

L'APLICACIÓ DE FANGS DE DEPURADORA EN LA RESTAURACIÓ DE PEDRERES DE CALCÀRIES

T. Balanyà, M. Bonmatí i M. Pujolà
Escola Superior d'Agricultura de Barcelona

Resum

L'aplicació d'altres dosis de fangs de depuradora en la restauració de pedreres de calcària té l'objectiu d'aconseguir en una sola intervenció un substrat edàfic que possibiliti la revegetació de la zona que s'ha de restaurar. Aquestes altes dosis impliquen l'addició de metalls en quantitats elevades així com una sobrefertilització en N i P que cal controlar. El principal problema detectat ha estat l'acumulació de nitrats en els llixiviats i en els vegetals, sobretot a l'inici de les experiències; aquest fet obliga en un futur a reduir les dosis aplicades. La immobilització dels metalls, que es fa patent per la seva baixa presència en els llixiviats i la coberta vegetal, es manté durant el temps en l'experiència de més llarga durada (cinc anys). L'evolució de les característiques edafològiques de les barreges no fan pensar en canvis a curt termini en aquest tema. La fertilitat biològica del sòl augmenta clarament amb l'addició de fangs. Quant a les formes d'aplicació dels fangs, la més convenient és la de barrejar prèviament el fang amb el sòl. Es desestima l'aplicació directa, ja que les pèrdues de sals per llixiviació són molt més importants i a més el residu s'acumula en la zona superficial.

Com que una part important i creixent dels fangs de Catalunya són sotmesos a diferents postrataments, actualment es treballa en aplicacions amb fangs compostats o assecats tèrmicament i sòls diferents del calcari d'ampliar l'àmbit d'aplicació d'aquests tipus de restauracions.

Mots clau

Fangs de depuradora, restauració, pedreres de calcària, nitrats, metalls, activitats enzimàtiques.

Resumen

La aplicación de altas dosis de fangos de depuradora en la restauración de canteras de caliza, tiene por objetivo conseguir en una sola aplicación un sustrato edáfico que posibilite la revegetación de la zona a restaurar. Estas altas dosis implican la adición de metales en cantidades elevadas y una sobre-fertilización en N y P que es preciso controlar. El principal problema detectado es la acumulación de nitratos en los lixiviados y en los vegetales, sobre todo al inicio de las experiencias, lo cual obliga en un futuro a reducir las dosis aplicadas. La inmovilización de los metales estudiados, que queda patente por su baja presencia en los lixiviados y en la cubierta vegetal, se mantiene a lo largo del tiempo de la experiencia más larga (cinco años). La evolución de las características edafológicas de las mezclas no parece indicar cambios a medio plazo en este tema. La fertilidad biológica del suelo claramente aumenta con la adición de fangos. Con respecto a las formas de aplicación de los fangos la más conveniente es la de mezclar previamente el fango con el suelo. Se desestima su aplicación directa, ya que, las pérdidas de sales por lixiviación son mucho más importantes y concentra el residuo en la zona superficial.

Dado que una parte importante y creciente de fangos de Cataluña son sometidos a diferentes postratamientos, actualmente se trabaja en aplicaciones a dosis más bajas, con fango compostado o secado térmicamente y en suelos distintos al calcáreo a fin de ampliar el ámbito de aplicación de este tipo de restauraciones.

Palabras clave

Fangos de depuradora, restauración, canteras de caliza, nitratos, metales, actividades enzimáticas.

Abstract

High doses of sewage sludge are used in the reclamation of limestone quarries to obtain, in a single application, a soil-like substratum capable of achieving plant growth in the reclamation zone. High proportions of heavy metals, and also of N and P, are incorporated into soil with the added sludge, which means that the final contents of these substances must be checked.

The tests performed showed, especially in the beginning, nitrate accumulation in the leaching waters and also in the fully-grown plants; this means that a reduction in the dosages of applied sludge is necessary in future reclamation actions. The added metals became immobilized over the course of the five years of the longest field experiment, the results of which presumably hold true in the short term.

Biological fertility of soil is clearly improved by sludge addition.

Mixing sludge with soils prior to application is preferable to directly applying it onto the ground, since the latter practice necessarily means that leaching losses are higher and also that sludge remains concentrated in the surface zone.

