

RESTAURACIÓN DE SUELOS DE MINA: CONTRIBUCIÓN A LA FIJACIÓN DE CARBONO EN EL ECOSISTEMA TERRESTRE

C. MONTERROSO¹, A. GIL BUENO², S. PEREZ VARELA¹, F. MACÍAS¹

¹Dpto. Edafología e Q. Agrícola, Universidade de Santiago de Compostela, 15702-Santiago. E-mail: edcarmel@usc.es

²Dpto. de Restauración de Terrenos, ENDESA, As Pontes, A Coruña.

Abstract. The restoration and revegetation of minesoils contribute to the enhancement of organic matter in the soil and biomass, and leads to the fixation of atmospheric CO₂. One aim of this study was to evaluate the effects of reclamation treatments in the As Pontes lignite mine (NW Spain) on soil organic matter accumulation, and its particle-size distribution, between 1991 and 2001. In this period, soil organic carbon increased between 3 and 25 MgC/ha in soils with topsoiling treatment (TS) and between 10 and 35 MgC/ha in that without topsoiling (WTS). In TS soils organic matter accumulated mainly in the fine fractions (clay and silt) with a low C/N ratio, while a coarse organic fraction with high C/N ratio dominated the WTS soils. Nevertheless, the latter showed incorporation of the organic matter towards the fine fractions with age, reflecting an organic matter evolution towards more stable fractions.

Additionally, the capacity of mine soils to act as sinks for carbon when planted with energetic crops was to evaluate. For this, an experiment was carried out on reclaimed soils whereby productivity and the amount of fixed C in the biomass and the soils was monitored over a period of 3 years. The experiment was carried out using different plant species (*Ulex europaeus*, *Cytisus scoparius*, *Acacia dealbata*, *Acacia melanoxylon*, *Alnus glutinosa* and *Eucalyptus globulus*) and several densities (2, 1 y 0.66 plants per m²). Preliminary results indicated that both species and density of plants had a significant effect on production and therefore C fixation in the soil and biomass.

Key words: reclamation of minesoils, carbon sequestration, soil organic matter, biomass production.

Resumen. La restauración y revegetación de suelos de mina contribuyen a la fijación de CO₂ atmosférico y a su inmovilización en la materia orgánica del suelo. En este estudio se evalúa el efecto de las distintas técnicas de restauración utilizadas en la mina de lignito de As Pontes (NW España) sobre la incorporación de materia orgánica del suelo y su distribución en las distintas fracciones granulométricas, entre 1991 y 2001. En este período, el carbono orgánico del suelo aumentó entre 3 y 25 Mg C ha⁻¹ en los suelos restaurados con tierra vegetal (TV) y entre 10 y 35 Mg C ha⁻¹ en los restaurados sin tierra vegetal (STV). La materia orgánica se acumula preferentemente en las fracciones orgánicas finas, con bajas relaciones C/N (12-13), en los suelos TV y en las fracciones gruesas, con altas relaciones C/N, en los suelos STV. Sin embargo, en estos últimos se aprecia una incorporación efectiva de la materia orgánica hacia las fracciones más finas y una reducción de la relación C/N con la antigüedad, lo que refleja su evolución hacia fracciones de materia orgánica más estables.

Adicionalmente se valoró la capacidad de los suelos de mina como sumideros de carbono a través de la implantación de cultivos de elevada productividad para la producción de energía. Para ello se realizó un ensayo en los suelos restaurados y se evaluó la cantidad de C fijado en el suelo y la biomasa durante 3 años. El ensayo se realizó con distintas especies vegetales (*Ulex europaeus*, *Cytisus scoparius*, *Acacia dealbata*, *Acacia melanoxylon*, *Alnus glutinosa* y *Eucalypto globulus*) y con distintos marcos de plantación. Los primeros resultados indican que tanto la especie como los marcos de plantación influyen sobre la producción y, por tanto, sobre la fijación de C en suelo y biomasa.

Palabras clave: Restauración, suelos de mina, secuestro de carbono, materia orgánica, producción de biomasa

INTRODUCCIÓN

Aunque no existen estimaciones cuantitativas las actividades mineras contribuyen a la pérdida de carbono a partir del ecosistema terrestre. Sin embargo, la restauración de las áreas afectadas por el proceso minero puede contrarrestar este efecto a través de la fijación de carbono en suelos y biomasa. Dependiendo de su uso final, los suelos restaurados podrían convertirse en sumideros netos de carbono.

Clásicamente los planes de restauración de suelos de mina han planteado como objetivos conseguir una cobertura vegetal estable, controlar la erosión y proteger la calidad de las aguas (Daniels y Zipper, 1988). El secuestro de carbono en el suelo y la biomasa es un beneficio adicional de la restauración. Numerosos autores mostraron incrementos significativos de la materia orgánica del suelo (MOS) en el proceso de restauración (Malik y Scullion, 1999; Akala y Lal, 2001), si bien este incremento no siempre iba acompañado de un aumento proporcional de carbohidratos ni de la estabilidad de los agregados del suelo (Malik y Scullion, 1999). El entendimiento de los factores que determinan la acumulación de la materia orgánica y su estabilidad a largo plazo requiere más estudios.

A pocos años de su clausura, la mina de lignito de As Pontes (A Coruña) ha generado una escombrera de unas 1400 ha, de las que más de 1000 ha están actualmente restauradas. El agotamiento de los recursos en esta zona coincide con el interés creciente que, en el marco del protocolo de Kyoto, ha suscitado la producción de biomasa para la producción energética. El beneficio principal de la producción de biomasa, como sustituto de combustibles fósiles, deriva de que la vegetación fija CO₂ atmosférico durante su desarrollo, el CO₂ es liberado tras la combustión de la biomasa para la producción energética y, posteriormente, es capturado por un nuevo cultivo. Considerando el

proceso como un ciclo, la generación energética a partir de biomasa no provoca apenas liberación neta de CO₂ por lo que su producción se considera una de las fuentes de energía más importantes para el futuro. En este contexto, se planteó el cultivo de especies de alta capacidad productiva con fines energéticos como uno de los usos más adecuados para las superficies finales restauradas del área minera de As Pontes.

