

APLICACIÓN DEL FLUJO DE CO₂ COMO INDICADOR DE LA CALIDAD DE LA RESTAURACIÓN EN ACTIVIDADES EXTRACTIVAS A CIELO ABIERTO

O. ORTIZ PERPIÑÁ y J. M. ALCANIZ BALDELLOU

CREAF (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals)–Unitat d'Ecologia. Universitat Autònoma de Barcelona. 08193 Bellaterra (Barcelona). JosepOriol.Ortiz@uab.es

Abstract. CO₂ efflux has been measured in the development of a retrospective analysis of limestone quarries rehabilitation in Catalonia. Rehabilitation treatments have been grouped into different categories according to soil application, soil amendment, sowing and plantation. CO₂ fluxes were usually below 1 g CO₂ m⁻² h⁻¹. Our analysis shows that the type of rehabilitation treatment has a major importance in the recuperation of the soil biological activity. This was especially true when rainfall was low (below 525 mm y⁻¹) and in soils with unbalanced textures. In these cases, there were not significant differences between soils where biosolids have been applied as organic amendment (1,127±0,227 g CO₂ m⁻² h⁻¹) and reference undisturbed soils (1,071±0,130 g CO₂ m⁻² h⁻¹). For organic amendment treatments, comparison between plots of different age suggests that the effect of the fresh organic matter addition on CO₂ flux is not transient.

Key words: Biological activity, CO₂ efflux, limestone quarries, soil restoration

Resumen. Se ha medido el flujo de CO₂ para una evaluación retrospectiva de los trabajos de restauración de áreas afectadas por minería de calizas a cielo abierto. Los trabajos de rehabilitación se han tipificado en distintas categorías atendiendo a las opciones más frecuentes (aporte de suelos, enmiendas orgánicas, siembra y plantación). Los flujos de CO₂ suelen ser inferiores a 1 g CO₂ m⁻² h⁻¹. Su evaluación demuestra que el tipo de tratamiento tiene gran importancia en la recuperación biológica del suelo, especialmente en áreas de escasas precipitaciones (menos de 525 mm anuales) y para granulometrías extremas. En estos casos, no aparecen diferencias significativas entre suelos enmendados con lodos de depuradora (1,127±0,227 g CO₂ m⁻² h⁻¹) y suelos de referencia no perturbados (1,071±0,130 g CO₂ m⁻² h⁻¹). En estos suelos, la comparación de parcelas de distintas edades sugiere que el efecto de la adición de materia orgánica fresca no es efímero.

Palabras clave: Actividad biológica, canteras, flujo de CO₂, restauración de suelos

INTRODUCCIÓN

Las actividades extractivas, aunque necesarias, generan un impacto ambiental notable, que conlleva una importante degradación del medio natural. Con el objetivo de paliar estos efectos, hace ya más de veinte años que se dictaron normas (Real Decreto 2994/1982

para el conjunto del Estado español y Ley 12/1981 para Catalunya) que obligan a la restauración de los espacios afectados por dichas actividades. En el transcurso de estos años se han ensayado distintas técnicas de restauración, centradas esencialmente en la restitución del suelo con materiales de calidades diversas, la enmienda de estos suelos

mediante residuos orgánicos, y la revegetación mediante siembras y/o plantaciones. Sin embargo, la diversidad de opciones que se presentan para el desarrollo de las labores de restauración, unida a la heterogeneidad entre explotaciones dificulta el establecimiento de unos procedimientos generales de restauración y la posterior evaluación del grado de éxito conseguido.

La utilización del flujo de CO_2 se presenta, en este contexto, como una alternativa rápida y económicamente viable a la realización de costosos análisis de caracterización de los suelos y de su cubierta vegetal. Cabe destacar, sin embargo, que este flujo no es regular en el tiempo, ya que puede verse alterado por numerosos factores que modifican el gradiente de concentraciones de CO_2 y generan una variabilidad espacial y temporal importante. Estos factores han sido revisados exhaustivamente por muchos autores (Witkamp, 1969; Atkinson, 1977; Neilson y Pepper, 1990; McCarthy y Brown, 1992).