Since a growing proportion of the sludge produced in Catalonia is subsequently either transformed into compost or thermally dried, new experiments are presently underway which consist in adding these products to limy and non-limy soils in order to extend the applicability of the field of soil reclamation.

Key words

Sewage sludge, reclamation, limestone quarries, nitrate, metals, enzymatic activities.

Introducció

En el procés de depuració biològic de les aigües residuals s'origina un residu anomenat fang de depuradora (o biosòlid), que prové de la transformació microbiològica de la matèria orgànica de les aigües residuals. L'aplicació d'aquest residu al sòl com a adob organomineral o esmena orgànica ja té més de 30 anys d'història i és considerada com la millor opció medioambiental per eliminar-los (CHAMBERS 1996). No obstant això, el seu ús no està exempt de riscos, ja que pot presentar metalls pesants i contaminants orgànics en concentracions considerables que podrien acumular-se en el sòl i transferir-se als conreus, la qual cosa possibilitaria que entressin en la cadena alimentària tant humana com animal. Per altra banda, atès el seu origen fecal, els fangs poden contenir també microorganismes patògens. Altres problemes són els derivats de la seva elevada riquesa en N i P, que, juntament amb pràctiques incorrectes d'adobatge, poden donar lloc a pèrdues d'aquests dos elements cap a les aigües continentals (subterrànies i superficials) i provocar així problemes sanitaris i/o el fenomen de l'eutrofització. Per evitar aquests aspectes negatius s'han desenvolupat normatives i recomanacions que inclouen diferents àmbits i que tenen graus d'exigència molt diversos segons el país. En el nostre context la normativa aplicable data del 1990 (RD 1310/1990) i és la transposició de la Directiva 86/278/CEE sobre l'aplicació de fangs de depuradora en agricultura. En aquesta primera normativa només es fa referència al tema dels metalls pesants i es donen unes recomanacions per evitar contaminacions microbiològiques provocades per la ingestió tant animal com humana dels vegetals adobats amb fangs. Aquesta normativa es troba actualment en fase de revisió, i ja existeix el tercer esborrany d'una futura directiva europea (European Commission, 2000). Aquest esborrany bàsicament proposa la millora en la qualitat dels fangs a diferents nivells: en l'àmbit ja legislat dels metalls pesants, redueix els límits actuals de metalls en sòls, fangs i en les aportacions d'aquests fangs; per als contaminants orgànics, introdueix valors límit en els fangs (ja existents en normatives d'alguns països), i com a novetat

obliga a millorar el tractament d'aquest residu perquè assoleixi un nivell higiènic fins ara no previst. Quant a tipus d'usos n'introdueix l'aplicació en silvicultura, en jardineria i en la regeneració de sòls, a més de l'agrícola.

La Directiva 91/271/CEE sobre aigües residuals urbanes obliga a depurar les aigües residuals en totes les poblacions amb més de 2.000 habitants-equivalents abans de l'any 2005. A Catalunya el Departament de Medi Ambient va avançar aquest objectiu a l'any 2000, de manera que en els últims anys la producció de fangs ha augmentat de manera important. La producció l'any 2000 va arribar a 155.268 tones en matèria seca, de les quals una part important es va eliminar via emissari submarí (pràctica ja prohibida per la UE i en fase de solució imminent a Catalunya). Els destins principals de la part restant van ser la utilització en agricultura i jardineria (64%) i la disposició en abocadors (33%) (ACA 2001).

Una forma més nova d'aplicació de fangs al sòl és la dedicada a la restauració d'espais degradats per les activitats minaires a cel obert (SOPPER 1993; WHITE *et al.*, 1997; DUDKOWSKI 2001) i per les infraestructures viàries. En ambdós casos l'empresa explotadora o constructora està obligada a restaurar la zona un cop finalitzada l'activitat extractiva o la construcció de la infraestructura. En la restauració pot ser necessària ocasionalment la modificació del relleu (caldran materials inerts de farciment) però sempre cal una restauració superficial que possibiliti la implantació d'una coberta vegetal que es mantingui i pugui evolucionar al llarg dels anys. Abans d'iniciar-se l'activitat cal decapar l'horitzó superficial del sòl (generalment més fèril que el subsòl) per reservar-lo per a la restauració, que consistirà a recobrir la zona amb aquest sòl, adobar i sembrar o plantar diverses espècies vegetals. No obstant això, per diversos motius, molt sovint la terra de què es disposa és una barreja de diversos horitzons, incloent-hi el material de rebuig de l'exploració, i per tant, presenta una fertilitat molt baixa, que farà difícil la implantació d'una coberta vegetal. L'aplicació d'un adob o residu orgànic pot millorar molt aquesta situació, i si utilitzem fangs de depuradora suposarà, a més, donar sortida a un residu produït en gran quantitat.

