favorecen los procesos de descomposición y mineralización de la materia orgánica, que, finalmente, ocasionan la pérdida de espesor y la liberación de CO<sub>2</sub> (USDA, 2003).

En la unidad de riego Cuche se presentan los primeros indicios de este fenómeno debido a la excesiva apertura de canales. Por lo anterior, en este tipo de suelos se deben rediseñar y mantener los drenajes principales ya existentes y no hacer nuevos, para evitar entrar en contacto con otras áreas sulfatadas ácidas potenciales existentes. Se debe mantener la eficiencia del drenaje superficial de los SSA actuales y reducir la densidad en los sistemas de drenaje de vallados, a fin de impedir promover la oxidación de capas sulfídicas subsuperficiales (Rincón et al., 2008).

Los drenajes superficiales en SSA oxidados deben tener como límite los niveles freáticos. La profundidad de drenajes secundarios no debe ser mayor a 50 cm, límite sobre el cual fluctúa generalmente el nivel freático. Para determinar la distancia entre drenajes, se debe utilizar la medida de conductividad hidráulica, usando la fórmula de Hooghoudt para suelos estratificados (Dent, 1986).

La adecuación de drenajes periféricos recolectores y centrales evacuadores conectados a vallados, es una labor imprescindible que facilita, dentro del esquema de recuperación de SSA, el lavado de sales y el desplazamiento controlado de niveles freáticos en profundidad.

Para evitar disturbar o drenar materiales sulfídicos en áreas productivas, es importante conocer la ubicación y la profundidad de estos materiales. De esta manera se vería disminuido el riesgo de acidificación de áreas actualmente productivas del DRACH.

Debido al carácter fluctuante del nivel freático, es conveniente ampliar la red freatrímica del DRACH, para definir el rango de variación de este parámetro con la estacionalidad climática. De esta manera, el Distrito

---

podría identificar preventivamente los sitios o áreas con alto riesgo de desbordamiento de canales e inundación por ascenso de aguas freáticas.

Cuando se observan recurrentemente en superficie áreas salinas, es síntoma de mal drenaje, fluctuación continua de niveles freáticos salinos e impermeabilidad del suelo. El mal drenaje ocasionado por baja permeabilidad se relaciona con materiales de texturas finas a muy finas en profundidad, y con la obstrucción de poros del suelo por precipitados de hierro, que afectan el comportamiento hidrodinámico del suelo.

Debido a las condiciones químicas tóxicas del agua de drenaje ácido-salino proveniente de los procesos de sulfatación en SSA del valle alto del Chicamocha, no se debe en ningún caso utilizar esta agua para riego o consumo animal, por ser nociva para toda comunidad biótica.

Una práctica para mitigar gradualmente la degradación del medio por efecto del drenaje ácido-salino, es el tratamiento del agua que fluye por canales de drenaje con cales o fuentes básicas calcáreas para neutralizar el ácido sulfúrico (Dear et al., 2002). Los agentes neutralizantes pueden ser incorporados en la base de drenajes o en la corriente; esta práctica previene en alguna medida el flujo de metales tóxicos y de ácidos solubles a otros medios. El tratamiento mencionado reduce los costos de recuperación de áreas adyacentes afectadas por estas aguas corrosivas y tóxicas. Las aplicaciones de cal en drenajes de SSA en Australia han sido muy exitosas, puesto que el ácido sulfúrico que se produce en las paredes puede ser neutralizado; sin embargo, para utilizar este método en grandes extensiones, se debe tener en cuenta el costo (Muñoz & Muñoz, 2006).

El manejo adecuado del medio físico de los SSA, contribuye al mejoramiento del drenaje y a la reducción de la salinidad, aspectos que hacen más eficientes los procesos de control de acidez y recuperación del balance químico al que deben llegar estos suelos para superar sus mayores limitaciones.

**5.3.2 Control de acidez.** Los procesos de acidificación en suelos sulfatados ácidos (SSA) son complejos en su origen, principalmente por participar en ellos reacciones de tipo químico y bioquímico, donde es común la

---

solubilidad de azufre en forma de ácido sulfúrico, aluminio, hierro y manganeso, elementos que por su exceso, restringen severamente la productividad agropecuaria; este es el caso de los SSA del valle alto del río Chicamocha, Boyacá, donde existen cerca de 3000 ha afectadas en diferente grado por esta problemática.

La naturaleza de la acidez en SSA junto con los productos finales de su reacción bioquímica en medios aeróbicos, dan origen a formas libres de  $Fe^{3+}$  y  $Al^{3+}$  como compuestos sulfatos metálicos que actúan en los procesos de hidrólisis (Zhag & Luo, 2002; Fink, 1973; Ludwig et al., 1999). La acidificación de SSA contempla tres tipos de acidez: **acidez real** (acidez activa + acidez intercambiable); **acidez retenida** (acidez proveniente de minerales precipitados como la jarosita) y **acidez potencial** (procesos de oxidación que pueden generar acidez actual y retenida). En estos suelos las diversas formas de acidez hacen más complejos el diagnóstico y control de la acidez, y generalmente repercuten en la necesidad de una dosificación mayor de materiales encalantes para lograr neutralizarla hasta niveles tolerados por el cultivo (Zhag & Luo, 2002; Ahern et al., 2004).

La acidez originada por perturbación de SSA y la estacionalidad climática en medios ultraácidos con pH menor a 3,5, determina cambios físicos, mineralógicos y bioquímicos en el suelo. Estos procesos, producto de la oxidación y sulfatación, intervienen en la degradación continua de suelos y aguas y concomitantemente en la pérdida de productividad agrícola (Rosicky et al., 2004; Gómez, 2006).

El estudio semidetallado de suelos realizado por Gissat (2006) comprobó que 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 Sulfohemists*, 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).

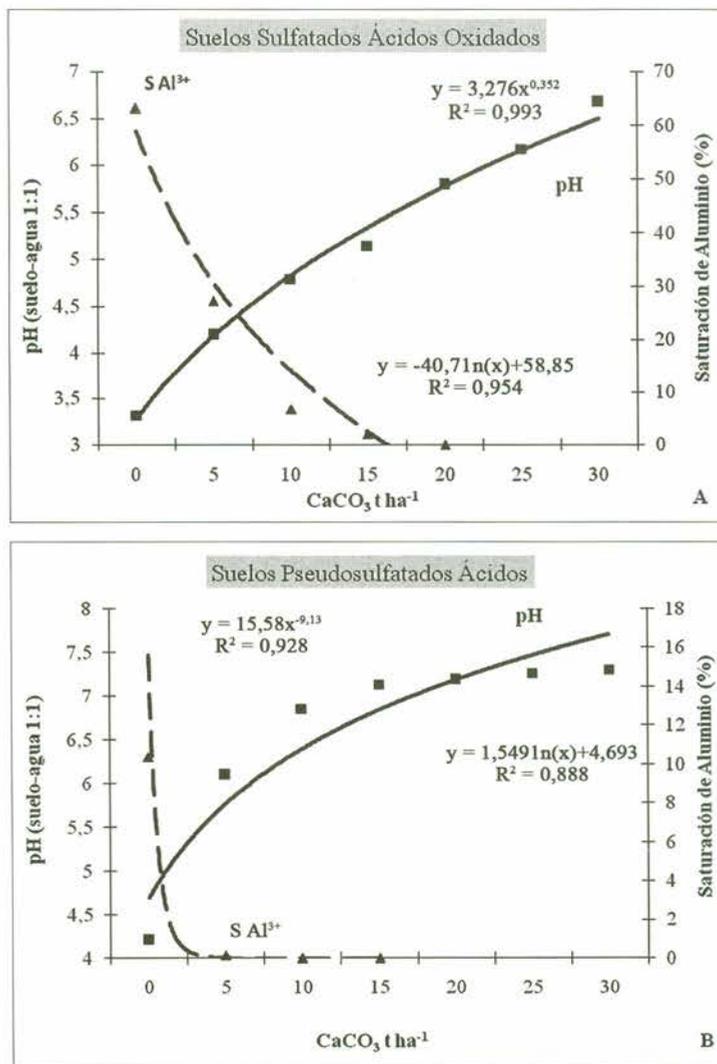
---

En los suelos con problemas de sulfatación y acidez que se vienen incorporando a cultivos provenientes de praderas en el área del Distrito de Riego del Alto Chicamocha, se han generalizado las aplicaciones de materiales encalantes en dosis de 5 y 10  $\text{t ha}^{-1}$ , desconociendo que por su grado de evolución, algunas unidades de SSA como los *Sulfic Endoaquepts* y *Typic Sulfihemists*, podrían requerir menores cantidades; por ello, Gissat (2006) contempló dentro de sus objetivos investigar la relación entre los estados de sulfatación y el manejo de la acidez.

Munevar y Pérez (2006) determinaron mediante pruebas de incubación en laboratorio y la técnica de microparcels en campo, los requerimientos de cal en términos de equivalente químico (EQ  $\text{CaCO}_3$ ), para cada uno de los perfiles modales representativos de las diferentes unidades de SSA. Los resultados muestran que para diagnosticar adecuadamente el requerimiento de enmiendas calcáreas en SSA, debe tenerse en cuenta: (1) los procesos químicos que caracterizan SSA actuales y pseudosulfatados, (2) la neutralización del aluminio de cambio hasta niveles inferiores al 20 % de saturación para lograr pHs entre 4,5 y 5,0, (3) el empleo de materiales encalantes de alta reactividad química, que aseguren la neutralización de la acidez y el mejoramiento químico del suelo, (4) el tiempo de reacción de la enmienda, que no debe ser inferior a treinta días.

