

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).

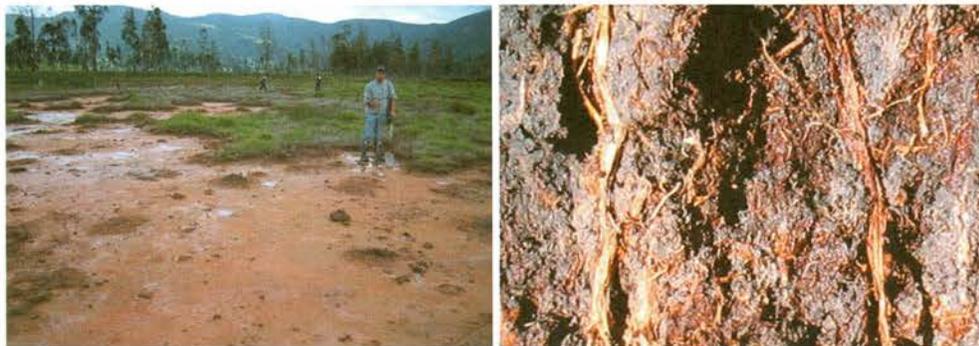


Figura 5.1 Superficies afectadas por recubrimientos superficiales de sales metálicas causados por precipitados de hierro en SSA (izq.). Precipitados férricos que recubren las raíces y sellan el espacio poroso en SSA (der). Valle alto del Chicamocha.

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.

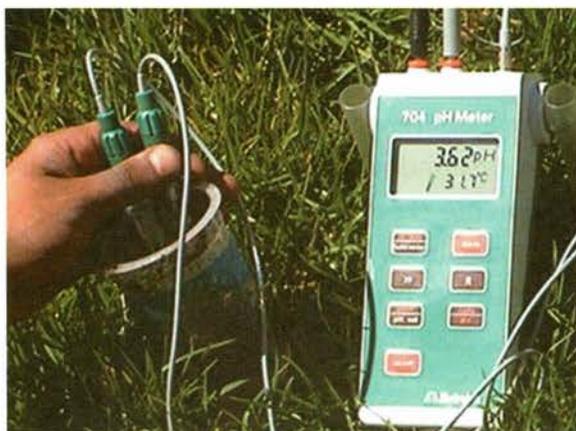


Figura 5.4 Medición de pH en campo: obsérvese como el SSA muestreado presenta condiciones ultraácidas de 3,61.

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 (H_2O_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 (H_2O_2) ataca los sulfuros de hierro y los oxida rápidamente a ácido sulfúrico y a 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 (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 ($BaCl_2$) 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 $BaCl_2$ 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 Sulphemists*, 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 ⁻¹ (s)	Nivel freático (n)
Muy superficial (< 20 cm)	a ₁	s ₁	n ₁
Superficial (20 - 50 cm)	a ₂	s ₂	n ₂
Moderadamente profundos (50 -80 cm)	a ₃	s ₃	n ₃
Profundos (> 80 cm)	a ₄	s ₄	n ₄

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

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**- a₃s₃n₄

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.

a₃s₃n₄: 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 2tha^{-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 Cucho. "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 Cucho 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 dísica, 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⁻¹ de CaCO₃ 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-Al³⁺), para ajustar planes de enclamiento 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⁻¹ para iniciar una recuperación gradual.

Consociación Vargas “VA”. Fase de Manejo a₁s₃n₂

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 Al^{+3} por debajo del 20 % con aplicaciones entre 12 y 15t ha^{-1} de 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, isoméica, 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 CO₂ (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 freatrimétrica 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 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 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 t ha^{-1} de 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 t ha^{-1} de 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⁻¹ es posible neutralizar la totalidad del aluminio y lograr pH en el rango ideal de 5,0 a 5,5 (Figura 5.16B).