Aplicació de fangs en la restauració d'espais degradats

L'aplicació de fangs en la restauració d'espais degradats constitueix una línia d'investigació de l'ESAB a partir del 1991, com a part d'un grup constituït per membres del Centre de Recerca Ecològica i Agroforestal (CREAF) i l'Institut Químic de Sarrià (IQS). La diferència respecte a l'ús agrícola del fang és que, quan es restauren sòls degradats, es proposa aplicar dosis úniques superiors a les agronòmiques, amb la intenció d'aconseguir un substrat edàfic que possibiliti, en una sola intervenció, la revegetació de la zona sense que s'hi hagi d'aplicar més fertilitzants. Els projectes inicials se centren principalment en la restauració en pedreres de roca calcària, ja que les seves característiques edafològiques (pH bàsic i presència de carbonats) les fan molt apropiades per a aquest tipus d'intervenció, ja que són factors que limiten la mobilitat dels metalls en el sòl. Aquests projectes consten de proves "in vitro" prèvies i proves de camp, amb un àmbit d'estudi molt ampli, que comprèn:

- El desenvolupament de la tècnica per aplicar aquestes grans dosis de fangs en zones sovint topogràficament complexes.
- L'estudi dels efectes sobre les característiques físiques, químiques i biològiques del sòl.
- La presència i evolució de contaminants orgànics.
- El control dels efectes sobre la coberta vegetal.
- L'elecció dels criteris per la determinació de la dosi de fang.

El nostre treball a l'ESAB s'ha centrat a estudiar:

- L'evolució de la matèria orgànica i les activitats enzimàtiques a diferents nivells.
- El contingut i l'evolució del fòsfor, els nitrats i els metalls (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb i Zn) en el sòl, la planta i els lixiviats (en aquest darrer cas també Hg).

L'aplicació dels resultats obtinguts en el conjunt dels projectes ha quedat recollida en el "Manual de restauració d'activitats extractives amb fangs de depuradora" (ALCAÑIZ *et al.* 1996) editat per la Junta de Sanejament.

Actualment la restauració de pedreres amb fangs de depuradores és una pràctica habitual a Catalunya, i l'any 2000 es van utilitzar per a

aquesta finalitat 11.672 tones de fang (en matèria fresca) (ACA, 2001).

Resultats dels primers assajos de camp

Es tracta de tres experiències realitzades en dues pedreres de calcària Rubau (Girona) i Tres Maries (Alcover, Tarragona), la primera amb un règim pluviomètric força superior a la segona. Els assajos Alcover-Pins i Alcover-Lisímetres s'han portat a terme a la pedrera Tres Maries el primer en parcel·les i el segon en contenidors lisimètrics que permeten recollir en la part inferior els lixiviats formats per efecte de la pluja. L'assaig realitzat a la pedrera Rubau s'ha fet en parcel·les i contenidors lisimètrics. Les aportacions de fangs es fan barrejant diferents proporcions en volum de fang i sòl proporcionat per les pedreres, per aconseguir material suficient per formar una capa (20 a 40 cm) a les parcel·les o bé omplir els contenidors lisimètrics. El sòl consisteix en una barreja d'horitzons A i B d'un sòl calcari i, en el cas d'Alcover-Lisímetres també s'ha treballat amb el residu d'explotació de la pedrera, el regòlit, compostat per roca calcària de granulometria diversa. La barreja fang-sòl es pot fer abans d'incorporar-la a la zona que s'ha de restaurar o bé *in situ* incorporant manualment o mecànicament el fang sobre una capa de sòl estesa prèviament. En la primera experiència plantejada, Rubau, les dosis de fang es calculen en funció del Cd, que juntament amb el Hg són els metalls que tenen més restringida la seva aportació. La dosi baixa a de contenir la quantitat màxima permesa de Cd en 10 anys (1,5 kg/ha) segons la normativa sobre utilització agrícola de fangs i la dosi alta el doble d'aquesta quantitat. En les experiències posteriors (Alcover-Lisímetres, Alcover-Pins) es rebaixen les dosis aplicades. Expressades en tones de fang sec per hectàrea la dosi inferior (1/15) suposaria unes 25 tones/ha, i les dosis superiors, aplicades a Rubau, 200 i 400 tones/ha, és a dir, dosis de 5 a 80 vegades superiors a una dosi agronòmica alta (5 tones fang sec/ha).