Con el fin de aproximar de manera más práctica y consistente los resultados de esta investigación al control de la acidez en SSA, es conveniente analizar las figuras 5.16A y 5.16B, donde se expresa la interacción del pH con la saturación de aluminio en los dos grupos de SSA estudiados. La interpretación gráfica de esta información permite deducir que los SSA actuales oxidados, en su mejor nivel de recuperación y control de acidez, requieren del orden de 15  $\text{t ha}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$  para neutralizar la totalidad del aluminio de cambio y lograr pHs en el rango 5,0–5,5 (Figura 5.16A). Igualmente es posible inferir a partir del punto de intersección de las dos curvas, que un primer estado de recuperación agrícola de estos suelos se obtiene con la aplicación de 7,5  $\text{t ha}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$  para alcanzar pH de 4,5 con saturaciones de aluminio del 25 %, condición que para estos suelos permite el paso de áreas escaldadas improductivas a áreas recuperadas productivas, aspecto ampliamente validado por Gissat durante el período 2000–2006.

En contraste, las necesidades de encalamiento para el manejo de la acidez de los suelos pseudosulfatados ácidos, son considerablemente menores al comprobar que con dosis de 2,5t ha<sup>-1</sup> es posible neutralizar la totalidad del aluminio y lograr pH en el rango ideal de 5,0 a 5,5 (Figura 5.16B).



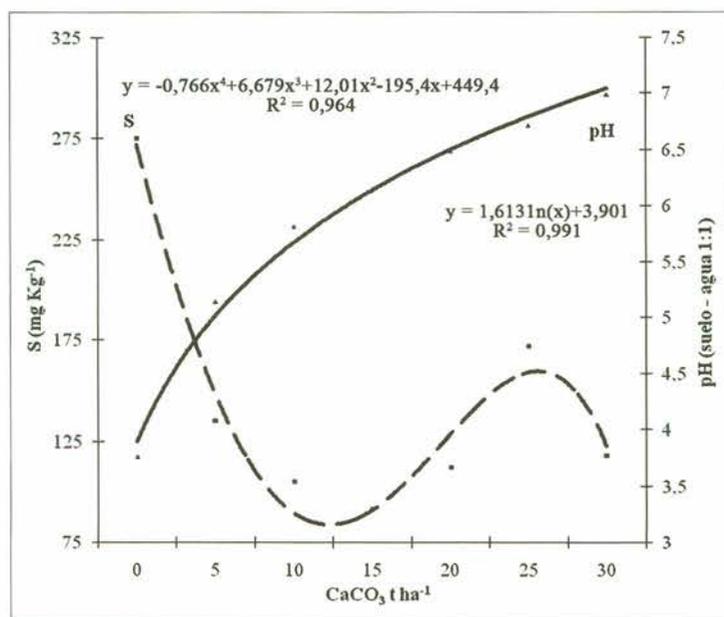
**Figura 5.16** Interacción pH-porcentaje de saturación de aluminio como producto del encalamiento en suelos sulfatados ácidos actuales oxidados (A) y suelos pseudosulfatados ácidos (B).

**Fuente:** Castro et al. (2006).

Como un aporte sustancial a la investigación en el control de la acidez en SSA, se encontró de manera consistente la marcada tendencia en las disminuciones del azufre en solución, debidas a la práctica de encalamiento

(Figura 5.17). Esta evidencia también reportada por Dent (1986), valora aún más el significado del encalamiento, como una práctica que integralmente responde al control de la acidez, Dicho de otra manera, se comprueba que a través del encalamiento además de incrementar el pH y neutralizar el aluminio intercambiable, es posible mitigar considerablemente el efecto tóxico de las altas concentraciones de azufre en estos suelos, como consecuencia de la neutralización de las formas solubles de azufre por el calcio, producto de la disolución de los carbonatos suministrados por encalamiento.

Al analizar las tendencias de la interacción azufre-pH, se demuestra que con dosis entre 10 y 15t ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub>, es posible mitigar las concentraciones de azufre, logrando niveles moderadamente tolerables para las plantas a pH ligeramente ácidos (Figura 5.17). Igualmente queda claro la necesidad de ampliar el estudio sobre la dinámica del azufre en el proceso de su neutralización vía encalamiento, teniendo en cuenta que a partir de 15tha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub>, la curva del azufre presenta una tendencia polinomial de cuarto orden, que refleja nuevos incrementos de este elemento en la solución del suelo, sin variaciones significativas del pH, lo que explicaría una eventual restitución de la acidez con el tiempo, causada por el azufre en estos suelos.



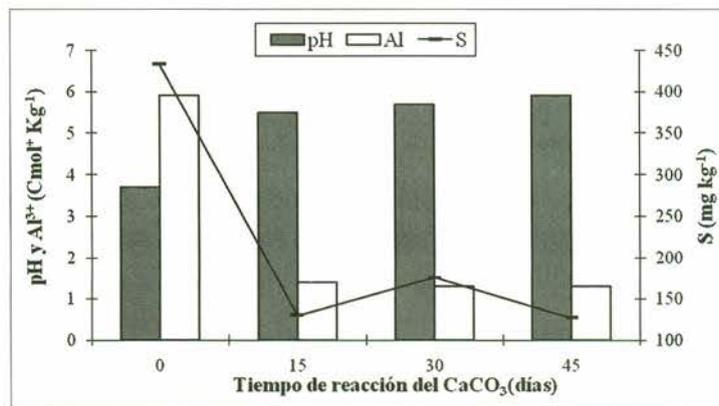
**Figura 5.17** Tendencia en el comportamiento del azufre y su interacción con el pH como producto del encalamiento en SSA (actuales oxidados y pseudosulfatados).

**Fuente:** Castro et al. (2006).

Al reunir la totalidad de la información experimental aplicada a los parámetros de pH, aluminio y azufre en los diferentes SSA estudiados (SSA actuales oxidados y pseudosulfatados), es posible conocer, independientemente de la dosis de encalamiento, la tendencia de los cambios ocurridos con el tiempo de reacción del  $\text{CaCO}_3$ , a estos indicadores de acidez.

Al observar la Figura 5.18, se aprecia que al término de los quince días después de incorporado el  $\text{CaCO}_3$ , los SSA presentan los mayores cambios químicos en el control de su acidez; para esta época se muestran correcciones significativas en los valores de pH y disminuciones considerables en las concentraciones de aluminio intercambiable y azufre en solución, condiciones que promueven la habilitación agrícola de áreas originalmente improductivas o con severas limitaciones. El nivel de los cambios inducidos al suelo por efecto del encalamiento registrados a los 15 días, se mantienen a los 30 y 45 días después del encalado para pH y  $\text{Al}^{3+}$ , con ligeras variaciones en las concentraciones de azufre.

Deducible de esta interpretación y con el fin de generar una recomendación práctica sobre el control de la acidez en SSA, se sugiere que el tiempo mínimo de reacción de la enmienda en condiciones ideales de humedad de campo, no sea inferior a treinta días, siempre y cuando se realice una distribución uniforme del correctivo, a una profundidad de 20 a 25 cm, para afectar favorablemente el ambiente químico de la capa arable.



**Figura 5.18** Tendencia de los cambios inducidos al pH, aluminio y azufre con el tiempo de reacción del  $\text{CaCO}_3$  en SSA.

Fuente: Castro et al. (2006).

---

### ***Enmiendas calcáreas y su manejo en el control de la acidez de SSA.***

Las necesidades de encalamiento estimadas en término de  $\text{CaCO}_3$  químicamente puro, podrán ser transformadas a materiales encalantes comerciales, previo conocimiento de la composición química y cálculo del equivalente químico (EQ  $\text{CaCO}_3$ ) de dichas enmiendas. De esta manera se propone un plan integral de control de acidez multipropósito (PICAM) para SSA, donde se mezclan varios materiales de encalado y materia orgánica para conformar una enmienda compleja de alta reactividad que neutralice el complejo de acidez (Al, S, Fe) y proporcione Ca y Mg como bases, y fósforo, este último cuando se emplea roca fosfórica o escorias Thomas, comercialmente llamado abono Paz del Río (Castro & Munevar, 2013).

Los materiales encalantes que se utilizan como correctivos de acidez son productos comerciales, catalogados como fuentes minerales de origen natural o industrial, que portan en su composición carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de calcio o magnesio. Debido a su diferente naturaleza física (grado de finura), pureza química (EQ  $\text{CaCO}_3$ ) y composición química, estos materiales difieren en su capacidad para neutralizar la acidez del suelo (Castro & Gómez, 2008).

Boyacá cuenta con yacimientos muy importantes de caliza en Nobsa, de donde se extraen por calcinación cales vivas ( $\text{CaO}$ ) cernidas y cales hidratadas ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) con muy altos niveles de equivalencia química en  $\text{CaCO}_3$ . La Tabla 5.3 registra la oferta regional de materiales encalantes de variada composición y EQ  $\text{CaCO}_3$  que estarían disponibles comercialmente para abordar los programas de control de acidez y mejoramiento químico de los suelos afectados por condiciones sulfatadas ácidas.

La estimación de las dosis de cal en términos de  $\text{tha}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$  químicamente puro, debe efectuarse teniendo en cuenta que para neutralizar la acidez generada por 1 meq o cmol de  $\text{Al}^{3+} \text{Kg}^{-1}$  de suelo, se requiere de 1  $\text{tha}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$  puro. En consecuencia:

$$\text{tha}^{-1} \text{ de } \text{CaCO}_3 = \text{cmol } \text{Al}^{3+} \text{Kg}^{-1} \text{ de suelo a neutralizar}$$

La estimación de dosis de cal basada en el porcentaje de saturación de aluminio utiliza la ecuación:  $t\ ha^{-1}\ de\ CaCO_3 = 1,5\ (Al - RAS)\ (CICE) / 100$ , donde aluminio (Al) = % de saturación de aluminio existente; RAS = % saturación de aluminio deseado y  $CICE = \sum Al^{3+} + Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+$  ( $Cmol^{(+)}\ Kg^{-1}$ ). La constante 1,5 corresponde al factor de eficiencia de la aplicación de la cal, el cual se estima en un 67 %.