Aunque el CO_2 producido en el interior del suelo puede tener también un origen abiótico (Miglietta *et al.*, 1993), fundamentalmente proviene de su actividad biológica, por lo que en muchas ocasiones se ha propuesto su utilización como indicador de la calidad, función y estado de conservación del suelo (Wolters, 1991; Insam, 2001). Valores elevados en el flujo de CO_2 indican elevados contenidos de materia orgánica, además de una biomasa microbiana metabólicamente activa y no afectada por factores que puedan inhibir su desarrollo (Jandl y Sollins, 1997; Fu *et al.*, 2000). Por el contrario, valores menores indican bajos contenidos de materia orgánica o una actividad metabólica reducida (Anderson y Domsch, 1993; Rouard *et al.*, 1996; García y Hernández, 1997; Speir *et al.*, 1999).

El objetivo de este trabajo consiste en la utilización del flujo de CO_2 como indicador para la evaluación retrospectiva de distintos tipos de labores desarrolladas en la rehabilitación de áreas afectadas por actividades mine-

ras a cielo abierto. Se pretende utilizar este parámetro para aportar información sobre qué tipo de labores de restauración son las que ofrecen los mejores resultados, en relación con los suelos de áreas vecinas no perturbadas. Estos suelos son indicadores de las características previas de las áreas afectadas y con frecuencia constituyen el objetivo a conseguir en la rehabilitación.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se seleccionaron 57 parcelas experimentales en 18 actividades extractivas a cielo abierto en Catalunya, destinadas a la explotación de recursos calizos y gravas. Los trabajos de restauración que se habían aplicado en las distintas explotaciones se tipificaron en 7 grupos de tratamientos de rehabilitación (Tabla 1), en función de los tipos de labores desarrolladas (aporte de suelo, aporte de lodos de depuradoras como enmienda orgánica, siembra y plantación). Se establecieron, además, 9 parcelas en zonas forestales próximas a las áreas explotadas, como indicadores de referencia (REF) del estado del suelo en ausencia de perturbaciones aparentes. Las parcelas experimentales (Tabla 2) eran formadas por suelos con una apreciable densidad aparente, en su mayoría de texturas francas, fuertemente carbonatados y con valores de pH moderadamente básicos. Los niveles de materia orgánica, fósforo y capacidad de intercambio catiónico eran generalmente bajos, exceptuando las parcelas en las cuales se habían incorporado enmiendas orgánicas.

El flujo de CO_2 se midió en campo mediante un equipo PP Systems compuesto por un analizador de CO_2 por infrarrojo (EGM) acoplado a una cámara cerrada (SRC). Se tomaron un total de 10 medidas en cada parcela experimental, en puntos al azar, con una intensidad media de muestreo de 400 puntos ha^{-1} . Las medidas del flujo de CO_2 se tomaron entre los meses de mayo y junio de 2000.

TABLA 1. Tratamientos de rehabilitación considerados. SO: Aporte de suelo; FA: Enmienda con lodos de depuradora; SE: Siembra; PL: Plantación. Se indica para cada posibilidad de tratamiento de restauración ensayado el número de parcelas que se han estudiado.

Denominación del tratamiento	SO	FA	SE	PL	n
SO (Aporte de suelo)	+				14
PL (Plantación)				+	3
SOPL (Suelo + plantación)	+			+	3
SOSE (Suelo + siembra)	+		+		18
SOSEPL (Suelo + siembra + plantación)	+		+	+	4
SOFA (Suelo con lodos)	+	+			6
SOFASE (Suelo con lodos + siembra)	+	+	+		9
REF (Suelos de referencia)	—	—	—	—	9

TABLA 2. Valores promedio de las principales características analíticas de los suelos de las parcelas experimentales, medidas en los proyectos coordinados.