Cal destacar que els fangs utilitzats presenten un contingut en metalls que es troba força per

sota dels límits fixats pel RD 1310/1990; això explica que, encara que les dosis han estat molt elevades, les aportacions de metalls poques vegades superen la quantitat límit legislada si considerem el conjunt de deu anys d'aplicació.

A la taula 1 es presenten més detalls de les experiències.

Efectes sobre els sòls

L'addició de fangs implica un augment del contingut total de metalls en el sòl, continguts que en tot cas resten molt per sota dels valors que limiten (RD 1310/1990) l'ús d'un sòl per rebre fangs. En l'experiència de Rubau, la disponibilitat dels metalls estudiats també augmenta inicialment amb l'addició de fangs (llevat del Cr), de manera més acusada per a la dosi més alta en la variant aplicació directa; la disponibilitat disminueix amb el temps però es mantenen les diferències significatives respecte al control per al Cu i el Zn, que són els metalls afegits en més quantitat. Malgrat el pendent de les parcel·les (27%) quatre anys després de l'aplicació de fangs no s'ha detectat migració dels metalls estudiats cap a les zones baixes (PUJOLÀ *et al.* 2001).

Els fangs son un residu molt ric en fòsfor; per tant, dosis elevades provoquen importants acumulacions d'aquest element en el sòl, que es tradueixen en augments considerables de fòsfor assimilable (P-Olsen). S'observen increments d'aquest paràmetre d'1,5 fins a 10 vegades el contingut del control i es detecta un efecte positiu, encara que no proporcional, de la dosi de fang aportada. El tipus d'aplicació (directa o barreja prèvia) té comportaments contradictoris en Rubau i Alcover. Aquestes acumulacions no tenen efectes negatius sobre els conreus, i les pèrdues de fòsfor es poden considerar nul·les des del punt de vista agronòmic atesa la insolubilitat d'aquest element. Des de la perspectiva ambiental, en canvi, petites pèrdues, ja sigui per lixiviació o escolament superficial, poden ser importants si contaminen les aigües continentals ja que el fòsfor és l'element que condiciona l'aparició de l'eutrofització. No obstant això, com es comenta més endavant, la concentració de fosfats en els lixiviats és molt baixa. A més, l'aplicació de fangs al sòl té un clar efecte reductor de l'erosió, ja que des del primer moment de la restauració augmenta la capacitat d'infiltració dels sòls tractats, es redueixen les pèrdues per esquitx i dismi-

nueix l'arrossegament de sediments per escolament superficial (SORT i ALCANIZ 1996). Cal assenyal·lar, però, que la baixa extracció de P pels vegetals fa que l'acumulació de fòsfor perduri al llarg del temps i per tant el perill de contaminació de les aigües es mantingui de manera indefinida.