**Tabla 5.3** Materiales encalantes ofertados en la región para programas de control de acidez y mejoramiento químico de suelos sulfatados ácidos desde la presiembra.

Materiales encalantes	Composición promedia (%)							Equivalente químico (EQCaCO <sub>3</sub> )	tha <sup>-1**</sup> requerido para neutralizar 1meq Al <sup>3+</sup> /100 g suelo
	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	CaO	Ca(OH) <sub>2</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>***</sup>	S		
Cal viva molida (Nobsa)			75					134	0,75
Cal hidratada o apagada (Nobsa)				80				110	0,90
Dolomita - Huila (roca molida)	55	33						94	1,06
Dolomita calcinada. Fost. Col. (Tesalia - Huila)			28		55			186	0,54
Abono Paz del Río (fosfosilicato de calcio)			48		1,2	10		89	1,12
Roca fosfórica (Pesca)			40		0,5	23 -30		73	1,37
Escorias básicas de siderúrgica*			59		11			132	0,75
Yeso (sulfato de calcio) CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O			27 36			0.5	15		

\* Material de residuo industrial no comercial; \*\* a menor dosis, mayor reactividad química del material; \*\*\* fósforo de baja solubilidad en agua.

**Fuente:** Castro & Gómez (2008).

En términos generales se registra como referente que el valor deseable de saturación de acidez en el suelo para plantas sensibles en suelos tropicales debe estar por debajo del 10 % (Espinosa, 2003).

La propuesta Gissat-UPTC (2012) para mitigar la problemática de acidez en SSA basados en los PICAM, se presenta en la Tabla 5.4, la cual plantea tres alternativas, para que, a partir de la dosis calculada de 1 t ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub> químicamente puro, se proyecten las necesidades de encalamiento para SSA actuales oxidados y suelos pseudosulfatados ácidos.

Cuando el plan de mejoramiento estima el uso de dosis superiores a 1 t ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub> químicamente puro, basta con multiplicar las cantidades calculadas de cada uno de los materiales de encalado que conforman la enmienda compleja, por el número de toneladas de CaCO<sub>3</sub> por aplicar.

**Tabla 5.4** Propuesta integral de encalamiento (PICAM) dirigida a la corrección y mejoramiento químico de SSA con problemas de acidez.

Dosis calculada tha <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub>	Materiales encalantes comerciales* (tha <sup>-1</sup> ) (Relación de aplicación porcentual 65:20:15)			Aporte de elementos (Kg ha <sup>-1</sup> )			Mejoramiento químico del suelo (ha)		
	Dolomita molida (55 % CaCO <sub>3</sub> + 33 % MgCO <sub>3</sub> ) Huila	Cal hidratada (80 % Ca(OH) <sub>2</sub> ) Nobsa	Abono Paz del Río (48 % CaO + 1,2 % MgO + 10 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ca (meq)	Mg (meq)	P (ppm)
<b>ALTERNATIVA I</b>									
<b>1</b>	<b>0,691</b>	<b>0,181</b>	<b>0,17</b>	<b>289</b>	<b>66</b>	<b>17</b>	<b>0,72</b>	<b>0,3</b>	<b>3,7</b>
Dosis calculada tha <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub>	Materiales encalantes comerciales* (tha <sup>-1</sup> ) (Relación de aplicación porcentual 65:20:15)			Aporte de elementos (Kgha <sup>-1</sup> )			Mejoramiento químico del suelo (ha)		
	Dolomita molida (55 % CaCO <sub>3</sub> + 33 % MgCO <sub>3</sub> ) Huila	Cal hidratada (80 % Ca(OH) <sub>2</sub> ) Nobsa	Roca fosfórica (40 % CaO + 0,5 % MgO + 30 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) Pesca	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ca (meq)	Mg (meq)	P (ppm)
<b>ALTERNATIVA II</b>									
<b>1</b>	<b>0,691</b>	<b>0,181</b>	<b>0,205</b>	<b>289</b>	<b>71</b>	<b>61,5</b>	<b>0,72</b>	<b>0,3</b>	<b>13,5</b>
Dosis calculada tha <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub>	Materiales encalantes comerciales* (tha <sup>-1</sup> ) (Relación de aplicación porcentual 65:20:15)			Aporte de elementos (kg ha <sup>-1</sup> )			Mejoramiento químico del suelo (Ha)		
	Dolomita calcinada (28 % CaO + 55 % MgO) Huila	Cal hidratada (80 % Ca(OH) <sub>2</sub> ) Nobsa	Roca fosfórica (40 % CaO + 0,5 % MgO + 30 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) Pesca	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ca (meq)	Mg (meq)	P (ppm)
<b>ALTERNATIVA III</b>									
<b>1</b>	<b>0,35</b>	<b>0,18</b>	<b>0,205</b>	<b>207</b>	<b>121,6</b>	<b>61,5</b>	<b>0,52</b>	<b>0,5</b>	<b>13,5</b>

\* Materiales encalantes que conforman una enmienda compleja.

Fuente: Gissat-UPTC (2012).

Bajo las opciones de mejoramiento planteadas, es importante explicar y resaltar ciertas consideraciones que precisan el buen uso de los PICAM:

- Las tres enmiendas complejas definidas se componen de dolomita, cal hidratada y fosfosilicatos (roca fosfórica o abono Paz del Río) en una relación porcentual 65:20:15. Esta relación, además de ajustarse a las necesidades de los suelos afectados, aportan con su incorporación Ca y Mg en proporción 4:1.
- La alternativa III, particularmente, se hace atractiva por utilizar dolomita calcinada, la cual ofrece además de su alta reactividad, un aporte del 55

---

% de MgO, considerado interesante para suplir la tendencia marcada del déficit de Mg en SSA del DRACH (Gissat, 2012). La relación Ca:Mg de esta enmienda compleja es 2:1, considerada ideal.

- Las cantidades calculadas de roca fosfórica o abono Paz del Río, deben mezclarse con 1 t ha<sup>-1</sup> de gallinaza seca y pulverizada, cuando se trate de cultivos. Los planes de renovación o mejoramiento de pasturas, deben buscar el aprovechamiento de los estiércoles de establo, finamente mullidos, preferiblemente compostados. La aplicación de roca fosfórica en SSA oxidados adquiere importancia por la solubilización natural del fósforo procedente de la roca promovida por efecto del ácido sulfúrico existente en el medio.
- La técnica de encalado recomendada a través de los PICAM, está concebida para que una vez se distribuyan uniformemente (al voleo o con encaladora) las cales sobre la superficie del suelo, se proceda a su incorporación con cavadora de azadones o cincele vibratorio. En seguida, se distribuyen uniformemente los fosfosilicatos (roca fosfórica o abono Paz del Río) mezclados con gallinaza o estiércoles de establo, y se incorporan con el alistamiento final del lote para la siembra, utilizando un rodillo Parker o un rastrillo pulidor (sección 5.3.1).

Pruebas exploratorias de incubación efectuadas por Gómez (2006), para diferentes materiales encalantes en suelos sulfatados ácidos improductivos de la región del Distrito de Riego del Alto Chicamocha (Boyacá), mostraron que los óxidos de magnesio o calcio y el hidróxido de calcio presentaron una mayor reactividad respecto a la capacidad de neutralización de acidez ofrecida por los carbonatos (CaCO<sub>3</sub> puro), dominita, escorias básicas y abono Paz del Río, mientras la roca fosfórica no tuvo una respuesta significativa en el manejo de la acidez (Figura 5.19).

Suelos sulfatados ácidos actuales improductivos con pH iniciales de 3,3, requieren dosis de 10 t ha<sup>-1</sup> de enmiendas con alto poder de neutralización (óxidos e hidróxidos de Ca o Mg), para lograr habilitar agrícolamente dichos suelos a pH cercanos o superiores a 4,5. Igualmente los resultados demostraron que para lograr los mismos efectos en estos suelos, se requieren de 15 a 20 t ha<sup>-1</sup> de dolomita o de escorias básicas de siderúrgica y de cerca de 40 t ha<sup>-1</sup> de carbonato de calcio puro o de abono Paz del Río.

Es importante resaltar que el uso de materiales como escorias básicas de siderúrgica, termofosfatos (escorias Thomas-APR) y dolomita, son una alternativa de manejo interesante para ser utilizadas con fines correctivos en SSA. Por otra parte, estas enmiendas reportan una neutralización importante del aluminio de cambio en SSA con dosis del orden de 10 t.ha<sup>-1</sup> (Figura 5.19).

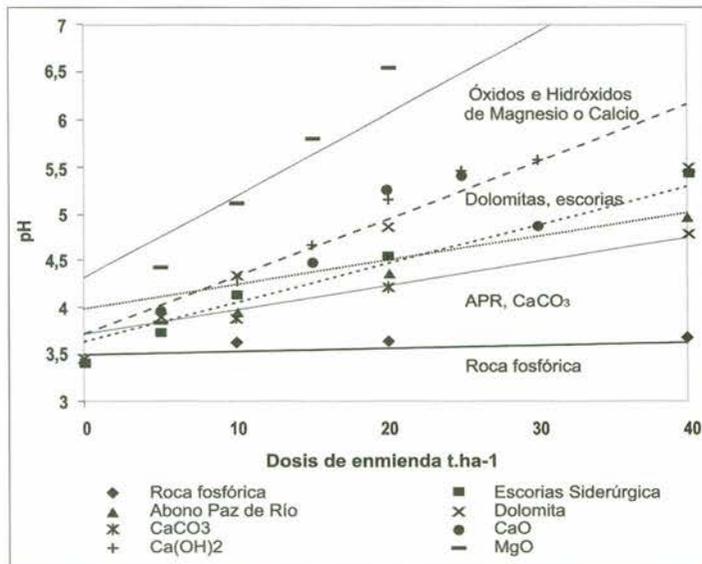


Figura 5.19 Pruebas de incubación exploratorias realizadas en SSA actuales con diferentes enmiendas comerciales de origen natural e industrial.