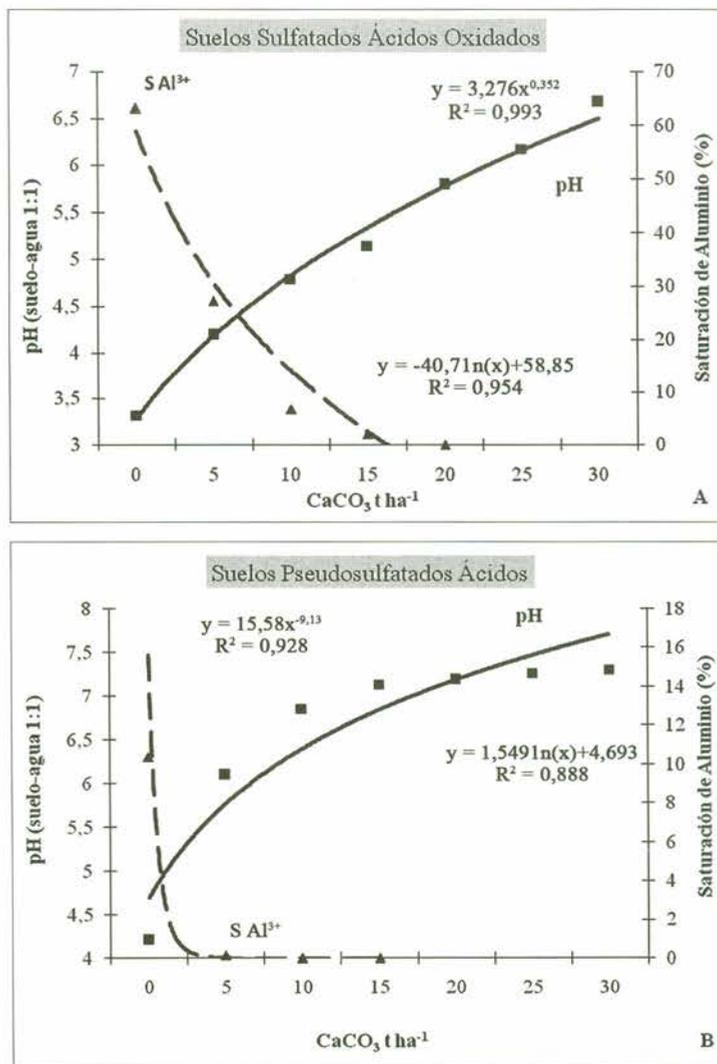


Figura 5.16 Interacción pH-porcentaje de saturación de aluminio como producto del encalamiento en suelos sulfatados ácidos actuales oxidados (A) y suelos pseudosulfatados ácidos (B).

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⁻¹ de CaCO₃, 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⁻¹ de CaCO₃, 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.

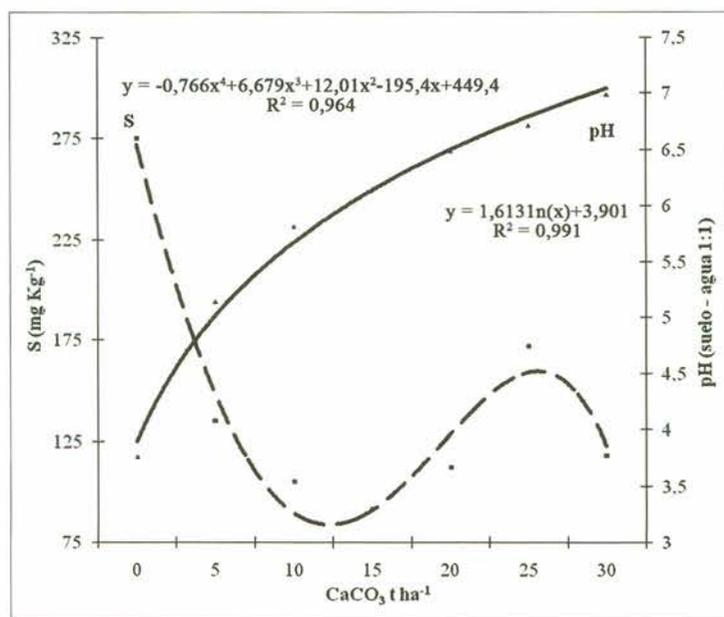


Figura 5.17 Tendencia en el comportamiento del azufre y su interacción con el pH como producto del encalamiento en SSA (actuales oxidados y pseudosulfatados).

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 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 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 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.