En l'experiència de Rubau es determinen periòdicament un conjunt d'activitats enzimàtiques relacionades amb la fertilitat biològica del sòl restaurat (BONMATÍ *et al.* 2000). Aquestes activitats informen de la progressió, durant el procés restaurador del sòl, de l'assimilabilitat del N i del P per part dels vegetals (activitats proteolítica, peptidàsica, ureàsica i fosfatàsica) o del C per part dels microorganismes (invertasa). Els resultats obtinguts mostren que l'afegit de fang augmenta els valors de totes les activitats estudiades i que, en general, l'increment és més gran quan augmenta la dosi. Al cap de cinc anys les barreges continuen sent més actives que el sòl control. L'activitat proteolítica és la que més augmenta globalment per l'addició de fang, però també aquella en la qual l'increment disminueix més dràsticament amb el temps, de la qual cosa es pot deduir que aquesta proteasa depèn directament de la presència de matèria orgànica fresca susceptible d'activar la biomassa microbiana al sòl (molta activitat enzimàtica a l'inici, en el moment en què la presència de fang fresc indueix l'increment de l'esmentada activitat microbiana, però disminució forta a mesura que la matèria orgànica es va mineralitzant i humedificant, és a dir, a mesura que es va fent menys assimilable pels microorganismes). L'activitat peptidàsica, en canvi, està probablement molt lligada a la matèria orgànica humedificada, ja que, al revés que el cas de la proteàsica, l'efecte intensificador sobre aquesta activitat per l'afegit de fang va augmentant amb el temps. L'increment obtingut per l'afegit de fang en la fosfatasa té poques variacions durant els cinc anys que dura l'experiència, de la qual cosa es dedueix que aquesta activitat està equitativament associada a la matèria orgànica fresca i a l'estabilitzada. L'efecte intensificador del fang sobre l'activitat ureàsica no es fa patent fins que han transcorregut dos anys des de l'inici de l'experiència, i aquest fet es podria explicar, atès el conegut efecte inhibidor de l'amoni sobre l'esmentada activitat, pels elevats continguts inicials d'aquesta substància en les barreges com a con-

Taula 1. Característiques de les experiències Rubau, Alcover-Pins i Alcover-Lisímetres.

	Rubau	Alcover-Pins	Alcover-Lisímetres
SITUACIÓ	Pedrera Rubau Girona	Pedrera Tres Maries Alcover Tarragona	Pedrera Tres Maries Alcover Tarragona
Dosis volum fang fresc/ volum terra	1/4 1/1,5	1/15	Fang 1/5 1/15
Tipus d'aplicació del fang	Aplicació directa fang (A) Barreja prèvia fang /terra (B)	Barreja prèvia fang/terra	Barreja prèvia fang/terra
Tractaments	1/4 A 1/4 B 1/1,5 A 1/1,15 B Control sòl	1/15 Control sòl	Fang directe sobre regòlit 1/5 barreja prèvia fang/sòl 1/15 barreja prèvia fang/sòl Control sòl Control regòlit
Gruix de la capa aplicada	40 cm	20 cm	40 cm
Durada de la experiència	5 anys	1 any	2 anys
Coberta vegetal	Sembra de <i>Dactylis glomerata</i> i <i>Lotus corniculatus</i>	Plantació preexistent de 6 anys de <i>Pinus halepensis</i>	No
DISPOSITIU EXPERIMENTAL			
Tipus	Parcel·la i contenidors lisimètrics	Parcel·la	Contenidors lisimètrics
Dimensió	100 m ² (parcel·la)	100 m ²	200 L
Repeticions per tractament	2	2	2
Pendent	27%	No	No
Recollida de lixiviats per efecte de la pluja	Sí	No	Sí
CARACTERÍSTIQUES DELS FANGS			
Origen	Girona	Reus	Reus
Digestió	Anaeròbica	Anaeròbica	Anaeròbica
Apte per a ús agrícola RD 1310/90	Sí	Sí	Sí

seqüència de la forta mineralització, que té lloc durant aquest període, de la matèria orgànica aportada pel fang. Finalment, l'activitat invertàsica és la que menys augmenta pel fang afegit.

En les parcel·les tractades amb fangs es perd matèria orgànica per mineralització durant els primers sis mesos d'experiència, però a partir de l'any n'augmenta el contingut per les aportacions vegetals. La matèria orgànica de les barreges

evoluciona amb el temps cap a la seva humidificació. (BONMATÍ *et al.* 2000)

Efectes sobre els lixiviats

Durant el primer any la composició dels lixiviats dels tractaments amb fangs es caracteritza pel fet de presentar una important contaminació salina, bàsicament nitrats, sulfats i clorurs, amb fluctuacions temporals importants. La dosi i la forma

Taula 2. Alcover-Lisímetres: conductivitat elèctrica (CE) i contingut en nitrats en els llixiviats al llarg de l'experiència