Fuente: Gómez (2006).

Los referentes anteriores constituyen un caso muy específico de extremada acidez, que explican la necesidad de utilizar altas dosis de materiales encalantes para mitigar las altas concentraciones de Al, S, Fe, que por su efecto combinado, inhabilitan el suelo de la producción agrícola en ambientes de origen sulfatado ácido.

**Tiempo de reacción y residualidad de enmiendas calcáreas.** Al evaluar el tiempo de reacción de la cal y su efecto sobre la variación en el pH y aluminio de cambio en SSA actuales (*Typic Sulfaquepts*, *Typic sulfohemists* y *Typic Sulfosaprists*), se demostró que el tiempo de reacción de 30 y 45 días después de enmienda (DDE), presenta las mejores respuestas en la corrección de acidez con diferencias altamente significativas ( $p < 0,01$ ) respecto a los 15 días después de haber aplicado la enmienda (figuras 5.20

y 5.21). Esto sugiere que el tiempo mínimo de reacción de la enmienda en este tipo de suelos debe ser de 30 días.

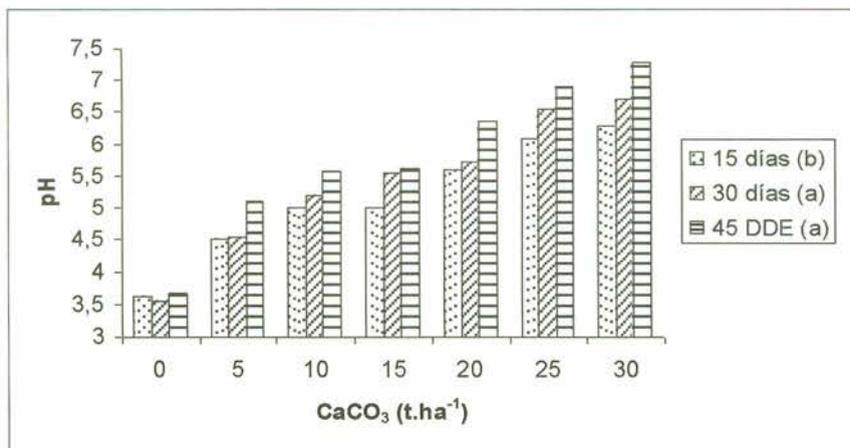


Figura 5.20 Variación del pH respecto al tiempo de reacción de la enmienda en SSA actuales (*Typic Sulfaquepts*).

Fuente: Gissat (2006).

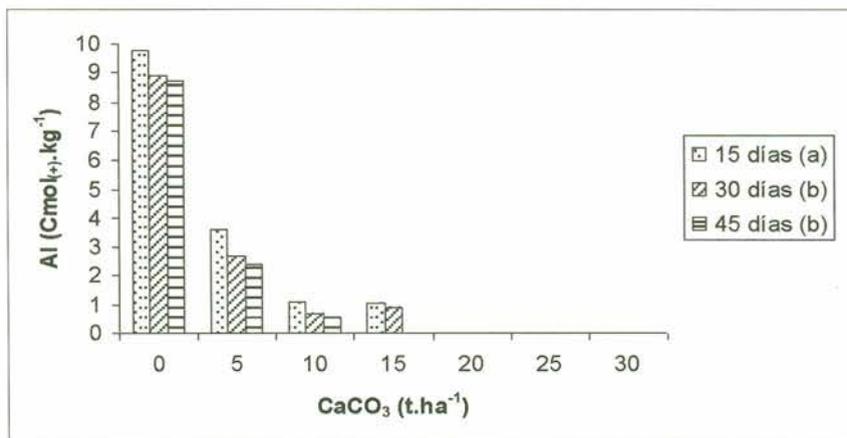
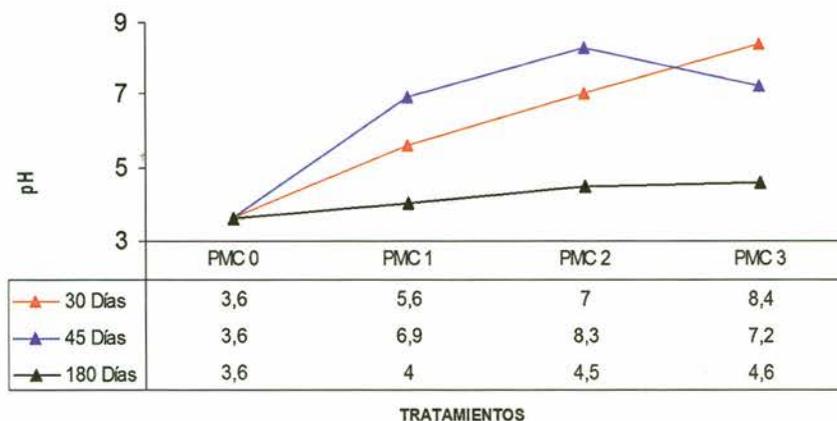


Figura 5.21 Variación de la concentración de aluminio respecto del tiempo de reacción de la enmienda en SSA actuales (*Typic Sulfaquepts*).

Fuente: Gissat (2006).

En suelos pseudosulfatados (*Sulfic Endoaquepts* y *Typic Sulfihemists*) no existieron diferencias entre las épocas de reacción para el control de la acidez y de aluminio de cambio, lo cual sugiere un tiempo de reacción mínimo de 15 días, debido a la menor acidez que debe controlar la enmienda en estos suelos.

En relación con el efecto residual de enmiendas, investigaciones realizadas por Sotelo y Pulido (2003) en *Typic Sulfohemists*, demostraron que al aplicar tres planes de manejo correctivo: PMC1 (7tha<sup>-1</sup> cal viva + 2tha<sup>-1</sup> dolomita + 1tha<sup>-1</sup> roca fosfórica + 10tha<sup>-1</sup> gallinaza); PMC2 (14tha<sup>-1</sup> cal viva + 4tha<sup>-1</sup> dolomita + 2tha<sup>-1</sup> roca fosfórica + 10tha<sup>-1</sup> gallinaza) y PMC3(21tha<sup>-1</sup> cal viva + 6tha<sup>-1</sup> dolomita + 3tha<sup>-1</sup> roca fosfórica + 10tha<sup>-1</sup> gallinaza), se mejoraban significativamente las condiciones químicas del suelo, pero hasta los 180 días después de aplicar las enmiendas, dado que en esta época el pH retornó a valores cercanos a sus condiciones iniciales (Figura 5.22), debido a la fuerte dinámica de acidez y capacidad *buffer*. Por ello, deben hacerse monitoreos regularmente de las condiciones de acidez y establecer cultivos de ciclo corto con alguna tolerancia a la acidez como papalo criolla, repollo y avena.



**Figura 5.22** Efecto residual del pH del suelo por la aplicación de enmiendas en *Typic Sulfohemists*. Valle alto del río Chicamocha.

Fuente: Sotelo & Pulido (2003).

**5.3.3 Adición de materia orgánica.** Los mecanismos por los cuales la aplicación de materia orgánica mejora los suelos, son bien entendidos y referenciados por Burbano (1998); además de mejorar la estructura del suelo, la materia orgánica compostada y humificada puede en SSA actuar como material quelatante de los metales tóxicos y fijarlos. Probablemente la función más importante de la materia orgánica en SSA está dirigida a promover el aumento y actividad de microorganismos comprometidos con procesos y productos de la mineralización de sustancias orgánicas a formas minerales disponibles de nitrógeno y fósforo principalmente.

---

Una vez se hayan corregido por encalamiento las limitaciones de acidez y toxicidad de aluminio, es conveniente utilizar de manera conjunta la aplicación de materiales orgánicos (compost, gallinaza, abonos verdes) para aportar una fuente de carbono importante que active biológicamente el suelo e induzca los procesos de mineralización por parte de los microorganismos.