En este trabajo se evalúa la capacidad de fijación de carbono en los suelos restaurados de la mina de As Pontes, a través del estudio de la incorporación de materia orgánica y su evolución temporal durante el proceso de restauración. Así mismo, se evalúa, a través de ensayos con distintas especies de crecimiento rápido, la viabilidad del uso de producción de biomasa con fines energéticos en los suelos restaurados, con énfasis en los aspectos relacionados con la fijación de carbono en los suelos y la biomasa vegetal.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

Este estudio fue realizado en la mina de lignito de As Pontes, situada en el municipio del mismo nombre en el NE de la provincia de A Coruña (43° 27' N, 7° 15' W). La temperatura media del área es 11,6° y la precipitación de 1684 mm (media de 48 años). La precipitación está distribuida homogéneamente, aunque hay un período relativamente seco entre junio y agosto que coincide con las mayores temperaturas. El área de explotación abarca una superficie de 6 km de longitud en dirección NW-SE y 2.5 km de anchura en dirección NE-SO, tiene una profundidad máxima de 400 m y se estructura en capas alternantes de lignito y estériles. El ritmo de extracción de la mina es de 12 Mt de lignito año⁻¹, lo que supone una acumulación en la escombrera de 42 Mm² de estériles año⁻¹. La escombrera final tendrá

unos 960 Mm³ de estériles, una superficie final de 1400 ha y una altura prevista de 264 m desde la base, que corresponde a la cota 606. Los estériles de la escombrera son muy heterogéneos y consisten en sedimentos terciarios, carbonosos y no carbonosos, y pizarras, con frecuente presencia de pirita. El proceso de restauración de la escombrera se inició en 1980 y actualmente existen más de 1000 ha restauradas. Para la construcción de las superficies finales se hace una primera selección de los estériles, basada principalmente en el contenido de pirita, y

posteriormente se aplican enmiendas básicas (caliza o ceniza derivada de la combustión del lignito). Tras el control de la acidez, el suelo se fertiliza y se revegeta con distintas especies pratenses, arbustivas y arbóreas. Los suelos que, por su elevado contenido de pirita, no pueden ser corregidos con las enmiendas, son cubiertos con una capa de tierra vegetal, recuperada de los horizontes superficiales de los suelos naturales de la zona, antes de la revegetación (Gil Bueno et al., 1990).

TABLA 1: Características generales de las parcelas de seguimiento de la escombrera de la mina de lignito de As Pontes. Tipo de esteril: Es = esquistos, Sd = sedimentos terciarios, Pz = pizarras con alto (Pz-1), medio (Pz-2) y bajo (Pz-3) contenido de sulfuros; AC = arcilla carbonosa con alto contenido de sulfuros; Cz = ceniza volante; TV = aplicación de una capa de tierra vegetal: + = si; - = no.

Parcela de seguimiento	Estéril predominante	Fecha de construcción	Tareas de restauración			Vegetación predominante
			TV	Encalado	Fertiliz. orgánico	
CSP	AC	1980	+	-	-	<i>Pinus radiata</i>
CSA	AC	1980	+	-	-	<i>Betula pubescens</i>
CSC	AC	1980	+	-	-	<i>Castanea sativa</i>
P206	Pz-2	1986	+	CaCO ₃	-	<i>B. pubescens</i> <i>Quercus rubra</i> <i>Castanea sativa</i> <i>Pinus iradiata</i>
TH03	Pz-2	1987	+	-	-	<i>Pinus pinaster</i> <i>Alnus glutinosa</i>
P104	Pz-1	1986	-	Cz	-	Pradera
P205	Pz-3	1986	-	CaCO ₃	Gallinaza	Pradera
TH04	Pz-2	1988		CaCO ₃	-	Pradera
A25	Sd+Pz-3	1988	-	Cz	-	Pradera
PTA	Es	1993	-	-	Residuos lácteos	Pradera
PF	Es	1993	-	-	-	Pradera

Estudio de la acumulación y evolución de la materia orgánica

Para este estudio se seleccionaron 11 parcelas de la escombrera con superficies aproximadas de 1,0 ha. Las parcelas difieren en antigüedad, tipo de material utilizado en su construcción, tareas de restauración y vegetación (Tabla 1). En 1991 se realizó un muestreo en 9 de las 11 parcelas. Cinco de ellas (CSP, CSC, CSA, P206 y TH03) fueron restauradas entre 1980 y 1986 con la aplicación de tierra vegetal (tratamiento TV) y revegetadas con especies arbóreas; las otras cuatro (P104, TH04, P205 y A25) fueron restauradas entre 1986 y 1988 sin aplicación de tierra vegetal (tratamiento STV) y revegetadas con especies pratenses. El muestreo se repitió en enero

de 1995 y noviembre de 2001, incorporando dos nuevas parcelas (PTA y PF), revegetadas directamente, sin aplicación de tierra vegetal (STV), con especies pratenses. En cada parcela y momento de muestreo se tomaron entre 6 y 8 muestras superficiales (0-15 cm). Las propiedades físico-químicas de estos suelos variaban ampliamente, debido a la naturaleza del material original y al tipo de restauración realizada (Monterroso et al., 1998). Los suelos restaurados con tierra vegetal tienen carácter ácido ($\text{pH} < 4,9$), mientras que los restaurados con estériles presentan intervalos de pH más amplios, desde ácidos hasta neutros ($\text{pH} 4,4-7,6$). La capacidad de intercambio catiónico es baja en toda la escombrera, con valores que oscilan entre 2,4 y 8,5 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ (Tabla 2).

TABLA 2: pH y cationes de cambio en los suelos de las parcelas de seguimiento de la escombrera de la mina de lignito de As Pontes (0-15 cm) y en suelos naturales del entorno (SN, horizonte A). Valores medios y desviación estándar

