
CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE SUELOS EN ZONA CARBONÍFERA DEL CESAR, COLOMBIA

Luis Carlos Díaz Muegue, Julio César Arranz González y Gustavo Peñuela Mesa

RESUMEN

El desarrollo de proyectos de explotación de carbón en el departamento del Cesar, Colombia, es una actividad de gran importancia económica para el país. El futuro de los terrenos que se verán afectados por la extracción de carbón dependerá del desarrollo de proyectos de rehabilitación basados en el conocimiento previo de las propiedades de los estériles mineros y los suelos de recubrimiento, además de otros muchos aspectos climáticos y ecológicos. De acuerdo con esta premisa, se han estudiado muestras de suelos y estériles mineros, empleando técnicas analíticas eda-

fológicas y geoquímicas. Se comprobó que el análisis de la información obtenida a partir de parámetros edáficos y geoquímicos puede ser de gran utilidad práctica para orientar futuras prácticas de rehabilitación, así como para orientar futuros estudios sobre los terrenos afectados por la explotación minera. Se concluye que puede ser interesante evaluar correctamente el significado del carbono orgánico y la salinidad de los materiales, así como la existencia de algunos elementos potencialmente tóxicos como el Se o el Zn, o las carencias de elementos nutritivos como el P.

Introducción

Colombia es un país exportador de carbón de importancia mundial, con una producción creciente, especialmente a raíz de la implantación de proyectos de gran minería a cielo abierto en los departamentos de La Guajira y Cesar. Históricamente, en el departamento del Cesar,

gran parte de las actividades económicas han estado ligadas a la ganadería y la agricultura, que aunque siguen prevaleciendo, están cediendo enormes superficies a la minería del carbón (CORPOCESAR-IHMEA, 2007). Dadas las condiciones de mercado actuales, las expectativas de exploración y explotación del mismo se han incrementado

exponencialmente. Esta perspectiva puede suponer una enorme modificación del paisaje y de la cobertura de suelos en el Cesar, puesto que, durante el desarrollo minero, el suelo y la vegetación son removidos de las áreas de minado, causando efectos directos como la pérdida de tierras cultivables y efectos indirectos como el aumento de la erosión.

La rehabilitación de los terrenos alterados por minería a cielo abierto tiene una componente que se sirve de aplicar técnicas propias de la ingeniería para la modificación del sistema hidrológico o la conservación de suelos. Otra parte fundamental en un proceso de rehabilitación del terreno es la que considera los aspectos relacionados con la

PALABRAS CLAVE / Carbón / Estériles Mineros / Minería Cielo Abierto / Suelos /

Recibido: 12/09/2011. Modificado: 11/01/2013. Aceptado: 14/01/2013.

Luis Carlos Díaz Muegue. Ingeniero en Minas, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Candidato a Doctor en Ingeniería Ambiental, Universidad de Antioquia (UDEA), Colombia. Investigador, Grupo Diagnóstico y Control de la

Contaminación (GDCON), UDEA, Colombia. Dirección: Laboratorio 232, SIU-GDCON-UDEA. Calle 62 # 52-59, Medellín, Colombia. e-mail: luisca Diaz@gmail.com

Julio César Arranz González. Doctor Ingeniero Agrónomo y Especialista en Ingeniería Ambiental, Universidad Politécnica de Madrid, España. Investigador, Instituto Geológico y Minero de España. e-mail: jc.arranz@igme.es

Gustavo Peñuela Mesa. Magister en Ciencias Químicas, Universidad Nacional de Colombia. Doctor en Química Ambiental, Universidad de Barcelona, España. Profesor, UDEA, Colombia. e-mail: gpenuela@udea.edu.co

PHYSICOCHEMICAL AND MINERALOGICAL SOIL CHARACTERIZATION IN THE CESAR COAL MINING AREA, COLOMBIA

Luis Carlos Díaz Muegue, Julio César Arranz González and Gustavo Peñuela Mesa

SUMMARY

The development of coal mining projects in the department of Cesar, Colombia, is an activity of great economic importance for the country. The future of the land affected by coal mining depends upon the development of rehabilitation projects based on prior knowledge of the properties of mine spoils and native soils, besides many other climatic and ecological aspects. Under this premise, we have studied spoil and soil samples, using soil and geochemical analytical techniques. It is shown that the

analysis of information obtained from soil and geochemical parameters can be of great practical use to guide future rehabilitation practices and to guide future research on land affected by mining. It is concluded that it may be interesting to evaluate correctly the significance of organic carbon and salinity of the materials, as well as the existence of some potentially toxic elements such as Se or Zn, or deficiencies of nutrients such as P.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MINERALÓGICA DE SOLOS EM ZONA CARBONÍFERA DO CESAR, COLOMBIA