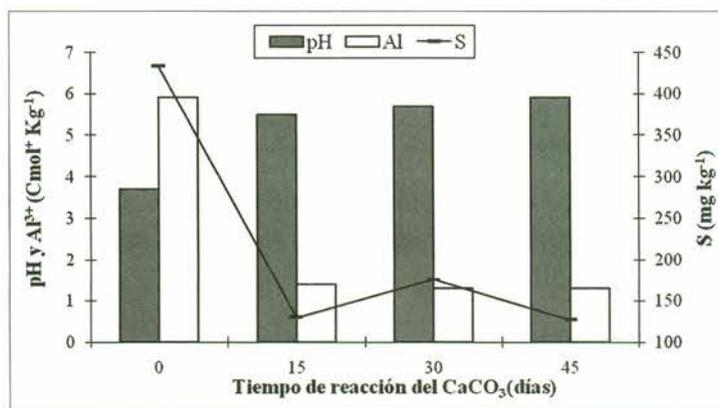


Figura 5.18 Tendencia de los cambios inducidos al pH, aluminio y azufre con el tiempo de reacción del CaCO_3 en SSA.

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 CaCO_3 químicamente puro, podrán ser transformadas a materiales encalantes comerciales, previo conocimiento de la composición química y cálculo del equivalente químico (EQ 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 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 (CaO) cernidas y cales hidratadas (Ca(OH)_2) con muy altos niveles de equivalencia química en CaCO_3 . La Tabla 5.3 registra la oferta regional de materiales encalantes de variada composición y EQ 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 tha^{-1} de 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 tha^{-1} de 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 ₃)	tha ^{-1**} requerido para neutralizar 1meq Al ³⁺ /100 g suelo
	CaCO ₃	MgCO ₃	CaO	Ca(OH) ₂	MgO	P ₂ O ₅ ^{***}	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 ₄ ·2H ₂ 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⁻¹ de CaCO₃ 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⁻¹ de CaCO₃ 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 CaCO₃ 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 ⁻¹ CaCO ₃	Materiales encalantes comerciales* (tha ⁻¹) (Relación de aplicación porcentual 65:20:15)			Aporte de elementos (Kg ha ⁻¹)			Mejoramiento químico del suelo (ha)		
	Dolomita molida (55 % CaCO ₃ + 33 % MgCO ₃) Huila	Cal hidratada (80 % Ca(OH) ₂) Nobsa	Abono Paz del Río (48 % CaO + 1,2 % MgO + 10 % P ₂ O ₅)	Ca ⁺²	Mg ⁺²	P ₂ O ₅	Ca (meq)	Mg (meq)	P (ppm)
ALTERNATIVA I									
1	0,691	0,181	0,17	289	66	17	0,72	0,3	3,7
Dosis calculada tha ⁻¹ CaCO ₃	Materiales encalantes comerciales* (tha ⁻¹) (Relación de aplicación porcentual 65:20:15)			Aporte de elementos (Kgha ⁻¹)			Mejoramiento químico del suelo (ha)		
	Dolomita molida (55 % CaCO ₃ + 33 % MgCO ₃) Huila	Cal hidratada (80 % Ca(OH) ₂) Nobsa	Roca fosfórica (40 % CaO + 0,5 % MgO + 30 % P ₂ O ₅) Pesca	Ca ⁺²	Mg ⁺²	P ₂ O ₅	Ca (meq)	Mg (meq)	P (ppm)
ALTERNATIVA II									
1	0,691	0,181	0,205	289	71	61,5	0,72	0,3	13,5
Dosis calculada tha ⁻¹ CaCO ₃	Materiales encalantes comerciales* (tha ⁻¹) (Relación de aplicación porcentual 65:20:15)			Aporte de elementos (kg ha ⁻¹)			Mejoramiento químico del suelo (Ha)		
	Dolomita calcinada (28 % CaO + 55 % MgO) Huila	Cal hidratada (80 % Ca(OH) ₂) Nobsa	Roca fosfórica (40 % CaO + 0,5 % MgO + 30 % P ₂ O ₅) Pesca	Ca ⁺²	Mg ⁺²	P ₂ O ₅	Ca (meq)	Mg (meq)	P (ppm)
ALTERNATIVA III									
1	0,35	0,18	0,205	207	121,6	61,5	0,52	0,5	13,5

* 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⁻¹ 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 (CaCO₃ 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⁻¹ 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⁻¹ de dolomita o de escorias básicas de siderúrgica y de cerca de 40 t ha⁻¹ 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⁻¹ (Figura 5.19).