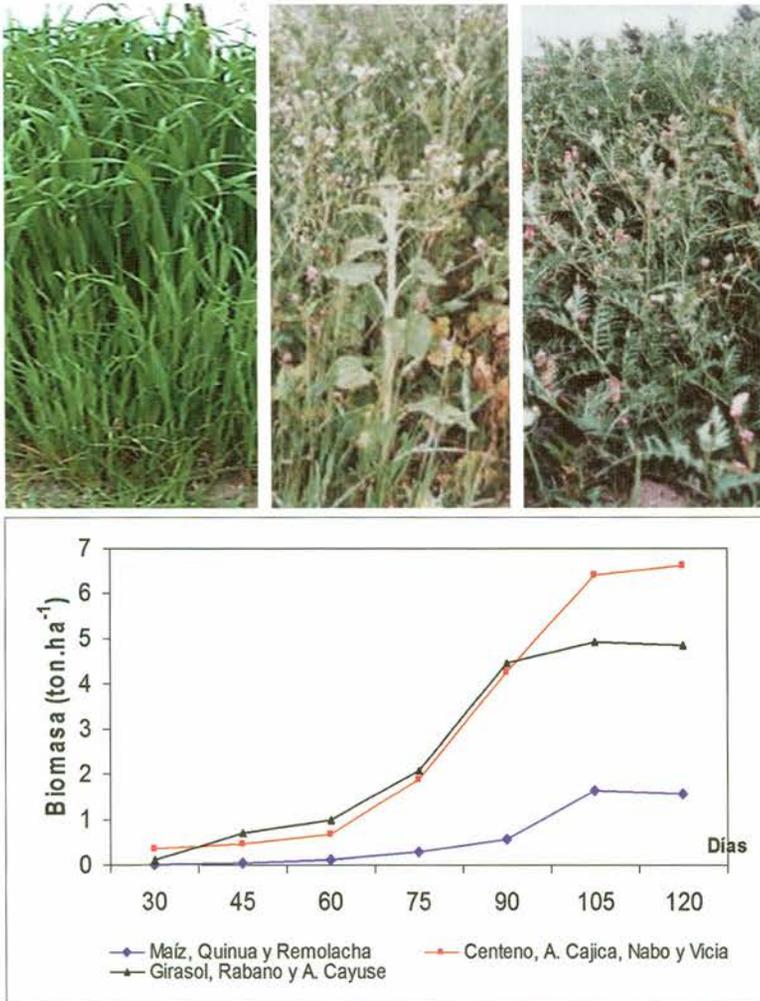
En los SSA de Boyacá (*Typic Sulfaquepts*), se encontró que complementariamente al suministro de los materiales encalantes, la adición de materia orgánica en forma de gallinaza y en cantidades de 10 t ha<sup>-1</sup>, disminuyó las dosis de cal hasta en un 50 % respecto a la aplicación de la sola enmienda calcárea. Esta es una práctica que activa la fertilidad del suelo y se refleja en la recuperación de la productividad de SSA, como ocurrió en investigaciones hechas por Bello y Gómez (2001), tomando como cultivo indicador avena sativa.

Es importante evaluar distintos materiales orgánicos. Efectivamente, experimentos hechos en la Universidad de Montana (2000), encontraron que los lodos residuales ejercen un buen control de acidez en SSA, lo mismo que el uso de abonos verdes como técnica complementaria a la siembra de cultivos tolerantes a estas condiciones.

Hernández y Viteri (2006), con una aplicación de 10 tha<sup>-1</sup> de enmiendas complejas en relación 70:30:10 (cal viva cernida: dolomita: roca fosfórica) evaluaron especies de abonos verdes para la recuperación de *Typic Sulfohemists* de la unidad Vargas y concluyeron que las plantas más viables por su aporte en biomasa y mayor cobertura y tolerancia a condiciones sulfatadas son avena, nabo forrajero y vicia (Figura 5.23).

**5.3.4 Uso de plantas tolerantes.** Esta técnica propone la utilización de plantas acidofilo-salino tolerantes, que suelen subsistir en las condiciones adversas de SSA. Cuando el crecimiento se da en altas concentraciones de elementos tóxicos (Al<sup>3+</sup>, Na<sup>+</sup>) y sales sulfatadas, estas especies tienden a acumular en sus tejidos estas sustancias, y con el mejoramiento químico del suelo a través de los correctivos o enmiendas, se convierten en los cultivos indicadores o pioneros de recuperación.

En este sentido, los avances de investigación demostraron que para SSA corregidos químicamente, la *avena sativa* es la especie pionera para utilizar en los planes integrales de recuperación de suelos sulfatados ácidos continentales de altiplanos fríos, teniendo en cuenta su adaptación a condiciones de acidez y salinidad. Se comprobó, igualmente, que la siembra de dos ciclos continuos de avena habilita el suelo para abordar seguidamente la rotación con cultivos comerciales (repollo, coliflor, remolacha, papa criolla, maíz y kikuyo), ajustando planes de enclamiento, fertilización, riego y drenaje (Gissat, 2006).



**Figura 5.23** Uso de avena (*Avena sativa*), nabo forrajero (*Raphanus sativus* L) y vicia (*Vicia sativa* L) como abonos verdes en la recuperación productiva de SSA (izq); producción de biomasa de mezclas de especies potenciales como abonos verdes en *Typic Sulfohemists*. Valle alto del río Chicamocha (der).

**Fuente:** Hernández & Viteri (2006).

---

Se debe mencionar la tolerancia del kikuyo, que como pasto nativo y sin corrección química del suelo crece de forma restringida en áreas escaldadas con pH menores a 3 y presencia de sales. De otra parte, la siembra de avena puede mezclarse con *raygrass*, ofreciendo resultados satisfactorios en lotes que inician recuperación.

La recuperación de los SSA con severas limitaciones debe realizarse gradualmente, favoreciendo primero el establecimiento de praderas o especies rústicas con tolerancia a la acidez. Los efectos que puede tener el establecimiento de vegetación de rápido crecimiento, que aporte raíces al volumen del suelo, son determinantes en la recuperación de suelos sulfatados ácidos.



## REFERENCIAS

- Ahern, C., Elnea, M. & y Sullivan, L. (2004). *Acid Sulfate Soils Laboratory Methods Guidelines*. Indooroopilly Queensland, Australia: Queensland Department of Natural Resources, Mines and Energy. 132p.
- Bello, F. & Gómez, M. (2001). *Recuperación de suelos sulfatados ácidos en el Distrito de Riego del Alto Chicamocha, Boyacá*. Trabajo de grado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC, Programa de Ingeniería Agronómica, Tunja. 190 p.
- Berrío, J., Gómez, H., Hooghiemstra, M., Becerra, R. & Marchant. (2004, 4-5 nov.). Historia paleoambiental y humana durante el Holoceno en el Pantano de Vargas, Boyacá. En *Second Colombian Biome Meeting*. 57 p.
- Bibi, I. (2012). *Mineralogy and acid neutralization mechanisms in land acid sulfate environments*. MA Thesis. University of Sydney, Australia.
- Bloomfield, C. & Coulter, J. (1973). Genesis and management of acid sulfate soil. *Advances in Agronomy*. 25 (1), 265-326.
- Bloomfield, C. (1972). Acidification and ochre formation in pyrite soils. *International Symposium on Acid Sulphate Soils, Wageningen*, 1(2), 13-20.
- Breemen, N. (1973). Dissolved aluminium in acid sulphate soil and in acid mine water. *Proceeding Soil Science Society American*, 37, 694-797.
- Breemen, N. (1976). *Genesis and solution chemistry of acid sulphate soils in Thailand. Technical report*. Wageningen: s.n. 10 p.
- Breemen, N. (1982). Genesis, morphology and classification of acid sulfate soil in coastal plain. In *Acid Sulfate Weathering*. (pp. 95-109). Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, Special Publication No 10.
- Brock, D., Smith, T. & Madigan, T. (1987). *Biology of microorganisms*. (1st ed.). New York: Prentice Hall.

- 
- Burbano, O. (1998). Las enmiendas orgánicas. En R. Guerrero (ed.). *Fertilización de cultivos en clima frío*. (2a ed.). (pp. 363-403). Bogotá: Monómeros Colombo Venezolanos.
- Burton, D., Bush, R. & Sullivan, E. (2006). Sedimentary iron geochemistry in acid waterways associated with coastal lowland acid sulfate soils. *Geochimica Cosmochimica Acta* 70, 5455-5468.
- Castro, H. & Munevar, O. (2013). Mejoramiento químico de suelos ácidos mediante el uso combinado de materiales encalantes. *Rev. UDCA Actividad y Divulgación Científica*, 16 (2), 409-416.
- Castro, H. & Gómez, M. (2010). Fertilidad y fertilizantes. En *Ciencia del suelo, principios gráficos*. (pp. 217-303). Bogotá: Soc. Col. Ciencia del Suelo.
- Castro, H., Cely, G. & Vásquez, N. (2009). *Criterios técnicos para un manejo eficiente del riego en cebolla de bulbo*. Distrito de Riego del Alto Chicamocha Boyacá. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC. 187 p.
- Castro, H. & Gómez, M. (2008). Actualidad y tendencias del uso de enmiendas calcáreas en Colombia. En *Actualización en fertilidad de cultivos y uso de fertilizantes*. (pp. 141-153). Bogotá: Soc. Col. de la Ciencia del Suelo.
- Castro, H., Hernández, D., Gómez, M. & Munevar, O. (2006). Diagnóstico y control de la acidez en suelos sulfatados ácidos en el Distrito de Riego del Alto Chicamocha, Boyacá mediante pruebas de incubación. *Revista Agronomía Colombiana*, 24(1), 122-130.
- Castro, H. (2002). *Caracterización fisicoquímica de aguas freáticas superficiales y su relación con suelos sulfatados ácidos*. Informe técnico. Tunja: Proyecto UPTC-GISSAT. 21 p.
- Castro, H. (1998). *Fundamentos para el conocimiento y manejo de suelos agrícolas*. Manual técnico. Tunja: Produmedios. 360 p.
- Chuxia, L. (2012). Climate change adaptation in acid sulfate Landscapes, Australian Centre for Sustainable Catchments. University of Southern Queensland, Toowoomba, Australia. *American Journal of Environmental Science*, 8(4), 433-442.
- Combatt, E., Mercado, T. & Palencia, G. (2009). Alteración química de la de la solución de un SSA con encalamiento y lavado en columna disturbada. *Rev. UDCA, Actividad y Divulgación Científica*, 12(1), 101-111.