Luis Carlos Díaz Muegue, Julio César Arranz González e Gustavo Peñuela Mesa

RESUMO

O desenvolvimento de projetos de mineração de carvão no departamento de Cesar, Colômbia, é uma atividade de grande importância econômica para o país. O futuro dos terrenos afetados pela mineração de carvão, dependerá do desenvolvimento de projetos de reabilitação com base no conhecimento prévio das propriedades dos rejeitos de minas e cobertura do solo, além de muitos outros aspectos climáticos e ecológicos. Sob esta premissa, temos estudado amostras de solo e mineiros estéril, utilizando solo e técnicas de

análise geoquímica. Tem sido demonstrado que a análise das informações obtidas a partir do solo e parâmetros geoquímicos podem ser de grande utilidade prática para orientar práticas de reabilitação futuro e para orientar futuras pesquisas em uma área afetada pela mineração. Concluímos que pode ser interessante para avaliar corretamente o significado de carbono orgânico e salinidade dos materiais e da existência de alguns elementos potencialmente tóxicos, como Sé ou Zn, ou deficiências de nutrientes, como P.

puesta en marcha del sistema suelo-vegetación, los cuales son normalmente los que van a tener mayor importancia superficial en un área alterada. Claramente, los futuros suelos que se construyan mediante vertido o extendido en la superficie de materiales geológicos no consolidados, capas de suelo, o ambos, en una secuencia vertical de mayor o menor calidad y espesor, determinarán las posibilidades de utilización futura del terreno y su capacidad productiva (Arranz González, 2006). Aunque no sea posible anticipar todas las circunstancias que se presentarán durante las operaciones de restauración (pendientes, compactación, incidencias meteorológicas, etc.), sí es posible intentar evaluar las propiedades favorables o desfavorables de los materiales que estarán disponibles (suelos nativos y estériles mineros). Partiendo de estas consideraciones, el objetivo de este estudio fue valorar la calidad edáfica de muestras de suelos y estériles mineros disponibles para la rehabilitación

ambiental de los terrenos en un proyecto de minería de carbón a cielo abierto en el Departamento del Cesar, al tiempo que se han reconocido los aspectos edáficos y geoquímicos que pueden tener mayor trascendencia para la futura caracterización de materiales con destino a la rehabilitación de los terrenos.

Materiales y métodos

Zona de estudio

El departamento del Cesar está localizado en el noreste de Colombia, limitando al norte con La Guajira, al este con Norte de Santander y Venezuela, al sur con Santander, y al oeste con Bolívar y Magdalena. Los yacimientos carboníferos están en la mitad septentrional del departamento y al sur de la Sierra Nevada de Santa Marta, zona de conservación ambiental, reserva de la biosfera, y territorio de cuatro de los grandes pueblos indígenas. Dispone de amplias vías de transporte, como la Troncal del Magdalena,

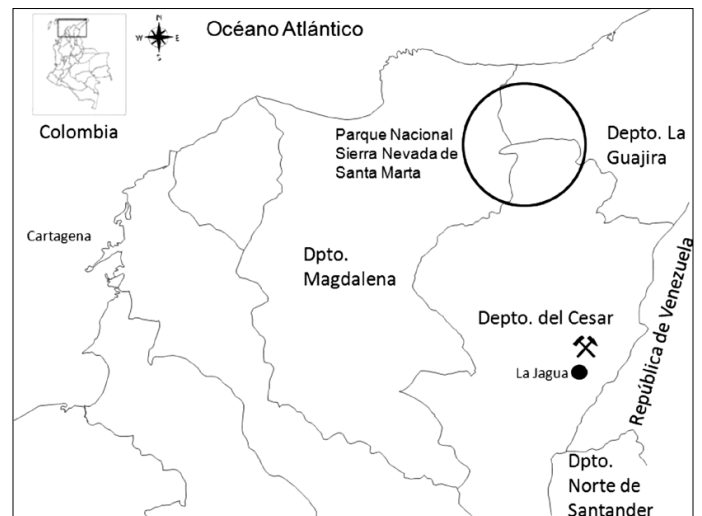


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

que comunica esta zona con Barranquilla, Bucaramanga y Bogotá y, desde estas ciudades con el resto del país y con los puertos de la Costa Atlántica. El río Magdalena es otra vía de transporte por medio de barcazas desde el puerto fluvial de Tamalameque hasta Barranquilla (INGEOMINAS, 2004). La

zona de estudio se ubica en la explotación denominada Cerrolargo (Figura 1), perteneciente al distrito minero de la Jagua, que recibe su nombre del municipio de la Jagua de Ibirico. Su actividad minera está centrada en la explotación de los mantos de carbón que se encuentran en la Formación Los Cuervos, de

TABLA I
DESCRIPCIÓN DE LOS LUGARES DE MUESTREO DE
SUELOS Y ESTÉRILES MINEROS

Denominación	Detalle
M1	Suelo cercano a la base de un botadero de estéril
M2	Material suelto procedente de un botadero de estéril
M3	Patio de acopio de carbón
M4	Canal de desagüe en suelo
M5	Límites entre desarrollo minero y área no intervenida
M6	Área no intervenida por la minería

edad Paleoceno superior-Eoceno inferior. Dicha formación se correlaciona con otras como Cerrejón (Ranchería) y Marcelina (Cuenca de Maracaibo, Venezuela). Está formada por rocas de carácter arcillo limoso, intercaladas con delgados niveles arenosos de grano fino y carbón en estratos de pocos centímetros a metros de espesor. Los carbones presentan niveles de argilitas carbonosas, lentes de óxidos y carbonatos de hierro e impurezas de azufre y pirita diseminada (Hernández, 2003). El carbón de la Jagua de Ibirico se presenta con un 7,14% de humedad, 5,32% de cenizas, 0,62% de azufre y 12,606 BTU/lb (INGEOMINAS, 2004).