Parámetro	REF	PL	SO	SOFA	SOFASE	SOPL	SOSE	SOSEPL
Tierra fina (%)	60,02	65,72	55,47	51,87	41,99	66,75	57,25	71,85
Densidad ap. (Mg m ⁻³)	1,06	1,76	1,69	1,31	1,49	1,70	1,57	1,78
Arena gruesa (%)	9,40	7,40	14,05	14,74	25,96	7,14	11,16	7,11
Arena fina (%)	24,02	17,55	30,92	25,58	23,08	26,37	25,15	26,62
Limo grueso (%)	13,50	13,37	12,17	13,06	9,83	20,59	13,35	16,54
Limo fino (%)	28,70	38,32	21,15	24,02	20,38	24,82	24,71	27,42
Arcilla (%)	24,34	23,36	21,71	22,61	20,54	21,08	25,63	22,32
CaCO ₃ (%)	36,98	67,80	42,33	29,23	66,79	41,33	35,32	45,28
pH (H ₂ O)	8,28	8,24	8,36	7,85	8,05	8,11	8,30	8,44
Materia orgánica (%)	6,85	1,13	1,58	3,87	2,48	1,31	2,23	1,13
P Olsen (mg kg ⁻¹)	11,22	26,33	20,36	185,50	256,44	11,00	12,53	5,25
N (%)	0,265	0,082	0,183	0,414	0,171	0,079	0,092	0,076
C/N	15,23	8,20	10,13	17,15	9,31	9,67	8,40	8,53
CIC (cmol _c kg ⁻¹)	25,39	11,91	21,39	37,21	16,36	11,06	13,48	11,00

La singularidad del flujo de CO₂, o independencia con respecto a otros paquetes de datos obtenidos en los proyectos coordinados, se ha verificado mediante matrices de correlaciones entre el flujo de CO₂ y el resto de parámetros referentes a las características de los suelos y de la cubierta vegetal. Los efectos de los distintos tipos de tratamientos de rehabilitación sobre el flujo de CO₂ se han verificado mediante análisis de varianza, tomando el tipo de tratamiento como fuente de variación. Estos análisis se han aplicado en tres niveles de concreción progresivamente más detallados: (1) con la totalidad de los

datos, (2) con pares de tratamientos que difieren en una única opción de restauración, y (3) con parcelas seleccionadas a partir de criterios de homogeneidad, en el análisis de escenarios o situaciones de restauración frecuentes. El efecto de la edad o antigüedad de la restauración sobre el flujo de CO₂ se ha evaluado mediante análisis de regresión lineal. Cuando se han detectado diferencias significativas en función de la edad se ha comprobado mediante el análisis de varianza si éstas pueden ser explicadas por distintos contenidos de materia orgánica en el suelo.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran unos valores de flujo de CO_2 que por lo general no superan $1 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, llegando a $1,699 \pm$

$0,809 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para el tratamiento SOFA (Fig. 1). Hay que destacar que los valores extremos se han hallado siempre en parcelas correspondientes al tratamiento SO ($0,078$ a $4,418 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).

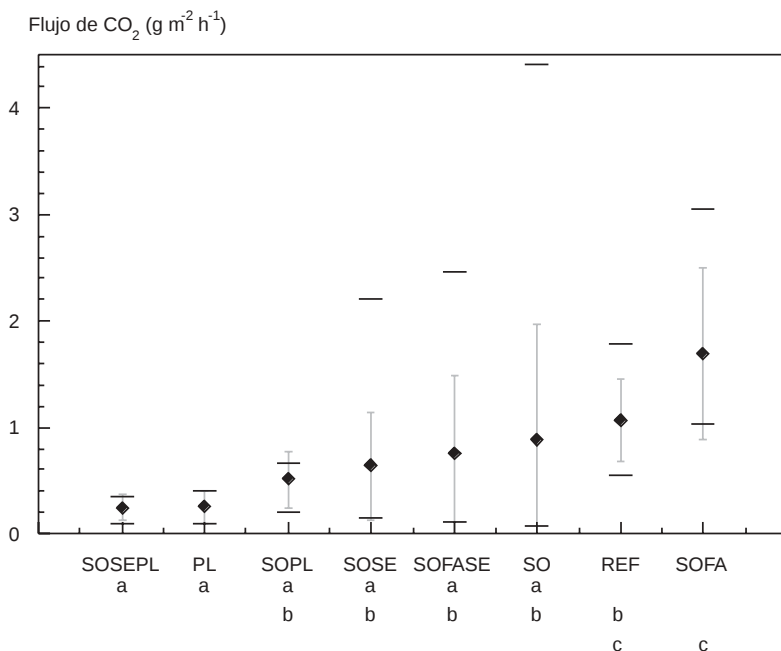


FIGURA 1. Flujos medios de CO_2 de las distintas parcelas experimentales agrupadas en función del tipo de tratamiento de restauración. Se incluyen los valores máximos y mínimos de cada grupo. Las barras de error corresponden a la desviación estándar. Las letras bajo el código del tratamiento indican la existencia de diferencias significativas para $\alpha = 0,05$.