	$C.E. \mu S\ cm^{-1}\ 25^{\circ}C$				$mg\ NO_3^{-}\ L^{-1}$			
TRACTAMENTS	Temps (mesos)				Temps (mesos)			
	6	13	18	24	6	13	18	24
Fang sobre regòlit	23.200 a ¹	8.410 a	4.430 a	4.243 a	13.307 a	3.669 a	138 a	228 a
1/4	5.410 b	4.200 b	1.105 b	477 b	2.631 b	1.982 b	53 b	13 b
1/15	4.027 b	4.587 b	642 b	657 b	1.912 b	2.101 b	12 c	10 b
Control: terra	366 c	398 c	302 c	344 bc	23 c	14 c	n.d ²	17 b
Control: regòlit	393 c	185 c	207 c	251 c	62 c	3 c	2 c	9 b

¹ Mitjanes d'un paràmetre per un mateix període de temps seguides de diferent lletra són significativament diferents segons el test de Newman Keuls ($\alpha < 0,05$). ² n.d. = no detectable.

d'aplicació de fangs no sempre tenen un efecte clar sobre la composició dels llixiviats. No obstant això, si els fangs no es barregen amb el sòl (aplicació directa sobre el regòlit), la contaminació inorgànica dels llixiviats assoleix nivells molt superiors, tal com es pot observar a la taula 2. A partir del segon any s'entra en una etapa d'estabilització en la majoria del casos; en concret, els nitrats que assoleixen valors molt elevats durant el primer any (al voltant de 2000 mg NO₃⁻/L) durant el segon any disminueixen fins a arribar a valors inferiors als màxims que pot contenir una aigua apta per ser potabilitzada (50 mg NO₃⁻/L) (taula 2) (CARRERA i QUEVEDO 1997). La concentració en fosfats és molt petita (d'1 a 5 mg PO₄³⁻/L) i no detectable a partir del segon any. En tots els casos, la concentració en els llixiviats dels metalls pesants estudiats està per sota dels valors màxims permesos per a aigües aptes per ser potabilitzades (BALANYÀ *et al.* 1994), resultats que concorden amb els trobats en proves *in vitro* prèvies (PEIRÓ 1993).

Efectes sobre la coberta vegetal

En l'experiència amb plantes herbàcies, la biomassa de les zones fertilitzades amb fangs és clarament superior a la de les zones control, encara que no hi ha una resposta proporcional a la dosi. A partir dels sis primers mesos les zones fertilitzades amb fangs presenten un recobriment vegetal superior al 90% respecte al 80% del control. Es detecta, però, una acusada reducció de la diversitat en les zones restaurades amb fangs, amb l'exclusió quasi completa de lleguminoses i

domini d'espècies nitròfiles (ALCAÑIZ 2001). Pel que fa a l'assaig amb pins, s'ha observat un augment significatiu del seu creixement en alçada (1,5 vegades el control) per efecte dels fangs (ESPADA 1998).

En Rubau l'estat nutricional millora en els vegetals que han rebut fangs, sobretot pel que fa a N i P, i en el cas dels pins únicament es detecta un augment significatiu de les clorofil·les a+b. Tanmateix, la sobrefertilització es fa patent en la coberta herbàcia de Rubau, ja que s'observa una excessiva acumulació de nitrats en els teixits. Durant els tres primers anys es detecten continguts, per a tots els tractaments i formes d'aplicació, superiors a 2000 mg N-NO₃⁻/kg (taula 3), límit considerat tòxic perquè un farratge pugui ser consumit pel bestiar (PRATT *et al.* 1976). Un cop passat aquest temps s'observa una tendència a la disminució.

Quant al contingut de metalls de la part aèria dels vegetals, només s'han detectat augments significatius de Cu, Pb i Zn (IRIMIA *et al.* 1995), en l'experiència de Rubau, pel que fa a la variant d'aplicació directa del fang, a sis mesos de l'inici de l'experiència (1r dall), tal com es pot observar a la taula 4, fet que mostra que aquest sistema d'incorporació del fang *in situ* l'acumula en la capa superficial i, per tant, actua quasi com una dosi doble de la dissenyada. Cal assenyalar que Cu, Pb i Zn són els metalls aportats en més quantitat. Els valors assolits queden molt lluny dels considerats zootòxics per a l'alimentació animal, com són per exemple, per a boví, Cu i Zn > 100 mg/Kg (CHURCH 1974). Un any després

Taula 3. Rubau: contingut en N orgànic, nítric i fòsfor de la part aèria de la coberta vegetal al llarg de l'experiència