La zona tiene una temperatura promedio entre 28 y 30°C. Las mayores precipitaciones se registran normalmente en octubre. Una característica del área, principalmente en los alrededores de La Jagua de Ibirico, es su alta precipitación con respecto a otras zonas del departamento. La precipitación media anual es de 1940mm, en régimen bimodal, con dos períodos húmedos: entre abril y junio, en los que se presenta el 31% de la precipitación anual, y entre agosto y noviembre, que corresponde al 53% (CORPOCESAR, 1997). El régimen de humedad de los suelos en la región es predominantemente Ústico o de transición a Údico según se asciende hacia la Sierra del Perijá. El régimen térmico es isohipertérmico (Malagón-Castro, 2003). En el entorno, los suelos han sido extensamente degradados y la acción de los procesos erosivos ha dejado en muchos lugares la roca al descubierto o muy cercana a la superficie. Los suelos más representativos se han clasificado como Lithic Troporthents, intercalados

con afloramientos rocosos y Paralithic Dystropepts sobre relieves quebrados, son de texturas medias, fuertemente ácidos (pH entre 5,5 y 5,0) y con bajo contenido de materia orgánica (IGAC, 1997). La zona de estudio se ubica dentro de la zona de vida de Holdridge denominada Bosque Seco Tropical, mostrando cuatro tipos de cobertura vegetal: bosque secundario intervenido, pastos enrastrados (árboles dispersos dentro de los pastizales), colinas arboladas (árboles dispersos de porte bajo y achaparrado dentro de pastizales) y rastrojos (áreas de potreros abandonados donde se ha dado inicio a la colonización de especies leñosas de porte arbustivo y arbóreo).

Muestras

Se seleccionaron seis sitios de muestreo de suelo del primer horizonte (0-15cm) y material suelto procedente de excavación en el proyecto minero Cerrolargo (Tabla I). En el laboratorio las muestras se secaron a humedad de equilibrio con el ambiente durante 24h y fueron pasadas por tamices para tomar fracciones de tamaños inferiores a 2mm.

Métodos analíticos

Se determinaron las siguientes características físico-quími-

cas del suelo. La textura fue determinada por el método del hidrómetro de Boyoucos (1962), para la fracción <2mm. El pH y la conductividad eléctrica fueron medidos en proporción suelo-agua 1:2 y 1:5, respectivamente (IGAC, 2008), empleando un pH-metro Orion Scientific Waltham y un conductímetro 720 WTW. El carbono orgánico del suelo (COS) fue determinado por el método de oxidación húmeda con dicromato potásico, conocido como método Walkley-Black (Mingorance *et al.*, 2007), cuantificado con un espectrofotómetro UV/Vis Janway 6405 a 590nm. Las bases intercambiables (Na, K, Ca y Mg) fueron determinadas por extracción de acetato de amonio 1M a pH 7,0 (IGAC, 2008) y cuantificadas por espectrofotometría de absorción atómica (EAA) con equipo GBC 932 Plus. El nitrógeno se valoró por el método Kjeldhal con el sistema destilador BUCHI 19449 -K-355, scrubber BUCHI 19440 -B-414 y digestor BUCHI 19450 -K-424. Los sulfatos fueron medidos por el método turbidimétrico del cloruro de bario (BaCl₂), utilizando para cuantificarlos 0,5N de NH₄Cl (IGAC, 2008) y lectura en espectrofotómetro a 440nm. El fósforo (P) disponible mediante extracción con HCl+NH₄F (Bray II) y ácido ascórbico con espectrofotómetro a 800nm (IGAC, 2008). La concentración total de metales (Fe, Cu, Zn, Al y Mn) se midió por EAA tras digestión ácida con HNO₃ (ICONTEC, 2003), utilizando espectrofotómetro de absorción atómica GBC 932 Plus. Además de la medida por ataque ácido y EAA, se ha empleado un equipo Niton XL2 de fluorescencia de rayos X (FRX), que proporciona medidas de contenidos

totales de elementos más pesados que el K, incluyendo otros metales y metaloides, algunos potencialmente tóxicos. Como apoyo a los análisis físicos y químicos, se determinó la composición mineral por difracción de rayos X (DRX); para estos análisis se prepararon las muestras a fragmentos inferiores a 0,044mm y para la determinación se utilizó un difractor Rigaku-Miniflex. Los difractogramas se tomaron con radiación de Cu, en el rango de 0°<2θ<80° y el paso de 0,05°/min (Martin *et al.*, 2008). Para la interpretación semi-cuantitativa se utilizó el software Xpowder 2010.01.10 y la base pdf2.