Parcela	pH (agua)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺	CIC
		Complejo de cambio, $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, NH_4Cl sin tamponar					
CSP	4,6 ± 0,1	0,68 ± 0,77	0,31 ± 0,25	0,10 ± 0,02	0,27 ± 0,07	4,18 ± 0,95	586 ± 1,29
CSC	4,5 ± 0,7	2,53 ± 1,72	0,58 ± 0,27	0,09 ± 0,02	0,36 ± 0,08	4,56 ± 3,10	8,54 ± 2,78
CSA	3,4 ± 0,5	0,54 ± 0,18	0,16 ± 0,08	0,07 ± 0,02	0,15 ± 0,06	3,87 ± 1,27	7,08 ± 1,03
TH03	4,8 ± 0,1	1,33 ± 0,40	0,26 ± 0,07	0,10 ± 0,01	0,17 ± 0,03	2,36 ± 0,28	4,64 ± 0,41
P206	4,6 ± 0,1	0,61 ± 0,60	0,14 ± 0,06	0,06 ± 0,02	0,15 ± 0,04	2,74 ± 0,85	4,13 ± 0,93
P104	6,2 ± 0,2	4,07 ± 0,84	0,51 ± 0,11	0,08 ± 0,02	0,20 ± 0,03	0,05 ± 0,04	4,96 ± 0,96
P205	4,9 ± 0,2	1,97 ± 0,67	0,33 ± 0,14	0,04 ± 0,01	0,07 ± 0,01	0,79 ± 0,53	3,54 ± 0,43
TH04	5,7 ± 0,7	4,02 ± 2,20	0,79 ± 0,18	0,01 ± 0,01	0,19 ± 0,08	0,28 ± 0,50	5,51 ± 1,86
A25	6,2 ± 0,7	3,83 ± 3,00	0,84 ± 0,94	0,10 ± 0,05	0,22 ± 0,05	0,13 ± 0,30	5,26 ± 3,82
PF	6,9 ± 0,6	2,33 ± 0,37	0,44 ± 0,05	0,08 ± 0,02	0,10 ± 0,03	0,02 ± 0,01	2,99 ± 0,34
PTA	6,3 ± 0,1	1,70 ± 0,34	0,31 ± 0,06	0,05 ± 0,02	0,20 ± 0,03	0,06 ± 0,03	2,44 ± 0,37
SN	4,4 ± 0,0	1,06 ± 0,35	0,22 ± 0,64	0,12 ± 0,01	0,12 ± 0,02	5,44 ± 0,81	7,92 ± 1,38

Como control se tomaron muestras del horizonte A de suelos no afectados por las

actividades mineras en el entorno de la escombrera (suelos SN).

Todas las muestras se secaron a temperatura ambiente y se tamizaron por 2 mm. En la fracción < 2 mm se determinó el contenido de C orgánico y N total por combustión, usando un analizador elemental LECO Model CHN-1000 (Leco corp., St. Joseph, MI). La relación C/N referida en el texto se calculó directamente a partir de estos datos. Además, *in situ*, se determinó la densidad del suelo (ρ) por el método de la camisa (Grossman et al., 2001). Las cantidades de carbono orgánico del suelo y de nitrógeno se expresaron Mg ha^{-1} utilizando la expresión (1), en la que ρ_f es la densidad de la tierra fina, calculada después de la corrección para el contenido en fragmentos gruesos y asumiendo una densidad de partícula (ρ_s) de $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$, y p es la profundidad del suelo considerada (Lal y Kimble, 2001).

$$\text{Mg C ha}^{-1} = [\% \text{ C} \times \rho_f (\text{Mg m}^{-3}) \times p (\text{m}) \times 10^4 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}] / 100 \quad (1)$$

Adicionalmente, en 4 muestras por parcela se realizó un fraccionamiento por tamaño de partícula en arena (2 mm-50 μm), limo (50-2 μm) y arcilla (<2 μm), siguiendo el método de dispersión en agua, tamizado en húmedo y sedimentación por gravedad (Christensen, 1992). En cada una de las fracciones separadas se determinó el contenido en C y N como se indicó más arriba. En todas las muestras de noviembre de 2001 (fracciones granulométricas y suelo completo) se realizó una extracción con pirofosfato sódico 0,1 M (Bascomb, 1968) y se volvió a analizar C y N después de la extracción. El C y N extraídos con pirofosfato (C_p y N_p) se calcularon por diferencia entre el C o N de la muestra antes y después de la extracción con pirofosfato. Por último, para algunas muestras seleccionadas, se obtuvieron los espectros infrarrojos utilizando un espectrofotómetro BRUKER,

modelo IFS-66V. Se realizaron los espectros entre 400 y 4000 cm^{-1} empleando pastillas de KBr con una concentración de muestra del 1%.

Ensayos de revegetación con cultivos energéticos

En los suelos restaurados con tierra vegetal se desarrolló un ensayo con cultivos para la producción de biomasa. Los cultivos energéticos incluidos en este experimento son especies arbóreas de corta rotación (*Acacia dealbata*, *Acacia melanoxylon*, *Alnus glutinosa* y *Eucalipto globulus*) y arbustivas (*Ulex europaeus*, *Cytisus scoparius*) que fueron plantadas con distintas densidades (0.66, 1 y 2 plantas por m^2). Como control, el ensayo fue repetido en una zona forestal cercana a la escombrera con suelos naturales pero bajo las mismas condiciones climáticas. Las plantaciones fueron realizadas en junio de 1996 y en noviembre de 1998 se determinó, por corte, la producción de biomasa, tomándose muestras vegetales de los distintos órganos y muestras de suelo. La tasa de fijación de carbono fue calculada después del análisis del contenido en carbono en suelos y biomasa con un autoanalizador LECO Mod. CHN 1000.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Acumulación y evolución de la materia orgánica en los suelos restaurados

Contenido actual de materia orgánica en los suelos restaurados

En noviembre de 2001, la concentración de C y N en los suelos restaurados oscilaba entre 0,50-9,83 %C y 0,03-0,57 %N, existiendo diferencias significativas ($p < 0.001$) entre las distintas parcelas. El tipo de restauración y la antigüedad de las parcelas son los dos factores que explican estas diferencias. Las parcelas restauradas con tierra vegetal (tratamiento TV) presentaban mayores concentraciones medias de C (2,7-4,4 %) y N

(0,23-0,31 %) que las restauradas sin tierra vegetal (tratamiento STV) (0,8-2,5 % C; 0,07-0,16 %N) (Tabla 3). Para un mismo tratamiento, las parcelas más antiguas presentaban mayores concentraciones de C.

Es el caso de las parcelas CSA, CSC y CSP, entre las restauradas con tierra vegetal, y P104 y P205, entre las construidas con estériles y revegetadas directamente.

TABLA 3: Valores medios y desviación estándar del contenido de C y N en las parcelas de seguimiento en 1991, 1995 y 2001. Letras diferentes dentro de la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,01$).