TRACTAMENTS	% N orgànic			N-NO3-			Kg ⁻¹ %P		
	Temps (anys)			Temps (anys)			Temps (anys)		
	0,5	1,5	3,5	0,5	1,5	3,5	0,5	1,5	3,5
Control	1,7 c ¹	1,1 b	0,75 b	801 d	816 c	200 b	0,19 b	0,17 a	0,16 ab
F 1/4 A	2,1 b	1,8 a	0,90 ab	2.716 b	3.569 a	410 ab	0,35 a	0,21 a	0,21 a
F 1/4 B	1,7 c	1,8 a	1,24 a	2.047 bc	1.556 c	723 a	0,27 ab	0,17 a	0,18 ab
F 1/1,5 A	2,9 a	1,6 a	1,21 ab	4.296 a	2.664 b	220 b	0,33 a	0,18 a	0,13 b
F 1/1,5 B	1,5 c	1,8 a	1,14 ab	1.715 c	3.101 ab	430 ab	0,31 a	0,15 a	0,17 ab

¹ Mitjanes d'un paràmetre per un mateix període de temps seguides de diferent lletra són significativament diferents segons el test de Newman Keuls ($\alpha<0,05$).

aquestes diferències ja no es detecten i quatre anys i mig després continuen no detectan-se (taula 4). Per tant, sembla que la immobilització de metalls s'aconsegueix i es manté al llarg del temps, i no es dona l'efecte *time bomb* (CHANG *et al.* 1997), segons el qual l'efecte immobilitzador dels sòls es perd amb el temps, principalment a causa de la mineralització de la matèria orgànica, que fa que els metalls s'alliberin anys després. Com s'ha comentat abans en aquesta experiència a partir de l'any el balanç de matèria orgànica és positiu per a les aportacions de la capa herbàcia. Aquest efecte immobilitzador queda reflectit en la disminució de la fracció disponible de metalls al sòl esmentada anteriorment.

Conclusions

Així doncs, la restauració de pedreres de calcària amb altes dosis de fangs de depuradores presenta més beneficis que inconvenients. El principal problema detectat ha estat la pèrdua de nitrats, que contaminen els lixiviats i s'acumulen en els vegetals, sobretot a l'inici de l'experiència, fet que obliga en el futur a reduir les dosis aplicades.

La immobilització dels metalls sembla molt bona, i es manté durant el temps en l'experiència de més llarga durada (cinc anys). L'augment de la matèria orgànica a les barreges a partir de l'any d'aplicació de fangs, juntament amb les

seves característiques edafològiques i que el seu pH es manté superior a la neutralitat, no fan pensar en canvis a curt termini.

L'afegit de fang augmenta la fertilitat biològica del sòl, específicament pel que fa a l'assimilabilitat de N i P. En canvi, l'efecte sobre la mobilització del C assimilable per la biomassa microbiana és poc patent.

Quant a formes d'aplicació dels fangs, la més convenient és la de barrejar prèviament el fang i la terra i incorporar-los en forma de capa (40 cm) sobre la zona que s'ha de restaurar. Es desestima l'aplicació directa, ja que les pèrdues de sals per lixiviació son molt més importants i concentren el residu en la zona superficial.

Com que una part important i creixent dels fangs de Catalunya són sotmesos a diferents posttractaments s'està treballant en aplicacions amb fangs compostats o assecats tèrmicament i sòls diferents del calcari per ampliar l'àmbit d'aplicació d'aquests tipus de restauracions a obres lineals i tallafocs (projecte Ecofang), tot mantenint l'estudi de la seva aplicació en la restauració de pedreres.

Agraïments

Els treballs que han servit de base per fer aquest article han estan finançats per la CICYT (projectes NAT91-0340 i AMB95-0728) i la Junta de Sanejament del Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya.