Resultados y Discusión

Desde el punto de vista de la textura (Tabla II), los materiales que fueron evaluado no presentan limitaciones graves, si bien es posible considerar a las muestras M2, M3 y M5 como bastante superiores a las otras en lo que se refiere a potencial de retención de humedad o equivalente de humedad (Eqhum en Tabla II), estimado a partir del equivalente de humedad de Gardner (Porta *et al.*, 1994). Además, la presencia de mayores cantidades de arcilla (dentro de lo razonable) es beneficiosa desde el punto de vista de la capacidad de intercambio catiónico.

Es de destacar el color gris muy oscuro de la muestra tomada en materiales estériles de mina (M2), así como de las otras dos muestras más influidas por la actividad minera: pardo grisáceo oscuro en M3 y gris oscuro en M4. Todos los colores fueron medidos en seco. El oscurecimiento de estas muestras se asocia claramente a la presencia de materia orgánica fósil.

TABLA II
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS MUESTRAS DE SUELOS Y ESTÉRILES MINEROS

Muestra	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura (USDA)	Eqhum (%)	Color (Munsell)
M1	73,9	7,5	18,6	Fr-Ar	13,7	10YR 4/3
M2	58,8	12,5	28,7	Fr-Ac-Ar	19,8	5Y 3/1
M3	58,9	12,5	28,6	Fr-Ac-Ar	19,8	10YR 4/2
M4	71,3	5,0	23,7	Fr-Ac-Ar	16,0	5Y 4/1
M5	63,9	7,5	28,6	Fr-Ac-Ar	19,0	2,5Y 7/4
M6	73,8	5,0	21,2	Fr-Ac-Ar	14,7	2,5Y 4/2

TABLA III
CONCENTRACION TOTAL DE METALES EN SUELOS Y ESTÉRILES MINEROS (mg·kg⁻¹)

Muestra	Fe	Zn	Al	Mn	Cu	Sr *	Se *	As *
M1	8234,03	31,94	3513,38	24,47	3,37	23,68	<LD	<LD
M2	18830,78	127,76	7213,66	267,45	29,03	98,67	2,16	7,99
M3	23267,03	165,42	10776,39	194,46	38,35	98,35	4,58	8,09
M4	29074,03	251,09	8578,80	330,98	37,76	103,79	3,06	10,33
M5	21729,52	134,06	12642,89	326,06	18,63	69,04	< LD	<LD
M6	8010,72	32,21	3593,41	183,11	1,39	37,05	< LD	4,97

* Lecturas con FRX Niton XL2.

LD: límite de detección. No registrados por FRX en ninguna muestra (<LD): Cd, Pb, Hg, Co, Cr, Ag, Sn.

Estos colores tan oscuros pueden influir en la temperatura superficial del terreno. Por ejemplo, Gentcheva-Kostadinova *et al.* (1994) llegaron a medir hasta 70°C en la superficie de estériles mineros negros en Bulgaria. Es razonable pensar que en las superficies de muchos botaderos de carbón del departamento del Cesar esté ocurriendo algo parecido, lo que sumado a otras posibles carencias y a la pendiente de los terrenos puede limitar enormemente la colonización vegetal.

En la Tabla III se exponen los resultados de contenidos en metales y metaloides. En términos generales, las muestras más influidas por la actividad minera poseen contenidos mayores que las muestras de suelos no alterados, ya sea por la presencia de restos de carbón en la muestra de estériles (M2), o por efecto del arrastre de materiales donde este fenómeno se ha podido producir (M3, M4 y M5). Los resultados obtenidos son completamente coherentes con los resultados obtenidos por Morales y Carmona (2007) en capas de carbón de la zona carbonífera del Cesar. Además de los que se muestran en la tabla, el método de fluorescencia de rayos X proporciona medidas de muchos otros elementos, los

cuales no alcanzaron los correspondientes niveles de detección en ninguna de las muestras o fueron poco significativos. Así, por ejemplo, los niveles de Ni (máximo de 43,38 ppm) y Mo (máximo de 5,58) no permiten distinguir claramente influencias de la minería y fueron todos normales, incluso para suelos naturales.

Como puede verse, los elementos más abundantes (Fe y Al), tienden estar presentes en mayor cantidad en las muestras que han podido recibir alguna influencia de la actividad minera sin ser muestras de estériles mineros: M3, M4 y M5, lo que se interpreta como enriquecimientos asociados al posible arrastre de materiales procedente del entorno y a la posible precipitación de fases minerales secundarias (principalmente sulfatos). El Mn alcanza el valor de 330,98ppm en la muestra tomada en el canal de drenaje. Igualmente, el As alcanza el valor máximo de 10,33ppm en la misma muestra. En cualquier caso, dichos valores están muy lejos de los que pueden considerarse críticos (Alloway, 1990; Sheppard *et al.*, 1992). Es normal encontrar altos niveles de Fe y Mn asociados a la presencia de siderita en carbones de origen tropical (Larsen y Mann, 2005).