Parcela	1991		1995		2001	
	%C	%N	%C	%N	%C	%N
CSA	3,4 ± 0,5 c	0,33 ± 0,06 c	3,2 ± 0,7 d	0,26 ± 0,08 bcd	3,9 ± 1,2 ef	0,31 ± 0,13 c
CSC	-	-	3,0 ± 1,0 d	0,16 ± 0,11 abc	4,4 ± 2,3 f	0,24 ± 0,14 c
CSP	2,9 ± 0,9 bc	0,22 ± 0,09 b	3,1 ± 0,5 d	0,22 ± 0,04 abcd	4,4 ± 0,9 f	0,28 ± 0,06 c
P206	2,8 ± 0,5 b	0,33 ± 0,05 c	2,9 ± 0,5 d	0,29 ± 0,03 d	3,1 ± 0,5 ed	0,28 ± 0,05 c
TH03	3,1 ± 0,2 bc	0,33 ± 0,05 c	3,2 ± 0,4 d	0,28 ± 0,04 cd	2,6 ± 0,6 cd	0,24 ± 0,02 c
P104	1,1 ± 0,2 a	0,09 ± 0,04 a	2,2 ± 0,4 cd	0,08 ± 0,04 a	2,5 ± 0,9 bcd	0,07 ± 0,02 a
P205	0,9 ± 0,1 a	0,13 ± 0,03 a	1,8 ± 0,4 c	0,16 ± 0,04 abc	1,8 ± 0,5 abc	0,16 ± 0,04 b
TH04	1,0 ± 0,2 a	0,13 ± 0,03 a	1,3 ± 0,2 bc	0,16 ± 0,03 abc	1,4 ± 0,5 ab	0,12 ± 0,03 ab
A25	0,9 ± 0,3 a	0,10 ± 0,03 a	1,4 ± 0,5 ab	0,09 ± 0,05 a	1,5 ± 0,8 ab	0,09 ± 0,06 ab
PTA	-	-	0,7 ± 0,2 ab	0,16 ± 0,12 ab	1,4 ± 0,2 ab	0,12 ± 0,03 ab
PF	-	-	0,2 ± 0,1 a	0,12 ± 0,10 a	0,7 ± 0,2 a	0,10 ± 0,02 ab

Igualmente, se ha obtenido un amplio intervalo para la relación C/N, con valores extremos de 5,4 y 65,4. Las relaciones C/N más altas se encontraron en las parcelas P104 y A25, cuyo rasgo común es que en ambas se utilizó ceniza derivada de la combustión del lignito como material encalante (Tabla 1). Rumpel et al. (1998) mostraron que los productos de combustión de carbón contienen cantidades sustanciales de carbono orgánico (hasta 20 %) en forma de partículas carbonosas, lo que justifica la elevada relación C/N de estas parcelas.

Si comparamos estos resultados con los obtenidos en los suelos control (SN), vemos que las concentraciones de C y N en los

suelos restaurados, especialmente en los restaurados sin tierra vegetal, son sensiblemente menores que en los suelos naturales del entorno para un mismo uso. Ya que la capacidad de fijación de SOC en un suelo dado es proporcional a las reservas originales en condiciones naturales, estos datos sugieren que con un manejo adecuado los suelos restaurados tendrían capacidad de seguir almacenando materia orgánica hasta alcanzar las condiciones de equilibrio con las condiciones climáticas.

Los espectros de IR nos dan alguna información sobre la naturaleza de la MOS. En la Figura 1 se presentan los espectros de IR de tres muestras seleccionadas, uno de una

parcela restaurada con tierra vegetal (1a) y las otras dos sin tierra vegetal con distintas antigüedades (1b y 1c). Los rasgos más sobresalientes del primer espectro indican la presencia de ácidos húmicos, con bandas principales a 3430 cm^{-1} (H ligado a OH), entre $2850\text{-}2950\text{ cm}^{-1}$ (C-H alifático), 1630 cm^{-1} (C=C conjugado, H-enlazado a grupos carbonilo COO^-) (Schnitzer y Schuppli, 1989). Sin embargo estos rasgos, aunque perceptibles, son menos manifiestos en las muestras de las parcelas sin tierra vegetal, reflejando el menor contenido de materia orgánica de estas parcelas y/o un menor grado de humificación de la materia orgánica.

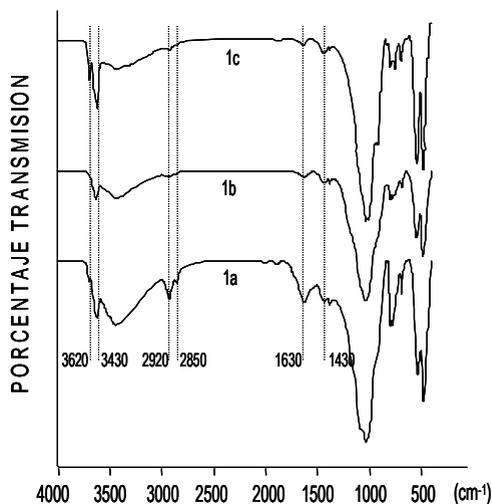


FIGURA 1: Espectros de Infrarrojo para muestras de suelo de las parcelas restauradas de la mina de lignito de As Pontes: 1a) parcela CSP, restaurada con tierra vegetal; 1b) y 1c) parcelas P.104 y PF, respectivamente, restauradas sin tierra vegetal.

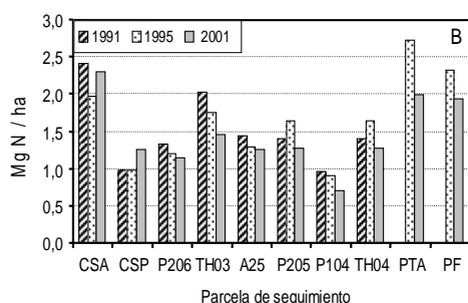
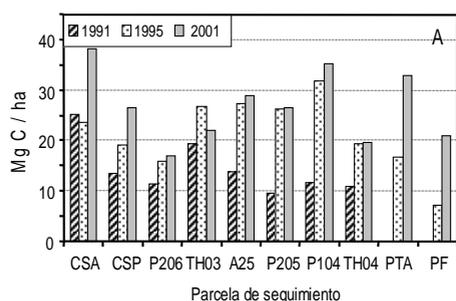


FIGURA 2: Cambios temporales en el carbono (a) y nitrógeno (b) en los suelos restaurados de la mina de lignito de As Pontes (0-15 cm). Valores medios (n=6-8).