Los análisis de correlación entre los datos de flujo de CO_2 y el resto de características analíticas medidas muestran (Tabla 3) que el flujo de CO_2 se relaciona con características del suelo, de su cubierta vegetal y del ambiente donde se halla, aunque éstas no resultan suficientes para explicar su variabilidad. Resulta interesante comprobar que una fracción importante de la variabilidad del flujo de CO_2 se explica por características relativas a la calidad o composición de la materia orgánica del suelo (54,7% nitrógeno total, 52,7% CIC, y 30,7% relación C/N), mientras que el contenido total de materia

orgánica del suelo se relaciona mucho menos con el flujo de CO_2 , explicando solamente un 17,4% de su variabilidad.

El análisis de varianza sobre el conjunto de los datos muestra un claro efecto del tratamiento sobre el flujo de CO_2 (Fig. 1). Sin embargo, existe un gran solapamiento entre los distintos tipos de tratamientos, pudiéndose afirmar tan sólo que las parcelas de referencia y las correspondientes al tratamiento SOFA son las únicas que muestran unos flujos de CO_2 claramente mayores al resto. Aunque significativo, este resultado no resulta suficiente para evaluar o clasificar los dis-

tintos tratamientos de rehabilitación en función de su efecto sobre el flujo de CO₂ hacia la atmósfera.

Los resultados de la comparación de pares de tratamientos que difieren en un único factor se presentan en la Tabla 4. Un aspecto que llama la atención de este análisis es que algunos factores aparecen como significativos en determinadas comparaciones, mientras que en otros parece que no tengan el más mínimo efecto. Este es el caso de, por ejem-

plo, la adición de lodos de depuradoras, que incrementa significativamente el flujo de CO₂ en las parcelas con suelo enmendado con lodos en comparación a las que no han sido tratadas (SOFA > SO; $p=0,0244$), pero cuyo efecto desaparece cuando las parcelas han sido, además, sembradas (SOFASE = SOSE; $p=0,9084$). Lo mismo sucede con los factores siembra (SE) y plantación (PL), cuyos efectos son aparentemente dependientes del hecho que se apliquen o no otros tratamientos.

TABLA 3. Resultados significativos de los análisis de correlación entre los valores de flujo de CO₂ y los de los distintos parámetros analíticos medidos en los proyectos coordinados. Se incluyen los valores promedio y la desviación estándar de cada uno de los parámetros medidos en el conjunto de parcelas analizadas.

Variable	Valor medio	r ²	p
Recubrimiento vegetal total (%)	80,72 ± 16,93	0,134	0,0002
Nitrógeno total (%)	0,167 ± 0,111	0,547	0,0003
Capacidad de intercambio de cationes (cmol _c kg ⁻¹)	17,97 ± 8,17	0,527	0,0004
Carbono orgánico (%)	1,59 ± 1,31	0,174	0,0005
Abundancia relativa de herbáceas (%)	78,94 ± 28,22	0,194	0,0006
Densidad aparente (Mg m ⁻³)	1,52 ± 0,31	0,165	0,0007
Índice de diversidad de la vegetación	1,29 ± 0,51	0,163	0,0018
Riesgo de encostramiento	0,83 ± 0,41	0,140	0,0020
Abundancia relativa de árboles (%)	9,82 ± 24,08	0,161	0,0020
Abundancia relativa especies plantadas (%)	9,91 ± 24,37	0,156	0,0023
Total especies vegetales	9,95 ± 4,09	0,141	0,0040
Recubrimiento arbóreo (%)	7,27 ± 15,96	0,136	0,0047
Conductividad hidráulica, k (m s ⁻¹)	2,39E ⁻⁴ ± 3,77E ⁻⁴	0,107	0,0078
Precipitación (mm)	632,84 ± 115,16	0,102	0,0090
Contenido de agua en saturación (%)	60,58 ± 35,80	0,096	0,0122
Agua de drenaje (%)	57,00 ± 34,57	0,095	0,0126
Relación C/N	11,83 ± 4,29	0,307	0,0139
Carbonato cálcico equivalente (%)	43,01 ± 20,64	0,072	0,0296

TABLA 4. Resultados de los análisis de la varianza de un factor para los pares de tratamientos estudiados.