En cuanto a los elementos traza, el Zn destaca notablemente en las muestras influidas por la actividad minera, especialmente en el canal de drenaje (251,09ppm). Aún así, los valores medidos no pueden considerarse peligrosos ni siquiera pensando en un hipotético cultivo agrícola sobre los mismos (Sheppard *et al.*, 1992; Adriano *et al.*, 1997). El Cu está presente en muy bajas concentraciones en las muestras M1 y M6 (suelos naturales no alterados) y en el resto, incluidas las muestras más influidas por la actividad minera, puede considerarse poco importante, incluso para el cultivo agrícola (Sheppard, 1992). Con respecto al Sr el contenido mayor se localiza en M4 (103,79ppm), el cual supera los niveles geométricos reportados por Kabata-Pendias y Pendias (2000) en suelos de Venezuela (13-39ppm) pero inferior a niveles reportados por el mismo autor en otros estudios sobre suelos naturales de América (110-445ppm). A pesar de estos niveles el contenido no se considera generador de riesgo toxicológico para las plantas. Todos los elementos comentados hasta aquí se encuentran en niveles de concentración inferiores a los fijados por Railroad Commission de Texas (1988) para contenidos

de elementos recomendables en las capas superiores de suelos mineros, si bien es posible que en buena medida se encuentren en formas solubles (sulfatos).

En cuanto al Se, este sólo se detecta en las muestras más afectadas por la actividad minera, superando los contenidos que se consideran normales en suelos (Adriano, 2001). Sin embargo, según los criterios fijados por Railroad Commission de Texas (1988) para contenidos de elementos recomendables en las capas superiores de suelos mineros, en dichas muestras se supera el nivel recomendable de 2ppm. Puede ser conveniente considerar este elemento en futuros trabajos de investigación, controlando los niveles presentes en los materiales mediante técnicas más refinadas y valorando las cantidades fácilmente solubles y/o movilizables.

En la Tabla IV se muestran los resultados de diversos ensayos típicos de caracterización agronómica de suelos. Puede comprobarse que, con la única excepción de la muestra procedente de botadero, el pH de las muestras es excesivamente ácido, puesto que el intervalo más favorable de pH está entre 6 y 7, en el que la mayoría de los nutrientes están disponibles.

En cuanto a los contenidos en carbono orgánico de las muestras estudiadas, los niveles son mayores en aquellas muestras que tienen más posibilidades de incluir restos de carbón (M3 y M2, aunque también en M4). Es sabido que los estériles mineros procedentes de la minería de carbón pueden contener elevados niveles de materia orgánica, la cual es esencialmente carbón residual, debido a la mezcla que se produce entre capas de estériles sin carbón con otras en las que existe un cierto contenido en carbón y con capas de carbón no explotables por su delgadez. Parece claro que la presencia de materia orgánica de origen geogénico va a interferir en las medidas analíticas de materia orgánica del suelo por el método de Walkley-Black y, aunque es posible que ese carbono fósil retorne al ciclo actual de la materia orgánica por intervención de hongos y otros mi-

TABLA IV
CARACTERIZACIÓN AGRONÓMICA DE LAS MUESTRAS DE SUELOS Y ESTÉRILES MINEROS

Muestra	pH	COS (%)	N (%)	P (ppm)	Na (cmol/kg)	K (cmol/kg)	Mg (cmol/kg)	Ca (cmol/kg)	Suma bases cambio
M1	4,4	1,05	0,08	3,92	0,3	0,6	1,4	7,9	10,2
M2	6,6	1,67	0,26	13,96	0,3	0,4	3,7	20,9	25,3
M3	4,4	2,25	0,27	2,80	0,5	0,4	7,9	8,9	17,7
M4	4,8	1,36	0,12	10,12	0,3	0,5	7,5	10,6	18,9
M5	5,1	0,43	0,23	0,51	0,5	0,3	3,3	8,8	12,9
M6	5,9	0,79	0,08	1,30	0,3	0,4	1,2	10,2	12,4

TABLA V
SALINIDAD DE LAS MUESTRAS DE SUELOS Y ESTÉRILES MINEROS

Muestra	CE _{1:5} (dS·m ⁻¹)	Factor textural*	CEES** (dS·m ⁻¹)	Sulfatos (mg·kg ⁻¹)	Valoración
M1	0,025	13,8	0,345	18,83	No salino
M2	0,920	9,5	8,740	41,15	Muy salino
M3	0,930	9,5	0,884	22,27	No salino
M4	0,874	9,5	8,303	80,54	Muy salino
M5	0,120	9,5	0,114	15,43	No salino
M6	0,110	9,5	0,105	17,71	No salino

*Factor textural: (NSW Agriculture, 2000).