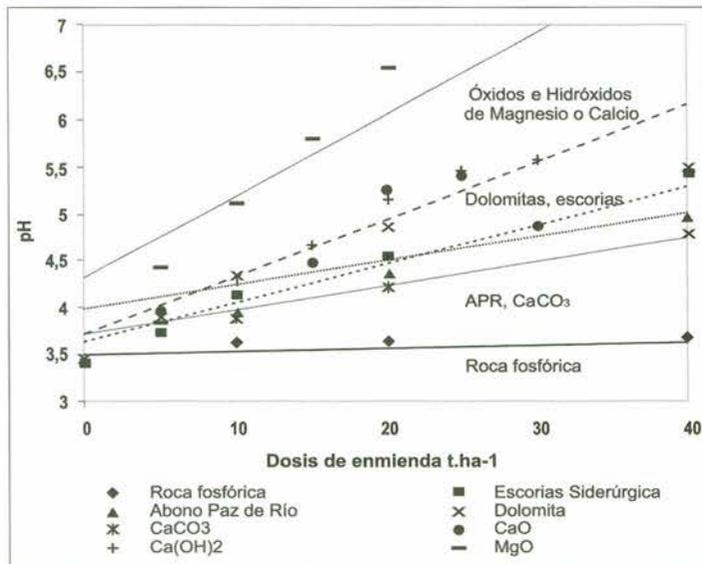


Figura 5.19 Pruebas de incubación exploratorias realizadas en SSA actuales con diferentes enmiendas comerciales de origen natural e industrial.

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.

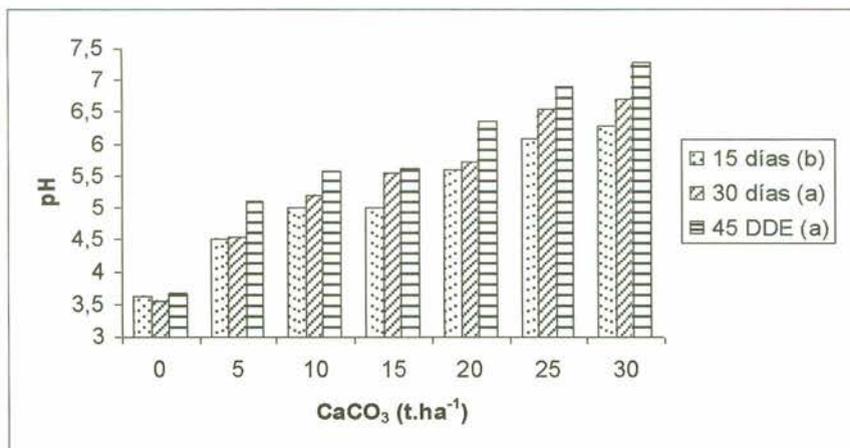


Figura 5.20 Variación del pH respecto al tiempo de reacción de la enmienda en SSA actuales (*Typic Sulfaquepts*).

Fuente: Gissat (2006).

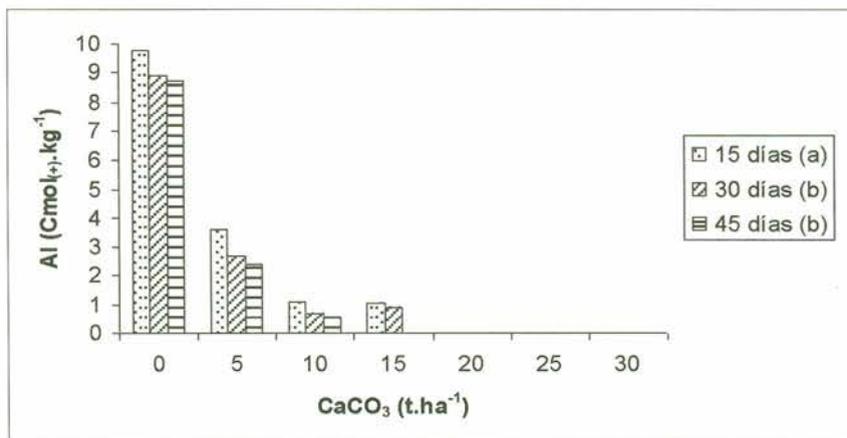


Figura 5.21 Variación de la concentración de aluminio respecto del tiempo de reacción de la enmienda en SSA actuales (*Typic Sulfaquepts*).

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⁻¹ cal viva + 2tha⁻¹ dolomita + 1tha⁻¹ roca fosfórica + 10tha⁻¹ gallinaza); PMC2 (14tha⁻¹ cal viva + 4tha⁻¹ dolomita + 2tha⁻¹ roca fosfórica + 10tha⁻¹ gallinaza) y PMC3(21tha⁻¹ cal viva + 6tha⁻¹ dolomita + 3tha⁻¹ roca fosfórica + 10tha⁻¹ 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.