- 
- Combatt, E., Martínez, Z. & Palencia, M. (2008). Generación de acidez por oxidación de piritita en SSA interiores del clima cálido. *Rev. Temas Agrarios*, 13(1), 32-39.
- Combatt, E., Mercado, T. & Martínez, G. (2006). Eh, enclamiento y lavado en un SSA de Córdoba Colombia: II. Efecto sobre micronutrientes en suelos lixiviados. *Rev. Temas Agrarios*, 11(2), 26-35.
- Combatt, E., Martínez, Z., Cabrales, G., Martínez, Pinedo, C. & Luna, L. (2004). *Caracterización físico-química y mineralógica de los suelos sulfatados ácidos en el transecto San Carlos-Cotorra-Carrillo. Informe Técnico*. Montería: Universidad de Córdoba. 226p.
- Contreras, P. & Olarte, Y. (1997). *Interpretación y diagnóstico de los suelos en el Distrito de Riego del Alto Chicamocha con posibles aplicaciones de correctivos y fertilizantes. Informe Técnico*. Duitama: Usochicamocha. 43p.
- Corredor, T. (2005). Caracterización biológica de suelos sulfatados ácidos del Distrito de Riego del Alto Chicamocha. En *Informe Técnico*. Tunja: Gissat-UPTC-Colciencias. 41p.
- Cortés, A. (1998). *Los suelos orgánicos del Valle de Sinbunday (Putumayo) proceso de formación o destrucción*. Bogotá: Fundación Universitaria Jorge Tadeo Lozano, Centro de Investigaciones Científicas.
- Dear, S., Moore, N., Dobos, S., Walting, K. & Ahern, C. (2002). Soil Management Guidelines. In *Queensland Acid Sulfate Soil Technical Manual*. Queensland, Australia: Department of Natural Resources and Mines. 71p.
- Dent, D. & Dawson, B. (2000). *The acid test: an expert system for acid sulphate soils*. Norwich, England: University of East Anglia. 38p.
- Dent, D. & Pons. (1995). A world perspective on acid sulphate soil. England Elsevier Science. *Geoderma*, 67, 263-276.
- Dent, D. (1986). *Acid sulphate soils: a baseline for research and development*. Publication 39. Wageningen: International Institute of Land Reclamation and Improvement -ILRI-. 204 p.
- Distrito de Riego y Drenaje de Gran Escala del Alto Chicamocha y Firavitova, Usochicamocha -DRACH-. (2009). *Informe Ejecutivo*. Duitama, Boyacá: s.n. 18p.

- 
- Ehrlich, M. (1990). *Geomicrobiology*. (2nd ed.). New York: Marcel Dekker. 646 p.
- Espinosa, J. (2003). Encalado de suelos tropicales. En *Memorias del Seminario sobre fertilidad de suelos*. (pp. 75-84). Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.
- Espinosa, J. & Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos*. Quito: Instituto de la Potasa y el Fósforo. 37 p.
- FAO. (2000). *Soil problem in the World. Technical Inform.* Retrieved from <http://www.fao.org>
- Fitzpatrick, R., Skwarnecki, M.; Raven, R., Merry, P. & Bonifacio, E. (2002). Biogeochemical and mineralogy processes in acid sulfate soil: implication for environmental significance. In *Symposium No 63, Paper No 2036, 17<sup>th</sup> World Congress Soil Science*. Thailand.
- Fitzpatrick, R. (1996). Iron oxyhydroxides, sulfides oxyhydroxysulfates as indication of acid sulfate soil weathering environment. In K. Stanjek & J.M. Bigham (eds). *Soils and environment: soil processes from mineral to landscape scale*. (pp. 227-240). Australia: s.n.
- Fitzpatrick, R. (1993). Australia's unique saline acid sulphate soils associated with dry land salinity. In *Proceeding on the First National Conference on Acid Sulfate Soil*. (pp. 41-46). Coolangatta, Australia: s.n.
- Fitzpatrick, R., Naidu, S. & Self, P. (1992). Iron deposits and microorganisms occurring in saline sulfidic soils with altered soil regime in the Mt. Lofty ranges, South Australia. In H.C.W.S. Skinner & R. W. Fitzpatrick (eds). *Biomineralization processes of iron and manganese-modern and ancient environment: Catena supplement*. (pp. 263-286). Australia: s.n.
- Frink, C. (1972). *Aluminum chemistry in acid sulphate soil. The Connecticut Technical Report*. New Haven, USA: Agriculture Experiment Station. 49 p.
- García, A. (2003). Tipo de suelos salinos. En *Manejo integral de la fertilidad de suelos*. (pp. 85-96). Bogotá: SCCS.
- Garzón, M. (2005). *Suelos hídricos del humedal laguna de Fúquene: delimitación y caracterización*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 329 p.

- 
- Gómez, M. (2006). *Génesis de suelos sulfatados ácidos y su relación con el manejo agrícola. Distrito de Riego del Alto Chicamocha*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 211 p.
- Gómez, M., Castro, H. & Malagón, H. (2005). Interpretación de procesos Redox en SSA del DRACH, Boyacá. *Rev. Agronomía Colombiana*, 23 (1), 136-142.
- Gómez, M., Castro, H. & Pacheco, W. (2005). Recover and management of actual acid sulphate soil in Boyacá, Colombia. *Rev. Agronomía Colombiana*, 23(1), 128-135.
- Gómez, M. (2003). Manejo estratégico de la productividad en suelos sulfatados ácidos del trópico: problemática, impacto, uso y manejo para su habilitación agrícola. En *Manejo integral de la fertilidad de suelos*. Bogotá: SCCS. 13p.
- Gómez, M., Castro, H. & Contreras, P. (2001). Localización, caracterización e identificación de un SSA en área del Distrito de Riego del Alto Chicamocha Boyacá. Suelos Ecuatoriales. *Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá*, 31(2), 169-174.
- Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales Gissat. (2012). *Plan de manejo dirigido a la rehabilitación de la capacidad productiva de los suelos afectados por inundaciones, ola invernal 2010-2012. Distrito de Riego del Alto Chicamocha, Boyacá, Colombia*. 150 p.
- Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales, Gissat. (2006). *Caracterización de la problemática de suelos sulfatados ácidos improductivos y evaluación del manejo para su habilitación agrícola*. Tunja: Proyecto UPTC, Colciencias Usochicamocha. 23 p.
- Hamdi, B. (2002). Paleogeochemical interpretation of some gypsic microfabrics in hyper desert soil. In *Symposium No 20, Paper No 1861, 17<sup>th</sup> World Congress Soil Science*, Thailand.
- Hernández, D. & Viteri, S. (2006). Selección de abonos verdes para el manejo y rehabilitación de los suelos sulfatados ácidos de Boyacá, Colombia. *Rev. Agronomía Colombiana*, 24(1), 131-137.
- Hicks, W. & Lamontagne, S. (2006). *A guide to sulfur gas emissions from wetlands and disposal basins: implications for salinity management*. CRC LEME Project P3. 18 Open file reports series, 17 p.

- 
- Hicks, W., Bowman, G. & Fitzpatrick, R. (2002). The geochemistry of Australian tropical acid sulfate soil and their environmental hazard. In *Symposium No 63. Paper No 238. 17<sup>th</sup> World Congress Soil Science*, Thailand.
- Hicks, W., Bowman, G. & Fitzpatrick, R. (1999). *Environmental Hazards, East Trinity Acid Sulfate Soil. Technical Report*. S.I.: CSIRO Land and Water. 77 p.
- HIMAT. (1985). *Geología y geomorfología del valle alto del río Chicamocha. Documento técnico*. Bogotá: HIMAT. 40 p.
- Hinrich, L. (2002). *Soil Chemistry*. (3 ed.). Ontario, Canada: John Wiley & Sons. 306 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC-. (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. (6 Ed.). Bogotá: IGAC Subdirección de Agrología. 499 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC-. (1985). *Examen y descripción de los suelos en campo*. Bogotá: IGAC Subdirección de Agrología. 95 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC-. (1983). *Estudio general de los suelos de los municipios que componen la parte media y baja de la cuenca del río Sinú. Departamento de Córdoba*. Bogotá: IGAC. 120 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC-. (1980). *Estudio de suelos y levantamientos agrológicos de la provincia Tundama en la zona centro de Boyacá*. Bogotá: IGAC. 225 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC-. (1968). *Estudio de los suelos de la margen izquierda del río Chicamocha, al noreste de Duitama*. Bogotá: IGAC. 215 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC-. (1968b). *Estudio general de suelos de la parte plana y general del sector quebrado de los municipios de Duitama y Paipa, para fines agrícolas*. Bogotá: IGAC. 240 p.
- Instituto Colombiano de la Reforma Agraria -INCORA-. (1975). *Estudio de factibilidad proyecto Boyacá Alto Chicamocha y Firavitoba*. S.I.: INCORA. 61 p.
- Instituto Colombiano de la Reforma Agraria -INCORA-. (1965). *Proyecto Boyacá No. 1. Sistema de adecuación de tierras de los valles Alto Chicamocha y Firavitoba*. S.I.: INCORA. 70 p.