**CE_{ES}: conductividad eléctrica del extracto de saturación estimado a partir del extracto 1:5: <2 (no salino); 2-4 (ligeramente salino); 4-8 (salino); 8-16 (muy salino), y >16 (extremadamente salino), según USDA (1954).

croorganismos, no esta claro que esto ocurra a corto plazo, ni qué importancia ecológica inmediata puede jugar (Arranz González, 2011). En este sentido, puede ser interesante aplicar técnicas más complejas para la distinción de las distintas fracciones orgánicas en suelos y estériles mineros procedentes de la minería de carbón.

Algo semejante ocurre con el nitrógeno, el cual puede considerarse bajo en las muestras de suelo menos afectadas (M1 y M6) y medio en las demás. Vandevender y Sencindiver (1982) comentan que ciertas capas de recubrimientos de carbón pueden contener cantidades apreciables de N y que, incluso, el aporte del mismo puede no ser necesario cuando están presentes. Sin embargo, Li y Daniels (1994) encuentran que pueden existir importantes

cantidades de N en los estériles frescos de carbón, aunque pueden estar presentes en formas no disponibles para las plantas. Se suele asumir, con un criterio conservador, que existe siempre una práctica ausencia de N en los estériles mineros, lo que justifica la recomendación de aportar dosis de N para sostener el desarrollo vegetal, al menos inicialmente. En cuanto al fósforo, las medidas obtenidas permiten calificar los niveles como bajos en M2 y M4, y excesivamente limitantes en el resto. Muy posiblemente, en las muestras de suelos, parte del P se encuentre precipitado formado fosfato de hierro o de aluminio, lo que suele ser corriente en suelos ácidos. Normalmente se asume que por debajo de 15ppm de P extraíble por el método de Bray II, se ve reducida la producción de la mayo-

ría de los cultivos y gran parte de las pasturas, aunque seguramente un contenido en 10ppm podría ser aceptable para la mayoría de suelos ácidos colombianos si se pretende destinarlos a un uso forestal. Así pues, en el futuro, independientemente de la combinación de materiales que se utilice en prácticas de rehabilitación de terrenos, habrá que poner cuidado en controlar los niveles de P, y evaluar la necesidad de abonar.

En cuanto a los elementos del complejo de cambio, es destacable que el máximo valor se obtiene en la muestra de estéril minero. Los niveles de Ca, K y Mg son medios o altos, a excepción de la muestra de estéril minero en la que el Ca de cambio puede considerarse muy alto. Esto es bueno desde el punto de vista ambiental, pues

altos niveles de Ca pueden ayudar a neutralizar la posible generación de acidez que tuviera lugar como consecuencia de la oxidación de la pirita que pudiera estar presente en los mismos. En cuanto al Na, dada la proporción en la que está presente en las muestras no es previsible problema alguno de sodicidad. Sin embargo, se ha señalado que la salinidad puede ser un problema serio en estériles y suelos mineros procedentes de la explotación de carbón (Arranz González, 2011). La forma más extendida de caracterizar la salinidad del suelo es a partir de la conductividad eléctrica del extracto de saturación. Sin embargo, el extracto es engorroso de preparar, especialmente en materiales con alto contenido de materia orgánica. Stewart y Daniels (1992) proponen la valoración de la salinidad en estériles mineros sobre extractos acuosos en proporción 1:5 (suelo:agua). Dichos extractos son empleados también normalmente en pruebas de campo para la evaluación agronómica. El resultado en dicha suspensión permite estimar de forma aproximada la CE del extracto de saturación mediante un factor que depende de la textura. En la Tabla V se muestran los resultados de las medidas, factores y valoraciones de los materiales estudiados.

Puede comprobarse, además, un incremento importante del contenido en sulfatos de dichas muestras, ya sea como consecuencia en un mayor contenido en yeso primario o formado con posterioridad a la oxidación de la pirita que pudiera estar presente en las capas de carbón. No obstante, los niveles de S pirítico reportados para los carbones del distrito de la Jagua son muy bajos (0,27% como máximo según INGEOMINAS, 2004), siendo inferiores a lo que se considera necesario para que puedan presentarse problemas de formación de aguas ácidas.

La Figura 2 presenta los resultados de los minerales identificados en las muestras. Murad y Rojik (2004) indican la importancia de identificar la presencia de minerales potencialmente formadores de drena-