Factor	Par de tratamientos	ANOVA p	Ordenación (si procede)
SO	SOPL / PL	0,2778	
FA	SOFA / SO	0,0244	SOFA > SO
	SOFASE / SOSE	0,9084	
SE	SOSEPL / SOPL	0,2135	
	SOFASE / SOFA	0,0199	SOFA > SOFASE
	SOSE / SO	0,8690	
PL	SOSEPL / SOSE	0,0348	SOSE > SOSEPL
	SOPL / SO	0,7722	

Se han establecido un total de 7 escenarios que corresponden a situaciones frecuentes en trabajos de rehabilitación de suelos de canteras (Tabla 5). En caso que el análisis de varianza muestre un efecto significativo del tipo de tratamiento aplicado, se presentan los que presentan flujos de CO₂ significativamente mayores al tratamiento elemental de aporte de suelo (SO). Como se observa en los resultados, cuando se aprecian diferencias significativas, los análisis suelen mostrar los tratamientos SOFA y SOFASE como los que presentan unos mayores flujos de CO₂. Es destacable también que en tres de los cuatro casos en que se observan diferencias significativas las parcelas de referencia (REF) muestran valores mayores que el tratamiento básico (SO), de la misma manera que los tratamientos SOFA y SOFASE. En ninguno de los escenarios que han resultado significativos el tratamiento SOFA ha aparecido como estadísticamente diferenciado de las parcelas de referencia, lo cual indica que este sistema de rehabilitación consigue, respecto al flujo de CO₂, un mayor parecido a estas áreas.

El efecto del tiempo transcurrido desde la restauración ha resultado significativo para los tratamientos SOFASE y SOPL (Tabla 6), aunque este último ha sido descartado por disponer solamente de parcelas de dos edades

distintas. Para las parcelas SOFASE, el efecto de la edad resulta levemente significativo, indicando que las parcelas tienden a presentar un mayor flujo de CO₂ con el paso del tiempo. El análisis de varianza para las parcelas SOFASE ha demostrado que no existen diferencias significativas entre los contenidos de materia orgánica de las parcelas de distintas edades ($p=0,8990$). Para el resto de tratamientos estudiados, no se observa ningún patrón de variación en el tiempo.

DISCUSIÓN

La multiplicidad de factores que desarrollan un efecto significativo en la configuración del flujo de CO₂ hacia la atmósfera ha sido plenamente demostrada mediante el análisis de correlaciones que se ha efectuado. Ello demuestra el carácter integrador de este parámetro y, por tanto, su carácter como indicador de un conjunto de propiedades o calidades del suelo.

Hay que destacar, en primer lugar, que los valores de flujo de CO₂ que se han medido en las parcelas experimentales no son, por lo general, excesivamente bajos (Jong *et al.*, 1979; Vekemans *et al.*, 1989), presentando unos valores comparables a los de suelos agrícolas o de pastos (Jensen *et al.*, 1996). Sin embargo, en pocas ocasiones se alcanzan

TABLA 5. Escenarios descritos y resultados de los análisis efectuados.

Escenario y tratamientos incluidos en el análisis	ANOVA p	Parcelas con flujo mayor a SO
Áreas de precipitaciones escasas Precipitación ≤ 525 mm SOPL, PL, SOSEPL, SO, SOSE, SOFASE, SOFA y REF	0,0266	SOSE, SOFASE, SOFA, REF
Áreas de precipitaciones elevadas Precipitación ≥ 700 mm SOSE, SO, SOFA y REF	0,3265	—
Suelos pedregosos Gravas ≥ 50% SO, SOFA, SOFASE, SOSE, SOSEPL y REF	0,2636	—
Suelos poco pedregosos Gravas < 50% SOSEPL, PL, SOSE, SOPL, SOFASE, SO, SOFA y REF	0,0023	SOFA, REF
Suelos poco pedregosos y precipitaciones escasas Gravas < 50% y Precipitación ≤ 525 mm SOPL, PL, SO, SOSE, SOFASE, SOFA y REF	0,0283	SOFA, REF
Suelos con bajo contenido de arcillas Arcillas ≤ 20% SOSEPL, SO, SOPL, SOSE, SOFASE, SOFA y REF	0,0415	SOFASE, SOFA
Suelos con pendientes pronunciadas PENDIENTE ≥ 30° PL, SO, SOFA, SOFASE, SOPL, SOSE y SOPL	0,0955	—

TABLA 6. Distribución del número de parcelas experimentales de cada tratamiento en función de su edad. Se indican los resultados de los análisis de regresión del flujo de CO₂ en función de la edad.