- Jacq, V. (1972). Biological sulphate reduction in the spermosphera and the rizosphera of rice in some acid sulphate soils. In *International Symposium on Acid Sulphate Soil*, Wageningen Holanda, Vol. 1. pp. 4-9.
- Jusop, S., & Muhral, S. (2002). Pyrite in acid sulfate soil: transformation and inhibition of its oxidation by application of natural material. In *Symposium No 28, Paper No 97. 17<sup>th</sup> World Congress Soil Science*, Thailand.
- Kirkham, M. (2005). Field Capacity, Wilting Point, Available Water, and the Nonlimiting Water Range. In M.B. Kirkham (ed.). *Principles of Soil and Plant Water Relations*. (pp. 101-115). Burlington: Academic Press.
- Lamontagne, S., Hicks, W., Fitzpatrick, W. & y Roger, S. (2004). *Survey and description of sulfidic material in wetlands of the Lower River Murray floodplains: Implications for floodplain salinity management*. Sidney, Australia: CSIRO Land and Water Technical Report 165. 63 p.
- Lines, C. & Sammut, J. (1999). An overview of the ecological impacts of acid sulfate soil in Australia. In R. J. Smith & ASSMAC (eds). *Proceeding 2<sup>a</sup> National Conference of acid sulfate soils*. (pp. 140-145). Australia: s.n.
- Ludwig, B., Partpat, K., Ralf, B., Alf, F., Gunter, F. & Rainer, D. (1999). Pyrite oxidation in a sediment sample of an open-cut brown coal mine: mineral formation, buffering of acidity and modeling of cations and sulfate. *J. Plant Nutrition Soil Science*, 162, 499-509.
- Malagon, D., Pulido, C., Llinás, D., Chamorro, C. & Fernández, J. (1995). *Suelos de Colombia: origen, evolución, clasificación, distribución y uso*. Bogotá: IGAC, Subdirección de Agrología. 632 p.
- Malagon, D. & Montenegro, H. (1990). *Propiedades físicas de los suelos*. Bogotá: IGAC, Subdirección de Agrología. 813 p.
- Maneewan, M. (2002). Application of lime and N-P-K fertilizer for chilli on Rangsit soil series-very acid phase, In *Symposium 63. World Congress Soil*, Thailand.
- Marius, C. (1982). Acid Sulphate soils of the mangrove area of Senegal and Gambia. In *Proceeding of the Bangkok symposium on Acid Sulphate Soil*, (pp. 95-109). Wageningen, The Netherlands: ILRI.
- Marshner, H. (2012). *Mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). New York: Academy Press. 672 p.

- 
- Mensvoort & Quang, L. (1988). Morphology and genesis of actual acid sulphate soils in the Hie Tien Plain, Mekong Delta, Vietnam. In *Symposium on Acid Sulphate Soil*. Publication 44. (pp. 11-16). Wageningen, The Netherlands: ILRI.
- Munévar, O. & Pérez, C. (2006). *Exploración por la técnica de microparcelas de la corrección química de suelos sulfatados ácidos improductivos (SSAI) en el distrito de riego del alto Chicamocha Boyacá*. Tesis de grado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. pp. 190.
- Muñoz, A. & Muñoz, L. (2005). *Evaluación de impacto ambiental de los suelos sulfatados ácidos sobre la calidad fisicoquímica de las aguas de drenaje y diagnóstico de manejo. Distrito de Riego del Alto Chicamocha Boyacá*. Trabajo de Grado. Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Bogotá. 279 p.
- Murray-Darling Basin Authority -MDBA-. (2011). *Acid sulfate soils in the Murray-Darling Basin*. Australia: s.n. 81 p.
- Nettleton, W., Brashier, B. & Deer, P. (1982). Gypsiferous Soil in the Western United States. In *Acid Sulfate Weathering*. (pp. 147-169). Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, Special Publication No 10.
- Nguyen, T. & Phan, L. (1993). Microbiological characteristics of acid sulphate soils: a case study in the Ho Chi Minh City environs. In D.L. Dent & Van Mensvoort (eds). *Symposium on Acid Sulphate Soils*. (pp. 237-240). Wageningen, The Netherlands: ILRI, Publication 53.
- Nordstorm, D. (1982). Aqueous pyrite oxidation and consequent formation of secondary iron minerals. In *Acid Sulfate Weathering*. (pp. 37-56). Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, Special Publication No 10.
- NRCS Department of Agriculture Australia. (1999). *Acid sulfate on insidious problem*. NSW: NRCS. 10 p.
- Pacheco, M. Rodríguez, L. & Bermúdez, L. (2006). Plan estratégico de mercadeo para la cadena hortícola en el Distrito de Riego del Alto Chicamocha. *Rev. Agronomía Colombiana* 24 (1), 182-191.
- Parkhurst, L. & Appelo, C. (1999). *User's guide to PHREEQC (version 2) A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations, Water-Resources Investigations Report*. Denver, Colorado: U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey. 326 p. Retrieved from: <http://www.xs4all.nl/~appt/index.html>

- 
- Poelman, J. (1972). Soil material rich in pyrite in non-coastal areas. In *International Symposium on Acid Sulphate Soil*. (pp. 13-26). Wageningen, The Netherlands: s.n.
- Pons, L. & Breemen, N. (1982). Factors influencing the formation of potential acidity in tidal swamps. In *Proceeding of the Bangkok Symposium on Acid Sulphate Soil*. (pp. 37-62). Wageningen, The Netherlands: ILRI.
- Pons, L., Breemen, N. & Driessen, P. (1982). Physiography of coastal sediments and development of potential soil acidity. In *Acid Sulfate Weathering*. (pp.1-19). Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, Special Publication No 10.
- Pronk, J. T., De Bruyn, J. C., Bos, P. & Kuenen, J. G. (1994). Anaerobic growth of *Thiobacillus ferrooxidans*. *Appl: Environment. Microbiolog USA*, 5,2227-2230.
- Rincón, A., Castro, H. & Gómez, M. (2008). Caracterización física de los SSA del DRACH (Boyacá) y su aplicación al manejo. *Rev. Agronomía Colombiana*, 26 (1), 134-145.
- Rincon, A. & Ruiz, D. (2005). *Caracterización física de suelos sulfatados ácidos improductivos del Distrito de Riego del Alto Chicamocha*. Tesis de grado. UPTC, Tunja. 119 p.
- Rosicky, M., Sullivan, L. & Siavich, P. (2004). Factor contributing to the acid soil scalding process in coastal floodplain of New South Wales. *Australian Journal Soil Research*, 42, 587-594.
- Rosicky, M., Sullivan, L. & Siavich, P. (2002). *Acid sulfate soil scalds: How they occur and best management practices for their revegetation*. Wollongbar: NSW Agriculture and ASSMAC. 16 p.
- Sammut, J. (2000). *An introduction to acid sulphated soils, technical inform*. Australia: s.n. 28 p.
- Soil Survey Staff. (2010). *Keys to Soil Taxonomy*. (9th ed.). USA: United States Department of Agriculture (USDA). Soil Conservation Service: Govt. Printing Office Blacksburg. 331p. Retrieved from [http://soils.usda.gov/technical/classification/tax\\_keys/](http://soils.usda.gov/technical/classification/tax_keys/).
- Sotelo, J. & Pulido, F. (2003). *Evaluación de planes correctivos en suelos sulfatados ácidos improductivos utilizando como cultivos indicadores repollo y avena*

---

*forrajera en el distrito de riego del Alto Chicamocha (Boyacá)*. Trabajo de Grado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Programa de Ingeniería Agronómica, Tunja.

Stanley, E. & Bergeys, J. T. (1994). *Manual of systematic Bacteriology*. In D. H. Bergey (pp. 1860-1937). Baltimore: Williams and Wilkins Inc.

University of California, Committee of Consultants. (1984). *Guidelines for interpretation of water quality for agricultural*. California: Davis. 13p.

University of Montana. (2000). *Environmental Biogeochemistry Class about Acid sulfate soil*. Missoula, USA: Department of Geology. 15 p.

USDA. (1990). *Analysis Soil Hand Book, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. (8th ed.). Washington D.C.: USDA Soil Conservation Service, U.S. Govt. Printing Office. 1300 p.

Usochicamocha. (2002). *Reseña, antecedentes y características generales del Distrito de Riego del Alto Chicamocha. Informe Técnico*. Duitama: s.n. 24 p.

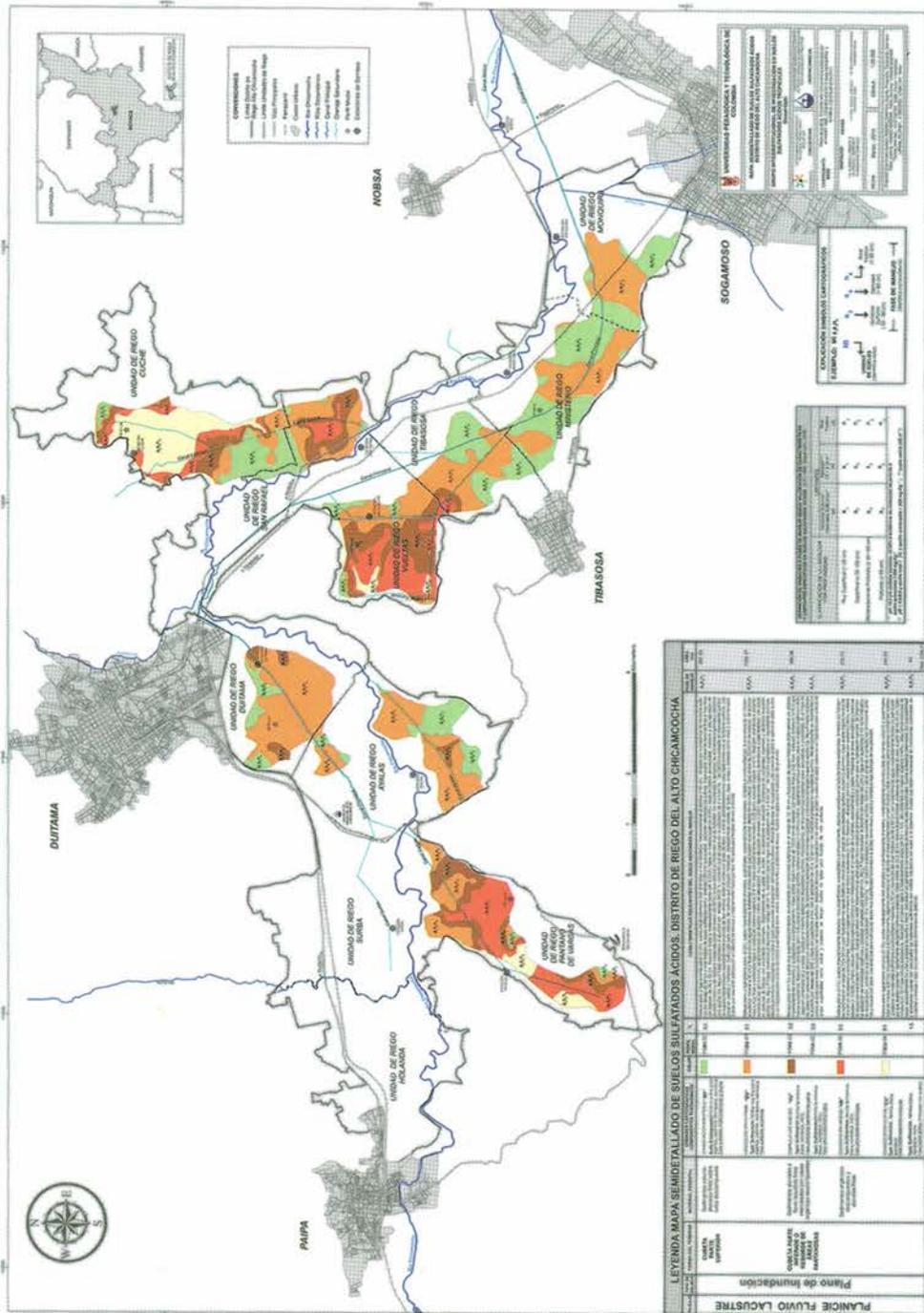
Wada, H. & Seisuwan, B. (1988). The process of pyrite formation in mangrove soils. In *Symposium on Acid Sulphate Soil*. (pp. 24-38). Publication 44. Wageningen, The Netherlands: ILRI.