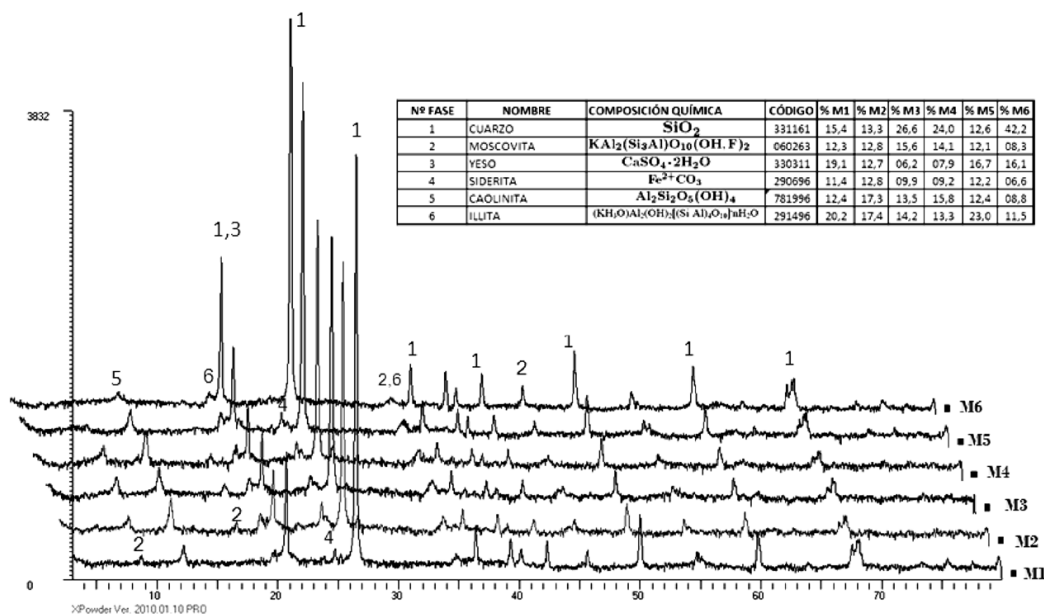


Figura 2. Difractogramas que muestran los minerales identificados y semicuantificados por DRX de las muestras.

je ácido de minas o minerales productos de la oxidación en minas de carbón (pirita, lepidocrocita, jarosita, goetita, schwertmannita y ferrihidrita). Para el caso de las muestras analizadas por DRX no se encontraron evidencias destacadas de sus contenidos, lo cual no es extraño, debido a la baja capacidad de detección del método y a la baja cristalinidad que muestran muchas veces estos minerales, a lo que se suma el bajo nivel de S pirítico reconocido en los carbones de la Jagua. Los difractogramas muestran presencia mayoritaria de cuarzo, moscovita, yeso, siderita, caolinita e illita. La caolinita es normal en suelos tropicales aún poco evolucionados, pero los máximos valores se obtuvieron en la muestra M1 que es un estéril minero. Esto se explica porque puede ser un producto de la alteración de las capas de carbón si están próximas a la superficie, como han señalado Senkayi *et al.* (1983). La moscovita es más visible en las muestras de estériles y materiales influidos por la minería (M2, M3, M4), lo que puede servir como indicador con respecto a las muestras de suelos naturales (M1 y M6).

Conclusiones

Los estériles mineros estudiados son de color muy oscuro, lo que puede ir en detrimento de la colonización vegetal por su susceptibilidad al calentamiento excesivo. Por otro lado, se ha comprobado que los estériles mineros podrían generar graves problemas de salinidad, siendo recomendable hacer extensivo el estudio de la salinidad para este tipo de materiales, ya sea mediante la medida de la conductividad eléctrica en extractos de saturación o siguiendo el procedimiento empleado en este estudio.

Los bajos contenidos en azufre pirítico de los carbones de la Jagua y, presumiblemente, en los estériles estudiados inducen a pensar que no son potencialmente generadores de acidez. Por esta razón, el pH no es excesivamente ácido ni se han encontrado oxihidróxidos ni hi-

droxisulfatos de hierro. No obstante, la presencia de sulfatos es esperable, sobre todo en vías de drenaje, donde pueden coprecipitar elementos potencialmente tóxicos que será necesario controlar. En particular, puede ser recomendable analizar el contenido en Se en los estériles de carbón, siendo deseable que se realicen futuros estudios sobre el contenido de este elemento en los estériles mineros, y sobre su disponibilidad y/o solubilidad.

Los datos obtenidos sobre contenidos en carbono orgánico no permiten afirmar que toda la materia orgánica presente en muestras en las que se sospeche que pueden existir restos de carbón pueda considerarse funcionalmente equivalente a la materia orgánica edáfica. Desde el punto de vista nutricional, no queda claro tampoco en qué medida puede haber N disponible suficiente en las muestras, por lo que se recomienda considerar necesario el aporte de N para sostener el desarrollo vegetal, si se plantea revegetar sobre los materiales estudiados. También es esperable encontrar deficiencias de P, tanto en suelos naturales como en estériles de mina.

Para terminar, se ha comprobado que el análisis de la información obtenida a partir de parámetros edáficos y geoquímicos con el apoyo de análisis mineralógicos, puede ser de gran utilidad práctica para orientar futuras prácticas de rehabilitación, así como para orientar futuras investigaciones sobre los terrenos afectados por la explotación minera.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Grupo GDICON de la Universidad de Antioquia, Instituto Geológico Minero de España, Colciencias, Gobernación del César y Universidad Popular del César, por su apoyo económico y logístico en la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

Adriano DC (2001) *Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability,*

and Risks of Metals. 2ª ed. Springer. Nueva York, EEUU. 867 pp.