Fijación de carbono en los suelos restaurados

La comparación de los resultados obtenidos entre enero de 1991 y noviembre de 2001 nos permite evaluar el potencial de fijación de C en los suelos restaurados a través del tiempo (Fig. 2a). Durante este período se han registrado incrementos significativos de carbono orgánico en todas las parcelas (entre 3 y 25 Mg C ha^{-1}), aunque este incremento no fue lineal a lo largo del tiempo. En los primeros años (1991-1995), los suelos con tratamiento STV presentaron mayor tasa media de fijación de C ($3.5\text{ Mg ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$) que los suelos con tratamiento TV ($1.4\text{ Mg ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$). En la parcela CSA no se ha registrado acumulación orgánica en este período, hecho que coincide con el declive de la vegetación observado entre 1991 y 1995 como resultado de la acidez extrema que presentaba esta parcela (Tabla 2). Con el envejecimiento de las parcelas (periodo

1995-2001), se produjo una ralentización general en los flujos de fijación de C. En los suelos STV la fijación media en esta etapa fue de $0.22 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, con una tendencia clara a estabilizarse. Por el contrario, alguna de las parcelas construidas con tierra vegetal (CSA y CSP) experimentaron en esta etapa una mayor tasa de fijación ($9.5 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), lo que coincide con una clara mejoría en la vegetación de estas parcelas durante este periodo. Las parcelas más recientes (PTA y PF) experimentaron en el periodo 1995-2001 una incorporación efectiva de $2,5 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, similar a la experimentada en el primer período en las parcelas con tratamiento STV más antiguas. Estos resultados son concordantes, en líneas generales, con los obtenidos por Akala y Lal (2001) a pesar de que su estudio fue realizado bajo condiciones climáticas diferentes.

Por el contrario no se presentan evidencias claras de incorporación de nitrógeno al suelo, llegando a producirse, en la mayoría de las parcelas, una pérdida neta de este elemento a lo largo del periodo de estudio (Fig. 2b). Los suelos de mina tienen, normalmente, una menor capacidad de amortiguación térmica que los suelos naturales, debido a su menor contenido de materia orgánica y menor cobertura vegetal. Esto origina que, en los periodos térmicos más cálidos, exista una menor pérdida de calor por convección con la consecuente evaporación del agua del suelo (Grunwald et al. 1988), lo que favorece los procesos de mineralización y/o volatilización de N.

La diferente evolución del C y N tuvo como consecuencia un aumento de la relación C/N en todas las parcelas, indicando que la incorporación de materia orgánica fresca se produce a mayor velocidad que su descomposición. Incrementos de la relación C/N con la antigüedad de la restauración también fueron encontrados por Akala y Lal (2001), sugiriendo que el déficit de N es uno

de los limitantes de estos sistemas en vías de restauración (Barnishel, 1988).

Fraccionamiento físico de la materia orgánica en los suelos restaurados

La distribución del C y N del suelo entre las distintas fracciones granulométricas en las muestras control (SN) es similar a la descrita en suelos de zonas templadas, en los que se ha visto que la mayoría de la materia orgánica se encuentra asociada a las fracciones más finas del suelo (Feller y Beare, 1997). En las muestras control (SN) un 19 % del C total del suelo estaba asociado a la fracción arena, un 45% a la fracción limo y un 36% a la fracción arcilla, como media, distribuyéndose el N de forma similar (Fig. 3).

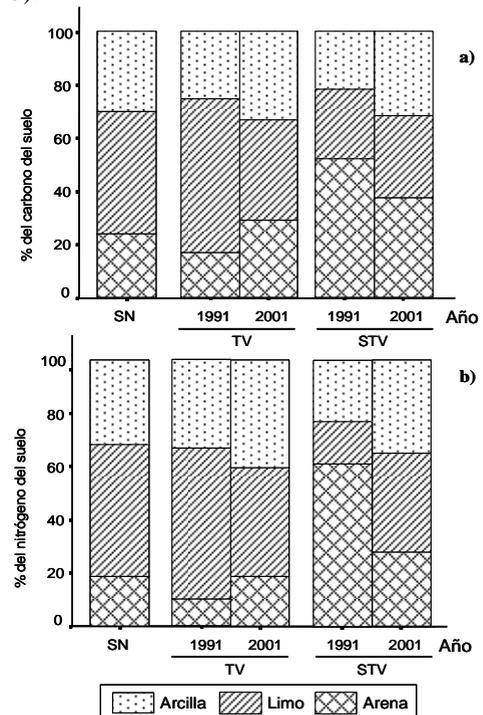


FIGURA 3. Distribución del carbono del suelo (a) y nitrógeno (b) entre las fracciones arena, limo y arcilla de los suelos de mina en enero de 1991 y noviembre de 2001 (SN = suelo natural, TV = restauración con tierra vegetal; STV = restauración sin tierra vegetal).

Al igual que en suelos de áreas templadas, la relación C/N (Fig. 4) desciende con el descenso del tamaño de partícula (14 en arena y 9 en limo y arcilla), lo que sugiere que la materia orgánica presente en las fracciones más finas tiene un mayor grado de evolución (Feller y Beare, 1997). Distintos estudios mostraron que las fracciones gruesas estaban dominadas por materia orgánica particulada, también llamada materia orgánica macroorgánica, constituida principalmente por restos vegetales en distintos grados de descomposición, con elevadas relaciones C/N. En la fracción limo se encontró materia orgánica muy humificada y restos fúngicos asociados a microagregados órgano-minerales estables que no se rompen fácilmente con el fraccionamiento. En la fracción $< 2 \mu\text{m}$, también llamada complejos órgano-arcillosos, domina la materia orgánica amorfa que actúa como cementante de la arcilla y con relaciones C/N entre 7 y 12.

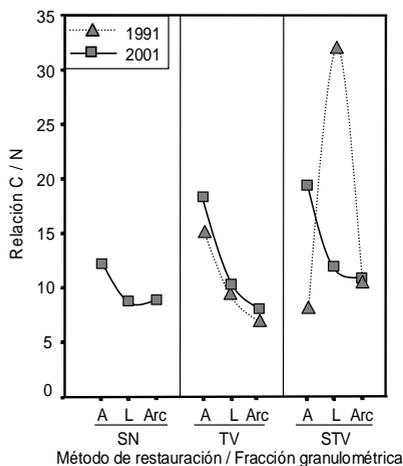


FIGURA 4. Variación temporal de la relación C/N en distintas fracciones granulométricas en función del tratamiento del suelo. SN(Suelo natural), TV(restaurado con tierra vegetal), STV(restaurado sin tierra vegetal), A(Arena), L(Limo), Arc(Arcilla).