Parcelas	Edad de las parcelas (años)												Análisis de regresión			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	β_0	β_1	r ²	p	
SO	1	0	1	1	4	0	2	1	2	1	1	ns	ns	ns	ns	
PL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	—	—	—	—	
SOPL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	-5,759	0,508	1,000	0,0136
SOSE	2	1	1	2	7	0	3	0	2	0	1	ns	ns	ns	ns	
SOSEPL	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	ns	ns	ns	ns	
SOFA	2	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	ns	ns	ns	ns	
SOFASE	3	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	-1,289	0,315	0,458	0,0452	
Total	8	4	6	4	13	0	5	3	7	3	5					

los valores de las parcelas de referencia, lo cual indica que se encuentran todavía distantes de los suelos no perturbados. Se puede afirmar, pues, que los trabajos de restauración no han conseguido una regeneración biológica completa de los suelos, o bien que el tiempo transcurrido desde su rehabilitación es todavía insuficiente. Este hecho resulta especialmente importante si consideramos que en el conjunto de las áreas estudiadas se han estudiado parcelas de entre 2 y 12 años de edad, ya que indica que se requiere un período de tiempo más largo para la recuperación funcional del suelo.

De acuerdo con Wagai *et al.* (1998) y Paustian *et al.* (2000), distintos tipos de tratamientos de rehabilitación crean distintas condiciones en el suelo que se reflejan en unos flujos de CO_2 también diferentes. Ello ha sido plenamente demostrado, aunque el problema aparece cuando se evalúa la eficacia de un tipo u otro de tratamiento a partir de los datos de flujo de CO_2 , debido a la gran variabilidad de los resultados. Es destacable, así, que las parcelas correspondientes al tratamiento más simple, consistente en aportar únicamente suelo al área a restaurar (SO), presenta los valores menores y también mayores de todos los que se han medido.

La gran variabilidad existente en este tipo de características ha sido destacada recientemente por Insam (2001), afirmando que los suelos no perturbados muestran una variabilidad mucho menor que los suelos perturbados o sometidos a algún tipo de manejo. Cabe añadir la gran diversidad de tratamientos de rehabilitación que pueden ser incluidos bajo el epígrafe "SO", cuya única condición es que se haya realizado un aporte de suelo, sin enmiendas ni posteriores trabajos de revegetación, y que demuestra la gran importancia que tiene la selección de materiales que se van a emplear para la restauración. Hay que señalar todavía una tercera causa de variabilidad en los resultados, y es la introducida por las condiciones ambientales y climáticas específicas de cada parcela.

Esta es la razón por la cual en el análisis de tratamientos emparejados, aunque se reduce parte de la variabilidad entre parcelas, se obtienen unos resultados aparentemente contradictorios. Por ejemplo, y con relación al efecto de añadir una enmienda orgánica al suelo, como se ha señalado se observa un efecto muy marcado cuando éste es el único tratamiento aplicado (SOFA > SO), pero el efecto desaparece cuando se siembran las parcelas (SOFASE = SOSE). Ello es debido, sin duda, a que las precipitaciones son muy diferentes en la primera comparación (SOFA: 775 mm año⁻¹; SO: 695 mm año⁻¹) y más parecidas en la segunda (SOFASE: 580 mm año⁻¹; SOSE: 610 mm año⁻¹). La importancia de las condiciones climáticas sobre el flujo de CO_2 , especialmente de las precipitaciones y de la temperatura, ha sido destacado ya por muchos autores (Insam, 1990; Grisi *et al.*, 1998; Lomander *et al.*, 1998a y 1998b).