Alloway BJ (1990) Soil processes and the behavior of metals. En Alloway BJ (Ed.) *Heavy Metals in Soils.* Wiley. Nueva York, EEUU. pp. 7-18.

Arranz-González JC (2007) Caracterización edafológica de lugares alterados por minería de carbón en la provincia de Teruel (España). *Doc. Ing.* 5: 19-30.

Arranz-González JC (2011) Suelos mineros asociados a la minería de carbón a cielo abierto en España: una revisión. *Bol. Geol. Min.* 122: 3-16

Bouyoucos GJ (1962) Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agron. J.* 54: 464-465.

CORPOCÉSAR (1997) *Informe Anual de la Actividad Meteorológica de la Cuenca del Río César.* Informe interno. pp. 87-103.

CORPOCÉSAR-IHMEA (2007) *Plan de Acción Regional para la Lucha Contra la Desertificación y la Sequía en el Departamento del Cesar con Énfasis en la Región del Río Cesar.* Corporación Autónoma Regional del Cesar e Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, Colombia. 90 pp.

Hernández M (2003) *Geología de la Plancha 48 La Jagua de Ibirico. Memoria Explicativa.* Instituto de investigación e información geocientífica, minero ambiental y nuclear (INGEOMINAS). Bogotá, Colombia. 104 pp.

ICONTEC (2003) *Norma Técnica Colombiana NTC 3934 para la Determinación de Metales en Extractos de Suelos.* Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Bogotá, Colombia. 26 pp.

IGAC (1997) *Estudio General de Suelos del Departamento del César.* Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia. 337 pp.

IGAC (2008) *Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos.* 6ª ed. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia. 674 pp.

INGEOMINAS (2004) *El Carbón Colombiano. Recursos, Reservas y Calidad.* Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-ambiental y Nuclear. Bogotá, Colombia. 470 pp.

Kabata-Pendias A, Pendias H (2000) *Trace Elements in Soils and Plants.* 3ª ed. CRC. Boca Ratón, FL, EEUU. 432 pp.

Larsen D, Mann R (2005) Origin of high manganese concentrations in coal mine drainage, Eastern Tennessee. *J. Geochem. Explor.* 86: 143-163.

Li RS, Daniels WL (1994) Nitrogen accumulation and form over time

in young mine soils. *J. Env. Qual.* 23: 166-172.

Malagón-Castro D (2003) Ensayo sobre tipología de suelos colombianos-Énfasis en génesis y aspectos ambientales. *Rev. Acad. Col. Cs.* 27: 319-341.

Mingorance M, Barahona E, Fernández-Gálvez J (2007) Guidelines for improving organic carbon recovery by the wet oxidation method. *Chemosphere* 68: 409-413.

Morales WA, Carmona I (2007) Estudio de algunos elementos traza en carbones de la Cuenca César-Ranchería, Colombia. *Bol. Cs. Tierra* 20: 75-88.

Murad E, Rojik P (2004) Jarosite, schwertmannite, goethite, ferrihydrite and lepidocrocite: the legacy of coal and sulfide ore mining. *3rd Australian New Zealand Soils Conference.* Sydney, Australia. pp. 1-8.

NSW Agriculture (2000) *Soil Salinity Note N° 8.* Orange, New South Wales, Australia.

Porta J, López-Acevedo M, Roquero C (1994) *Edafología para la Agricultura y el Ambiente.* Mundi Prensa. Madrid, España. 625 pp.

Railroad Commission of Texas (1988) Materials suitable for placement in the top four feet of leveled minespoils, including topsoil substitutes. Technical Release SA-2. Reproducido en Soil Working Group. 1998. *Texas Mineland Reclamation Monitoring Program Issues.* Surface Mining and Reclamation Division and Railroad Commission of Texas. Austin, TX, EEUU. pp. 24-32.

Senkayi AL, Dixon JB, Hossner LR, Viani BE (1983) Mineralogical transformations during weathering of lignite overburden in East Texas. *Clays Clay Min.* 31: 49-56.

Sheppard SC, Gaudet C, Sheppard ML, Cureton PM, Wong MP (1992) The development of assessment and remediation guidelines for contaminated soils. A review of the science. *Can. J. Soil Sci.* 72: 359-394.

Stewart BR, Daniels WL (1992) Physical and chemical properties of coal refuse from southwest Virginia. *J. Env. Qual.* 21:635-642.

USDA (1954) *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils.* Agriculture Handbook N° 60. United States Department of Agriculture. Washington, DC, EEUU. 159 pp.

Vandevender JC, Sencindiver JC (1982) The effects of three forms of nitrogen fertilizer, phosphorus and hydrated lime on abandoned mine land reclamation. *Symposium on Surface Mining Hydrology, Sedimentology and Reclamation.* University of Kentucky. Lexington, KY, EEUU. pp. 497-502.