Tomando como referencia estos resultados podemos evaluar la distribución de la materia orgánica en los suelos de mina y su evolución en el tiempo (Fig. 3 y Fig. 4). En 1991 existía una clara diferencia de distribución entre los distintos tratamientos. En los suelos con el tratamiento TV se encontró una distribución de C y N y relaciones C/N similares a los suelos SN, si bien el % de C asociado a la fracción arena era significativamente más bajo que el de SN. Esto sugiere que las operaciones de recuperación de la tierra vegetal, almacenamiento y extendido en la superficie de la escombrera aceleran el proceso de mineralización, que afecta principalmente a la fracción gruesa. Esta fracción es frecuentemente descrita como una fracción lábil (Chan, 2001). Por el contrario, en los suelos con tratamiento STV la mayor parte de la materia orgánica se encontraba en las fracciones más gruesas, el 60% del C y el 50% del N total del suelo estaban asociados a la fracción arena en 1991. Igualmente, en este año la variación de la relación C/N a través de las distintas fracciones granulométricas sigue un patrón diferente al encontrado en SN y TV, con valores anormalmente elevados en la fracción limo lo que se puede relacionar con la presencia de partículas carbonáceas de lignito y restos de combustión. Rumpel et al. (2000) mostraron que las partículas carbonáceas aparecían, en suelos de mina ricos en carbón derivado del lignito, preferentemente en las fracciones $630-6.3 \mu\text{m}$.

La evolución del fraccionamiento de C y N tras 10 años de restauración refleja un proceso de maduración y estabilización de la materia orgánica (Fig. 3 y Fig. 4). Los suelos TV recuperaron en este período la proporción original de C en la fracción arena hasta niveles similares a los de SN, mientras que en los suelos STV esta fracción perdió importancia. En ambos casos se produjo un enriquecimiento relativo del C asociado a la fracción $< 2 \mu\text{m}$. Actualmente, la relación

C/N en las parcelas STV desciende con el tamaño de partícula (9,7-27,6 en arena; 6,6-19,8 en limo; 4,8-14,9 en arcilla) y se acerca a los valores de las parcelas TV (12,3-26,2 en arena; 9,5-10,8 en limo; 7,9-9,4 en arcilla).

Para comparar la distribución de C en las fracciones granulométricas obtenidas en distintos tipos de suelo, Christensen (1996) calculó un factor de enriquecimiento para cada fracción ($E_C = \text{mg C g}^{-1} \text{ partícula} / \text{mg C g}^{-1} \text{ suelo}$). El uso de factores de enriquecimiento excluye el efecto de diferentes niveles de C en el suelo. En el conjunto de los suelos del presente estudio, los valores de E_C y E_N más elevados se asocian con la fracción arcilla (Tabla 4). Esta fracción presenta concentraciones de C y N entre 1,3 y 4 veces mayores que el suelo entero, mientras que las fracciones limo y arena presentan valores de E_C y E_N normalmente inferiores a 1. Además, se encontró que el enriquecimiento en C y N de la fracción arcilla de las muestras de 2001 presentaban una relación inversa con el contenido total de esta fracción en el suelo (Fig. 5), muy similar a la descrita en estudios de suelos naturales de áreas templadas (Christensen, 1996). Por el contrario, no se

encontró esta relación en las muestras de 1991, lo que de nuevo es indicativo de una evolución positiva del sistema.

TABLA 4. Valores medios y desviación estándar del factor de enriquecimiento de carbono (E_C) y nitrógeno (E_N) (% de C ó N en fracción / % de C ó N en el suelo entero) para las distintas fracciones granulométricas.

Factores de enriquecimiento (E)	1991	2001
E_C arena	$0,88 \pm 0,18$	$0,76 \pm 0,24$
E_C limo	$0,81 \pm 0,16$	$0,88 \pm 0,17$
E_C arcilla	$2,16 \pm 1,06$	$2,28 \pm 0,96$
E_N arena	$0,86 \pm 0,39$	$0,52 \pm 0,19$
E_N limo	$0,64 \pm 0,38$	$0,99 \pm 0,23$
E_N arcilla	$3,32 \pm 2,21$	$2,84 \pm 1,17$

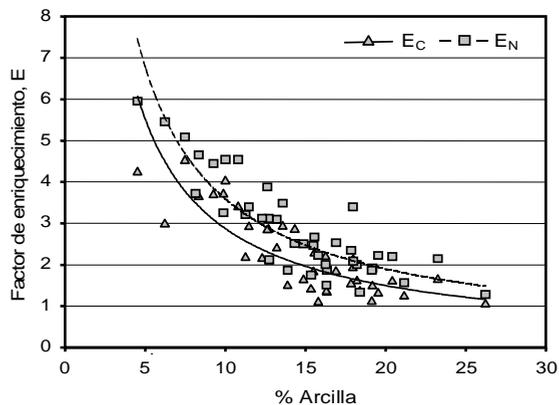


FIGURA 5. Relación entre los factores de enriquecimiento de carbono (E_C) y nitrógeno (E_N) en la fracción arcilla (%C ó N en arcilla / %C ó N en suelo entero) y el contenido de arcilla del suelo. Ajuste potencial de los puntos: $E_C = 29,69 x^{-0,22}$, $r^2 = 0,73$; $E_N = 25,11 x^{-0,24}$, $r^2 = 0,69$.

Extracción química de la materia orgánica con pirofosfato sódico

En las muestras de suelo completo, encontramos una elevada correlación entre el carbono total y el carbono extraído con pirofosfato (Cp), y entre el nitrógeno total y el extraído en pirofosfato (Np) (Tabla 5). Los

valores de Cp oscilaban entre 0,03 y 1,8 % y los de Np entre <0,01 y 0,09 %. Al igual que para el carbono total, los valores más elevados se encontraron asociados al tratamiento TV y los más bajos al tratamiento STV. Dentro de cada grupo los más altos se encontraron en las parcelas más antiguas

TABLA 5. Valores medios de carbono y nitrógeno extraídos con pirofosfato (Cp y Np) en el suelo y en las tres fracciones granulométricas. Muestreo de noviembre 2001. Valores dados en g C/100g muestra.