Wagner, D.J., Fanning, Foss, Patterson, J. M. & Snow, P.A. (1982). Morphological and mineralogical features related to sulfide oxidation under natural and disturbed land surfaces in Maryland. In *Acid Sulfate Weathering*. Special Publication No 10. (pp. 95-109). Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America.

Zapata, R. (2004). *Química de la acidez del suelo*. (1ª ed.). Cali, Colombia: Cargraphics. 207 p.

Zhag, J. & Luo, S. (2002). A case study on relationship between sulfur form and acidity. In *Acid sulphate soil, Symposium No 63, Paper No 1048, 17<sup>th</sup> World Congress Soil Science*, Thailand.

ANEXO 1. Mapa Semidetallado de Suelos Sulfatados Ácidos. Distrito de Riego del Alto Chicamocha (DRACH), Boyacá - Colombia (CD adjunto).





... Continuación propiedades físicas

Perfil	Horizonte	Módulo Ruptura (KPa)	Puntos de humedad							Conductividad hidráulica (cm/hr)	Interpretación conductividad hidráulica.
			Saturación 0,01 atm. (%HG)	CC 0.3 atm. (%HG)	PMP 15 atm. (%HG)	CC campo. (%HG)	PMP invernadero (%HG)	Humedad aprovechable laboratorio (%HV=CC-PMP *Da)	Humedad aprovechable campo (%HV=CC-PMP *Da)		
<i>Typic Sulfaquepts</i>	Ap	1,310	142,82	69,40	44,64	62,94	27,10	26,49	38,34	7,33	Moderadamente rápida
	Bwg	30,06	54,65	41,47	31,54			12,41		14,51	Rápida
	Bgj										
	Oe										
<i>Typic Sulfohemists</i>	A/Oa	1,63	101,70	75,15	36,24	58,14	27,99	31,90	24,73	6,09	Moderadamente rápida
	Oa/Oe	0,98	220,31	163,27	103,17			21,63		5,47	Moderadamente rápida
	Oe										
	Oig										
<i>Typic Sulfosaprists</i>	Aj	3,59	83,44	58,11	39,18	57,14	30,75	22,33	31,15	0,84	Moderadamente lenta
	Oaj	0,98	128,13	100,00	58,93			27,51		1,81	Moderada
	Bj										
	Ogy										
<i>Typic Sulfihemists</i>	Oay	1,96	110,42	79,91	60,94	115,14	34,06	4,36	18,65	4,56	Moderada
	Oey	0,78	166,80	120,94	66,85			11,35		3,46	Moderada
	Oeg										
<i>Sulfic Endoaquepts</i>	Ap	17,97	103,15	68,27	44,96	57,31	22,13	23,54	35,53	1,53	Moderadamente lenta
	Bwg	20,58	53,72	30,87	22,51			10,03		7,84	Moderadamente rápida
	Bgj										
	Oe										

PMP: punto de marchitez permanente CC: capacidad de campo. Pw: contenido de humedad gravimétrica. Da: densidad aparente. Dr: densidad real. DGM: diámetro geométrico medio. DPM: diámetro ponderado medio. %EA: espacio aéreo. PT%: porosidad total.

**Fuente:** Laboratorio de Suelos, IGAC; Laboratorio de Suelos, CIAT (2006).

**ANEXO 3.** Resultados analíticos sobre la caracterización química de suelos sulfatados ácidos. Distrito de Riego del Alto Chicamocha, Boyacá - Colombia

PERFIL MODAL	HZTES cm	MO %	pH	CE dS.m <sup>-1</sup>	Cmol <sup>(+)</sup> K <sup>-1</sup>							mg Kg <sup>-1</sup>							%				
					Al	H	Ca	Mg	K	Na	CICE	P	Mn	Fe	Zn	Cu	B	S	Al	Ca	Mg	K	Na
Sulfic	Ap 0-10	19,12	5,36	1,60	0,05	0,18	23,6	2,96	1,86	0,56	29,23	11,9	5,53	556	2,5	0,93	1	76,8	0,17	80,81	10,13	6,36	1,92
Endoaquepts	Bwg 10-55	2,85	4,23	0,65	5,4	0,50	5,07	0,97	0,51	0,25	12,70	7,3	3,7	133	2,25	0,69	0,28	161	42,52	39,92	7,64	4,02	1,97
PSMI-O5	Bgj 55-80	6,79	3,69	3,50	6,2	0,40	8,95	0,96	0,28	0,01	16,80	7,7	5,93	247	1,77	0,4	0,51	308	36,90	53,27	5,71	1,67	0,06
	Oeg 80-110	51,0	4,30	4,10	4	0,80	10,8	3,24	1,35	0,01	20,15	59,6	6,92	531	1,48	0,27	1,3	1715	19,85	53,35	16,08	6,70	0,05
Typic	Ap 0-12	16,60	3,92	0,38	12,1	1,00	0,96	0,35	0,61	0,01	15,03	18	2,01	380	0,97	0,21	0,36	168	80,51	6,39	2,33	4,06	0,07
Sulfaquepts	Bwg 12-30	5,90	3,81	0,56	12,3	0,10	1,43	0,21	0,32	0,05	14,41	13,1	1,19	98,7	0,57	0,21	0,25	286	85,36	9,92	1,46	2,22	0,35
PS DU-01	Bgj 30-70	5,85	3,50	2,66	9,7	0,80	6,4	0,47	0,14	0,01	17,52	18,6	4,92	214	0,51	0,18	0,17	951,2	55,37	36,53	2,68	0,80	0,06
	Oej 70-110	36,00	3,50	4,35	18,8	0,80	9,26	2,79	0,46	1,1	33,21	57,4	26,8	223	0,99	0,42	0,6	1563	56,61	27,88	8,40	1,39	3,31
Typic	Aj 10-15	29,00	3,18	2,10	11,3	2,00	2,1	0,91	0,34	0,46	17,11	18,1	6,79	386	0,52	0,1	0,93	2609	66,04	12,27	5,32	1,99	2,69
Sulfosaprists	Oaj 15-35	53,00	3,00	3,40	12,4	0,05	2,38	1,17	0,14	1,6	17,69	12,3	10,6	224	0,59	0,08	0,83	621	69,81	13,45	6,61	0,79	9,04
PS VU-03	Bj 35-60	9,18	3,34	3,40	13,2	1,20	6,8	3,37	0,47	3,83	28,87	37,6	21,8	456	0,57	0,32	1,1	829	45,72	23,55	11,67	1,63	13,27
	Ogj 60-100	45,00	6,50	8,10	5,5	3,70	4,7	5,52	0,84	1,2	21,46	181	28,9	131	0,94	0,24	1	2477	25,63	21,90	25,72	3,91	5,59
Typic	Aj 0-10	20,70	3,30	1,30	10,9	1,00	0,7	0,09	0,21	0,01	12,91	13	1,59	259	1,09	0,17	0,63	791	84,43	5,42	0,70	1,63	0,08
Sulfohemists	Oaj 10-37	41,00	3,19	1,30	12,2	8,10	0,91	0,13	0,18	0,01	21,53	6,2	2,73	348	0,78	0,1	0,57	941	56,67	4,23	0,60	0,84	0,05
PS VA-02	Oej 37-50	45,00	3,35	2,10	23,5	0,30	1,23	0,24	0,2	0,11	25,58	18,5	12,5	197	4,79	0,09	0,76	1298	91,87	4,81	0,94	0,78	0,43
	Oij 50-110	64,00	3,16	4,90	23	10,00	2,6	0,4	0,36	0,01	36,37	10,5	7,6	140	3,1	0,1	0,62	1365	63,24	7,15	1,10	0,99	0,03
Typic	Oay 0-25	45,00	6,84	7,90	1,9	3,60	122	3,01	1,54	3	134,7	4,7	3,66	521	0,62	0,16	3	2133	1,41	90,31	2,24	1,14	2,23
Sulfohemists	Oey 25-70	32,00	4,27	9,00	2	8,10	136	13,8	3,02	43,8	207,1	61,5	23,9	337	5,61	0,55	9,5	11322	0,97	65,86	6,66	1,46	21,15

Fuente: Laboratorio de Suelos, IGAC; Laboratorio de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía UPTC (2006).