Aunque esta variedad climática habría podido verse reducida en la selección de las parcelas experimentales, los resultados habrían sido engañosos, puesto que es una variabilidad real, y debe ser tomada en consideración en su justa medida.

Es en el análisis de escenarios concretos donde la variabilidad entre condiciones climáticas y edafológicas se reduce por la misma definición del escenario. En este análisis sí se manifiesta la capacidad del flujo de CO_2 para la discriminación de los distintos tipos de tratamientos. Los resultados obtenidos indican que la utilización de enmiendas orgánicas en los trabajos de rehabilitación incrementa significativamente el flujo de CO_2 hacia la atmósfera. Ello es especialmente significativo en aquellas situaciones en que las condiciones ambientales o las características del suelo resultan especialmente difíciles para la recuperación del sistema, como se ha visto en áreas de escasa pluviometría, y en suelos de granulometrías extremas.

Se podría argumentar que los mayores flujos de CO_2 en los suelos enmendados se

producen por un efecto temporal derivado del aporte de materia orgánica fresca. Efectivamente, estos residuos son portadores de una materia orgánica que se mineraliza, por lo general, muy rápidamente (Seaker y Sopper, 1988; Ortiz y Alcañiz, 1994). Sin embargo, se ha demostrado que el flujo de CO₂ no se modifica o tiende a aumentar con el paso del tiempo, por lo que se puede afirmar que el aporte de lodos de depuradora induce una mejora a largo plazo en las características y propiedades de los suelos tratados.

En comparación con las parcelas de referencia, los tratamientos que no incluyen el aporte de residuos orgánicos en la restauración muestran unos flujos de CO₂ menores y que, además, no tienen tendencia a incrementar con el tiempo. De ello puede deducirse que el proceso de recuperación de estos suelos se encuentra en una fase de estancamiento, o bien que su recuperación funcional es mucho más lenta que lo que permite deducir la escala temporal abarcada en este trabajo. En cualquiera de los dos casos, y desde un punto de vista biológico, debe concluirse que estos suelos no pueden calificarse, en el momento actual, como de suelos rehabilitados, sino, en todo caso, de suelos en proceso de rehabilitación.

CONCLUSIONES

El flujo de CO₂ como indicador de la calidad de la restauración de áreas afectadas por actividades extractivas constituye un parámetro que integra aspectos referentes a las características del suelo, de la cubierta vegetal y del ambiente. Ello le otorga validez en calidad de indicador global del estado del suelo, aunque le proporciona también una gran variabilidad que dificulta el establecimiento de unos valores de referencia.

Por ello, su utilización como indicador debe desarrollarse siempre en comparación con valores de referencia lo más próximos posible al área de estudio. El establecimiento

de estas áreas de referencia es un aspecto crítico del análisis, puesto que permite acotar unos márgenes de variabilidad mucho menores.

Por lo que respecta a las intervenciones de restauración de actividades extractivas, destaca en primer lugar su gran diversidad, lo cual dificulta la definición de unos patrones generales. Los tratamientos basados en la utilización de enmiendas orgánicas para la mejora de los suelos a rehabilitar se han demostrado eficaces en situaciones en las que las características ambientales o del sustrato a restaurar presentaban importantes limitaciones. De la misma manera, se ha demostrado que la selección de los materiales a utilizar tiene una gran importancia en el grado de recuperación conseguido.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a la subvención concedida por el Ministerio de Ciencia y Tecnología para el desarrollo del proyecto CE-FEDER: 2FD1997-1644-C03 "Evaluación ambiental retrospectiva de las intervenciones restauradoras en áreas afectadas por actividades extractivas a cielo abierto en Catalunya". Los autores agradecen la colaboración prestada por las empresas explotadoras y por el Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya.

REFERENCIAS

- Anderson, T.-H. y Domsch, K. H. (1993): The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 25, 393-395.
- Atkinson, T. C. (1977): Carbon dioxide in the atmosphere of the unsaturated zone: an important control of groundwater hardness in limestones. *J. Hydrology* 35, 111-123.