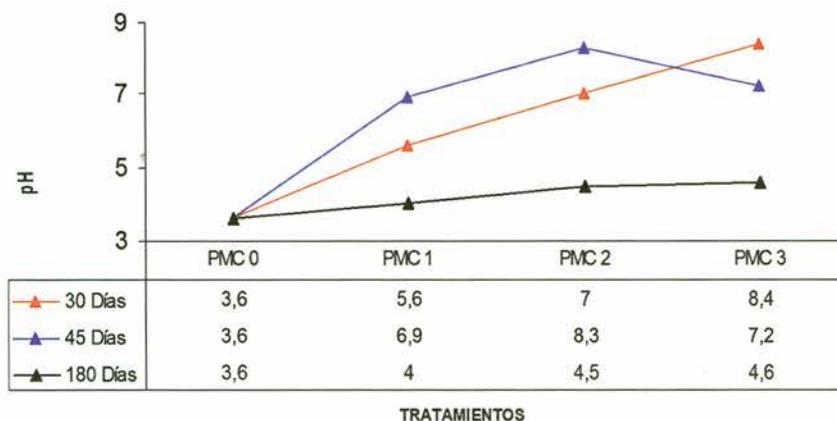


Figura 5.22 Efecto residual del pH del suelo por la aplicación de enmiendas en *Typic Sulfohemists*. Valle alto del río Chicamocha.

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⁻¹, 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⁻¹ 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 (Al³⁺, Na⁺) 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).

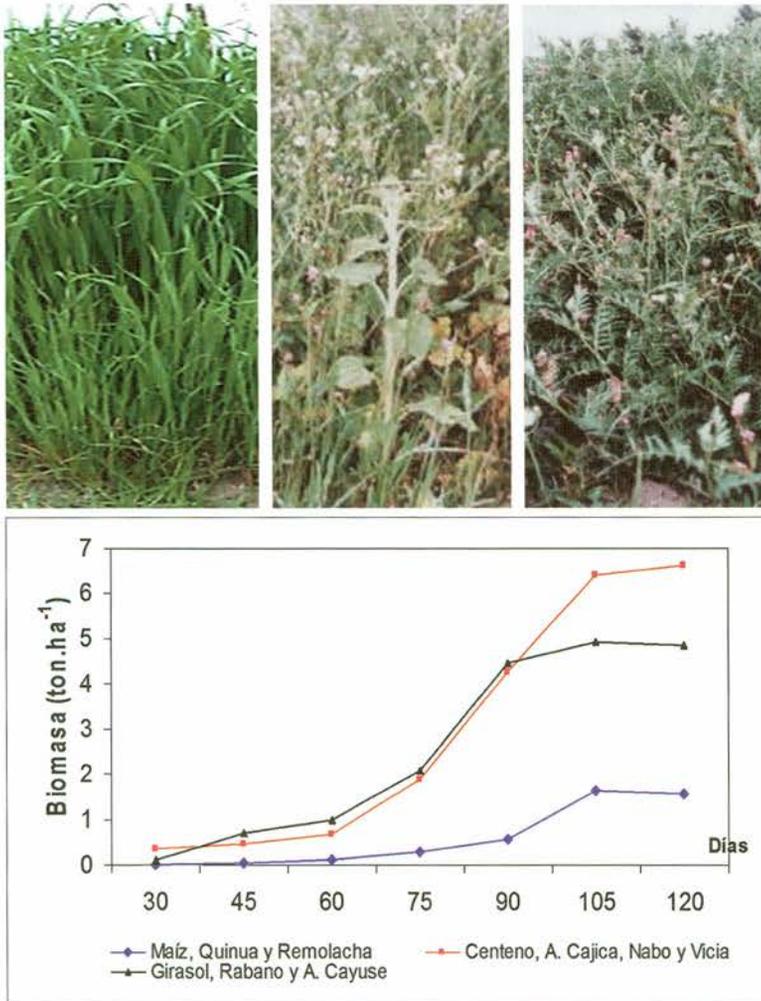


Figura 5.23 Uso de avena (*Avena sativa*), nabo forrajero (*Raphanus sativus* L) y vicia (*Vicia sativa* L) como abonos verdes en la recuperación productiva de SSA (izq); producción de biomasa de mezclas de especies potenciales como abonos verdes en *Typic Sulfohemists*. Valle alto del río Chicamocha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