

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 (FeS_2) y monosulfuros (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 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.

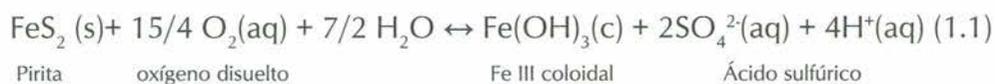
Fuente: Dent & Dawson, ILRI (2000).

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 (H₂S), 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 (FeS₂), 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 (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).

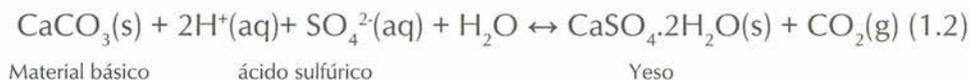


Figura 1.2 Ambiente de formación de SSAA: áreas pantanosas con vegetación de juncos (izq.); horizontes sulfúricos con moteados amarillos (jarosita) (der.). Planicie fluvio lacustre continental, valle alto del río Chicamocha, Boyacá, Colombia.

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 Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺. 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
TOTAL		24868	

* 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
Total estimado	4894

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 ¹ cuenca alta río Chicamocha.	20.000	SSAA-SSAP de origen fluvio-lacustre halohidrotermal, diferentes estados de evolución. Clima frío seco.
- Valle Ubaté-Cucunubá ² - 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 ³ .	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 ³ .	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 ¹ .	SC	SSA de origen fluvio-volcánico, Suelo pseudo sulfatados ácidos (evolución post-avalancha 1985).
PUTUMAYO Valle del Sibundoy ⁵	SC	SSA orgánicos de origen lacustre en áreas continentales de clima frío.
VALLE DEL CAUCA Basines del río Cauca ⁴ .	SC	SSA con influencia salina, con alta concentración de Mg. SSAP, SSAA, SPSA.

Fuente: ¹Gissat (2006); ²Garzón (2005); ³Gissat (2012); ⁴Combatt et al. (2004);

⁵García (2003); ⁵Cortés (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 floccula 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 ⁻¹)	< 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 (Fe^{2+}), sulfuro de hidrógeno (H_2S), dióxido de carbono (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).

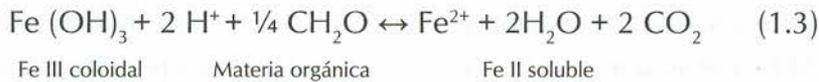
Respecto a las concentraciones en aguas freáticas, de drenaje y fase soluble del suelo, los niveles de aluminio soluble no deben superar valores mayores a 1 mg L^{-1} para uso agrícola y de consumo (Dent & Dawson, 2000; Hicks et al., 1999; Lamontagne et al., 2004).

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 fosfato es inhibido a causa de su fijación por el aluminio en el suelo y dentro de las raíces.

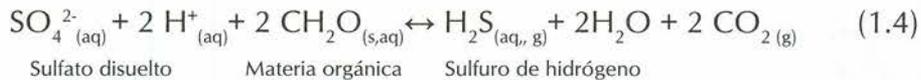
La toxicidad de aluminio puede ser evitada por inundación en zonas cálidas donde se cultiva arroz; la inundación aumenta el pH del suelo, pero las semillas de arroz, bajo condiciones sulfatadas ácidas, pueden aun sufrir toxicidad por aluminio, en el caso de plántulas, si son trasplantadas antes de los procesos de reducción. Esta práctica de inundación, como el encalamiento 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 mol m^{-3} (5130 mg L^{-1}) en SSA de Tailandia después de dos semanas de inundación, pero valores medios entre 500 y 1000 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⁻¹ 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 H₂S en solución, en el rango de 1 a 2 x 10⁻⁶ mol m⁻³, 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 H₂S, 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 H₂S 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 (Na_2SO_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.