- Fu, S., Coleman, D. C., Scharzt, R., Potter, R., Hendrix, P. F., Crossley Jr., D. A. (2000): ^{14}C distribution in soil organisms and respiration after the decomposition of crop residue in conventional tillage and no-till agroecosystems at georgia Piedimont. *Soil Till. Res.* 57, 31-41.
- García, C. y Hernández, T. (1997): Biological and biochemical indicators in derelict soils subject to erosion. *Soil Biol. Biochem.* 29, 171-177.
- Grisi, B., Grace, C., Brookes, P. C., Benedetti, A., Dell'Abate, M. T. (1998): Temperature effects on organic matter and microbial biomass dynamics in temperate and tropical soils. *Soil Biol. Biochem.* 30, 1309-1315.
- Insam, H. (1990): Are the soil microbial biomass and basal respiration governed by the climatic regime? *Soil Biol. Biochem.* 22, 525-532.
- (2001): Developments in soil microbiology since the mid 1960s. *Geoderma* 100, 389-402.
- Jandl, R. y Sollins, P. (1997): Water-extractable soil carbon in relation to the below-ground carbon cycle. *Biol. Fertil. Soils* 25, 196-201.
- Jensen, L. S., Mueller, T., Tate, K. R., Ross, D. J., Magid, J., Nielsen, N. E. (1996): Soil surface CO_2 flux as an index of soil respiration in situ: a comparison of two chamber methods. *Soil Biol. Biochem.* 28, 1297-1306.
- Jong, E. de., Redmann, R. E., Ripley, E. A. (1979): A comparison of methods to measure soil respiration. *Soil Sci.* 127, 300-306.
- Lomander, A., Kätterer, T., Andrén, O. (1998a): Modelling the effects of temperature and moisture on CO_2 evolution from top- and subsoil using a multi-compartment approach. *Soil Biol. Biochem.* 30, 2023-2030.
- (1998b): Carbon dioxide evolution from top- and subsoil as affected by moisture and constant and fluctuating temperature. *Soil Biol. Biochem.* 30, 2017-2022.
- Miglietta, F., Raschi, A., Bettarini, I., Resti, R., Selvi, F. (1993): Natural CO_2 springs in Italy: a resource for examining long-term response of vegetation to rising atmospheric CO_2 concentrations. *Plant cell environment* 16, 873-878.
- McCarthy, K. P. y Brown, K. W. (1992): Soil gas permeability as influenced by soil gas-filled porosity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 997-1003.
- Neilson, J. W. y Pepper, I. L. (1990): Soil respiration as an index of soil aeration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 428-432.
- Ortiz, O. y Alcañiz, J. M. (1994): Respiration potential of microbial biomass in a calcareous soil treated with sewage sludge. *Geomicrobiology J.* 11, 333-340.
- Paustian, K., Six, J., Elliott, E. T., Hunt, H. W. (2000): Management options for reducing CO_2 emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry* 48, 147-163.
- Rouard, N., Dictor, M.-C., Chaussod, R., Soulas, G. (1996): Side-effect of herbicides on the size and activity of the soil microflora: DNOC as a test case. *Eur. J. Soil Sci.* 47, 557-566.
- Seaker, E. M. y Sopper, W. E. (1988): Municipal sludge for minespoil reclamation: I. Effects on microbial populations and activity. *J. Environ. Qual.* 17, 591-597.
- Speir, T. W., Kettles, H. A., Parshotam, A., Searle, P. L., Vlaar, L. N. C. (1999): Simple kinetic approach to determine the toxicity of $\text{As}[\text{V}]$ to soil biological properties. *Soil Biol. Biochem.* 31, 705-713.
- Vekemans, X., Godden, B., Penninckx, M. J. (1989): Factor analysis of the relationships between several physico-chemical and microbiological characteristics of some belgian agricultural soils. *Soil Biol. Biochem.* 21, 53-58.

- Wagai, R., Brye, K. R., Grower, S. T., Norman, J. M., Bundy, L. G. (1998): Land use and environmental factors influencing soil surface CO₂ flux and microbial biomass in natural and managed ecosystems in southern Wisconsin. *Soil Biol. Biochem.* 30, 1501-1509.
- Witkamp, M. (1969): Cycles of temperature and carbon dioxide evolution from litter and soil. *Ecology* 50, 922-924.
- Wolters, V. (1991): Biological processes in two beech forest soils treated with simulated acid rain - A laboratory experiment with *Isotoma tigrina* (Insecta, Collembolla). *Soil Biol. Biochem.* 23, 381-390.