	Suelo (<2 mm)		Arena		Limo		Arcilla	
	Cp	Np	Cp	Np	Cp	Np	Cp	Np
CSA	1,03	0,29	0,75	0,04	0,94	0,10	1,28	0,12
CSP	1,86	0,28	0,80	0,04	0,95	0,11	1,45	0,18
P206	1,13	0,28	0,12	0,01	0,59	0,09	2,94	0,35
TH03	1,06	0,23	0,32	0,01	0,90	0,08	2,15	0,21
P104	1,01	0,07	0,60	0,01	0,70	0,03	3,80	0,24
P205	0,26	0,11	0,07	0,00	0,49	0,04	0,21	0,00
TH04	0,33	0,12	0,02	0,00	0,11	0,04	1,76	0,12
A25	0,13	0,06	0,11	0,00	0,14	0,04	0,13	0,03
PTA	0,03	0,11	0,22	0,00	0,25	0,01	0,29	0,05
PF	0,57	0,12	0,10	0,00	0,34	0,05	0,85	0,15

De forma paralela, las correlaciones son significativas para el contenido total de C y N en las distintas fracciones granulométricas y el correspondiente Cp y Np, obteniéndose mayores valores de Cp y Np para la fracción arcilla, seguida de limo y arena. En valores relativos (Cp/C y Np/N) se observaron diferencias significativas por tamaño de partícula, el pirofosfato es relativamente más eficiente en las fracciones finas (limo y arcilla) que en la fracción arena, lo que concuerda con los resultados obtenidos por otros autores (Schnitzer y Schuppli, 1989) y confirma que la materia

orgánica humificada se acumula preferentemente en estas fracciones.

A pesar de que la cantidad de Cp y Np se mostró diferente para los distintos tipos de muestras, existe una elevada correlación entre ambos parámetros (Fig. 6), dando una relación Cp/Np en torno a 8, típica de los compuestos humificados. Esto muestra que la materia orgánica extraída con pirofosfato es de la misma naturaleza independientemente del origen de las muestras.

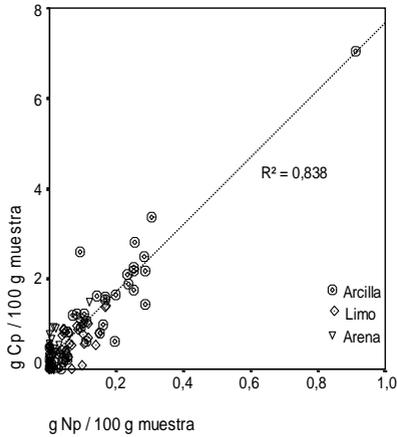


FIGURA 6. Relación entre carbono y nitrógeno extraído con pirofosfato sódico (Cp y Np) de las diferentes fracciones granulométricas.

Ensayos de revegetación con cultivos energéticos

La plantación de especies energéticas en suelos minerales puede contribuir a la reducción de la emisión de gases con efecto invernadero, principalmente CO_2 , a través de: a) la fijación de CO_2 en la biomasa como resultado de la fotosíntesis, y b) la acumulación de carbono en el suelo. La tasa de reducción es dependiente de las especies vegetales y de la productividad de biomasa.

Productividad del cultivo y fijación de C en biomasa

En la figura 7 se presenta la cantidad de materia seca producida en cada uno de los cultivos ensayados y su transformación a cantidad de carbono fijado en planta. De las especies utilizadas en este ensayo las más productivas han sido *Acacia dealbata*, *Acacia melanoxylon*, *Eucalyptus globulus*, *Ulex europaeus* and *Cystisus*. Después de 30 meses se han obtenido entre 12,6 y 47,9 toneladas de materia seca por hectárea. Los resultados muestran que las plantaciones de eucalipto en alta densidad (2 plantas por m^2)

producen más biomasa que las mismas especies plantadas en baja densidad y que las otras especies. Si los marcos de plantación son menos densos, los rendimientos de las acacias (*A. melanoxylon* y *A. dealbata*) son similares a los del eucalipto. El arbusto más productivo ha sido el *Ulex europaeus*, llegando a ser más productivo incluso que algunos árboles plantados en bajas densidades. Los resultados de productividad fueron similares a los obtenidos en el área natural circundante (datos no mostrados).

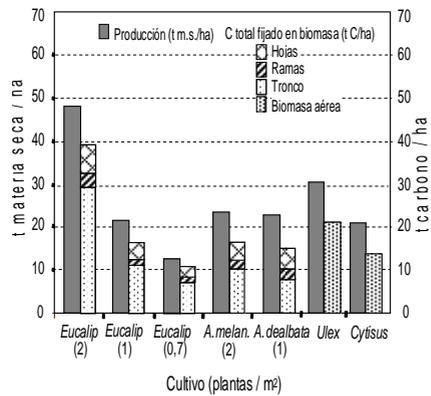


FIGURA 7: Producción de materia seca por hectárea y cantidad de carbono fijado en la biomasa en los ensayos de especies de crecimiento rápido en los suelos restaurados de la mina de As Pontes. Valores medios acumulados de 30 meses.

Acumulación de carbono en el suelo

Se ha comprobado que las labores de preparación del terreno (que incluyeron un subsolado) inducen una importante pérdida de C por incremento de la mineralización, que no suele recuperarse en los tres años siguientes del ensayo cuando se realizan marcos de plantación de 1x1 o superiores. Sin embargo, en densidades mayores se produce un incremento del contenido de carbono variable según las especies (Fig. 8).

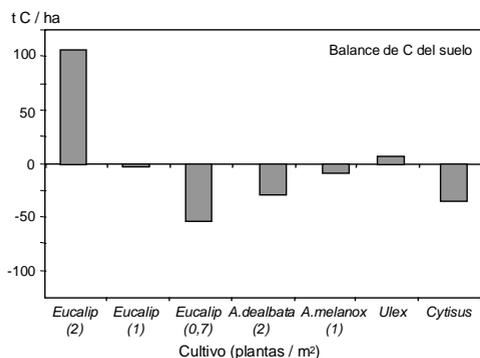


FIGURA 8: Balance de carbono del suelo después de 30 meses de ensayos de productividad

A pesar de que estos resultados tienen un margen de error importante debido al corto período de tiempo de seguimiento, se observan ciertas tendencias significativas. Así, puede afirmarse que el eucalipto es la planta que más C incorpora al suelo cuando el marco de plantación es de elevada densidad. Estos resultados tienen que ser seguidos a más largo plazo para poder dar cifras de la capacidad de fijación en períodos de tiempos.

CONCLUSIONES

Los suelos de mina restaurados hasta la actualidad en el área minera de As Pontes tienen un potencial elevado de fijación de C, registrándose en el periodo de estudio (1991-2001) incrementos de entre 3 y 25 Mg C ha⁻¹. A pesar de ello, la concentración actual de carbono en los suelos restaurados es menor que en los suelos naturales del entorno, lo que sugiere que con un manejo adecuado estos suelos tendrían capacidad de seguir almacenando materia orgánica hasta alcanzar las condiciones de equilibrio con las condiciones climáticas de la zona. La incorporación de carbono siguió un patrón comparable en todos los suelos tratados sin tierra vegetal (STV), con una ganancia rápida en el período inicial de estudio seguida de una ganancia lenta en el siguiente

período (3,5 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ entre 1991 y 1995 y 0,22 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ entre 1995 y 2001, en valores medios). El comportamiento fue más arbitrario en los suelos tratados con tierra vegetal (TV), pero generalmente la incorporación efectiva de carbono ha sido menor. No se ha registrado incorporación neta de N en ninguno de los períodos.

El fraccionamiento físico del carbono por tamaño de partícula aporta evidencias de una evolución y estabilización de la materia orgánica convergente con la de los suelos naturales de la zona y, en general, con la de los suelos de áreas templadas. Sin embargo, ya que la tasa de incorporación de carbono no se ha llegado a estabilizar, serán necesarios estudios a más largo plazo para confirmar esta evolución.

La productividad, y por tanto la fijación, de C, con especies pioneras y frugales, como las ensayadas en este trabajo, es prácticamente del mismo orden en los suelos en vías de recuperación de las escombreras que en los suelos ácidos de los sistemas forestales naturales. Luego, es posible utilizar terrenos degradados o en vías de recuperación para estos fines de producción de biomasa y fijación de carbono.

La información derivada de este trabajo contribuye al desarrollo de estrategias globales de restauración con el objetivo de minimizar el efecto invernadero por fijación de carbono. Específicamente ayuda a la gestión de especies de elevada productividad en los planes de restauración de suelos degradados.

REFERENCIAS

- Akala, V. A., Lal, R. (2001). Soil Organic Carbon Pools and Sequestration Rates in Reclaimed Minesoils in Ohio. *J. Environ. Qual.* 30:2098-2104.
- Barnishel, R.I. (1988). Fertilization and management of reclaimed lands. En:

- L.R. Hossner (Ed). *Reclamation of Surface-Mined Lands*, Vol. II. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida, pp 1-15
- Bascomb, C.L. (1968). Distribution of pyrophosphate extractable iron and organic carbon in soils of various groups. *J. Soil Sci.*, 251-268.
- Chan, K.Y. 2001. Soil particulate organic carbon under different land use and management. *Soil Use Manag.* 17:217-221.
- Christensen, B.T. (1992). Size-fractions in Soil and Organic Matter in Primary Particulate. *Advances in Soil Science*, 20: 2-90.
- Christensen, B.T. (1996). Carbon in Primary and Secondary Organomineral Complex. En: In Martin R. Carter, B. A. Stewart, *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. Advances in Soil Science, pp. 97-165.
- Daniels, W.L., Zipper, C.E. (1988). Improving coal surface reclamation in the Central Appalachian Region. En: I. Cairns (Ed). *Rehabilitating damaged ecosystems*, Vol. I. CRC Publications, Boca Raton, Florida, pp 139-162
- Feller, C., Beare, M.H. (1997). Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79, 69-116.
- Gil-Bueno, A., Val Caballero, C., Macías, F., Monterroso, C. (1990), Influence of waste selection in the dump reclamation at Puentes Mine. En: *Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Mining wastes*. Rainbow (ed.). pp 203-208. Bolkema. Rotterdam.
- Grossman, R. B., D. S. Harms, D. F. Kingsbury, R. K. Shaw, A. B. Jenkins, (2001). Assessment of Soil Organic Carbon Using the U.S. Soil Survey. En: R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett y B.A. Stewart (eds.), *Assessment Methods for Soil Carbon*. Adv. Soil Sci. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp. 87-104
- Grunwald, C., Iverson, L.R., Szafoni, D.B. (1988). Abandoned mines in Illinois and North Dakota: toward an understanding of revegetation problems. En Jr. John Cairns, *Rehabilitating damaged ecosystems*. Vol. 1 CRC Press, pp. 39-59.
- Lal, R., Kimble, J. (2001). Importance of Soil Bulk Density and Methods of Its Importance. En: R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett y B.A. Stewart (eds.), *Assessment Methods for Soil Carbon*. Adv. Soil Sci. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp. 31-44.
- Malik, A., Scullion, J. (1998). Soil development on restored opencast coal sites with particular reference to organic matter and aggregate stability. *Soil Use Manag.* 14:234-239.
- Monterroso, C., Macías, A., Gil Bueno, A., Val Caballero, C. (1998). Evaluation of the land reclamation project at the As Pontes Mine (NW Spain) in relation to the suitability of the soil for plant growth. *Land Degradation & Development*, 9:441-451.
- Rumpel, C., Knicker, H., Kögel-Knabner, I., Skjemstad, J.O., Hüttl, R.F. (1998). Types and chemical composition of organic matter in reforested lignite-rich mine soils. *Geoderma* 86, 123-142.
- Rumpel, C., Kögel-Knabner, I., Knicker, H., Hüttl, R.F. (2000). Composition and distribution of organic matter in physical fractions of a rehabilitated mine soil rich in lignite-derived carbon. *Geoderma* 98, 177-192.
- Schnitzer, M., Schuppli, P. (1989). The Extraction of Organic Matter from Selected Soils and Particle Size Fractions with 0.5 M NaOH and 0.1 M Na₄P₂O₇ Solutions. *Can. J. Soil Sci.* 69: 253-262.