Taula 4. Rubau: contingut en metalls en la part aèria de la coberta vegetal al llarg de l'experiència. A: aplicació directa del fang. B: barreja prèvia del fang i el sòl

Metalls en la planta mg.Kg ⁻¹ (s.m.s.)															
METALLS	Control			F 1/4 A			F 1/4 B			F 1/1,5 A			F 1/1,5 B		
	Temps (anys)			Temps (anys)			Temps (anys)			Temps (anys)			Temps (anys)		
	0,5	1,5	4,5	0,5	1,5	4,5	0,5	1,5	4,5	0,5	1,5	4,5	0,5	1,5	4,5
Cd	<0,28 ¹	<0,28	<0,28	<0,28	<0,28	<0,28	<0,28	<0,28	<0,28	<0,28	<0,28	<0,28	<0,28	<0,28	<0,28
Cr	3,0	1,0 a	2,4 ab	7,0	1,2 a	2,2 b	<2,3	0,5 a	5,8 a	6,3	0,5 a	1,8 b	<2,3	1,2 a	3,3 ab
Cu	10,4 b	4,0 a	6,3 a	20,7 a	6,6 a	6,5 a	7,3 b	4,2 a	7,8 a	19,7 a	5,3 a	8,1 a	8,5 b	6,5 a	7,8 a
Ni	2,2 a	1,3 a	1,4 ab	3,1 a	1,3 a	1,1 b	1,1 a	1,4 a	2,1 a	3,2 a	1,1 a	1,2 b	1,9 a	1,0 a	1,7 ab
Pb	3,9 b	1,0 a	1,8 a	9,6 ab	1,0 a	2,4 a	3,9 b	1,0 a	2,8 a	12,3 a	0,8 b	2,4 a	4,9 b	0,7 b	2,8 a
Zn	22,2 b	16,2b	21,0 a	52,4 a	31,8 a	27,1 a	24,3 b	16,8 b	25,6 a	57,7 a	16,9 b	23,9 a	26,4 b	19,5 b	23,1 a

¹ Mitjanes d'un mateix metall i un mateix any seguides de diferent lletra són significativament diferents segons el test de Newman Keuls ($\alpha < 0,05$).

Bibliografia

ACA, Agència Catalana de l'Aigua. (2001). Informe intern.

ALCANIZ, J.M. (2001). Utilización de lodos de depuradoras urbanas en la restauración de canteras. En BOIXADERA, J.; TEIRA, M.R. (ed.) Aplicación de residuos orgánicos. 5º Curso de Ingeniería Ambiental. Lleida, p. 123-141.

ALCANIZ, J.M.; COMELLAS, L.; PUJOLÀ, M. (1996). Manual de restauració d'activitats extractives amb fangs de depuradora. Recuperació de terrenys marginals. Junta de Sanjeament (ed.), Generalitat de Catalunya, Barcelona.

BALANYÀ, T.; IRIMIA, E.; LLIBERÍA, J.L.; MILÁN, D.; ORTIZ, O.; PUJOLÀ, M. (1994). Sewages sludges application in limestone quarries rehabilitation: heavy metals in soil, plant and leachates. Proceedings of the VII Cong. Inter. L'approccio Integrato della Moderna Biologia: Uomo, Territorio, Ambiente. Vieste, Itàlia. pp.147-154

BONMATÍ, M.; JIMÉNEZ, P.; ÁLVAREZ, H.; CALERO, E.; JULIÀ, M.; MORILLO, M.; NÚÑEZ, E. (2000). Evolución de las actividades enzimáticas en el proceso restaurador de dos suelos procedentes de la explotación de canteras de Cataluña utilizando altas dosis de lodos de depuradora. En GARCÍA, C.; HERNÁNDEZ, M.T. (ed.) Capítulo IV en "Investigación y perspectivas de la enzimología de suelos en España" p. 207-293. CSIC-CEBAS. Murcia.

CARRERA, S.; QUEVEDO, G. (1997). Efecte de l'aplicació de diferents dosis de fang en sòls calcaris degradats: proves lisimètriques 2n any d'experiència. Treball final de carrera. Escola Superior d'Agricultura de Barcelona.

CHAMBERS, B.J. (1996). Sludge recycling to land- Present and future. Agricultural Engineer, 51:15-18.

CHANG, C.A.; HYUN, H.; PAGE, A.L. (1997). Cadmium uptake for swiss chard grown on composted sewage sludge treated field plots: Plateau or Time bomb? J. Environm. Qual., 26:11-19.

CHURCH, D.C. (1974). Fisiologia digestiva y nutrición de los rumiantes. 1a ed. Ed. Acribia. Saragossa.

DUDBOWSKI, A.(2201) L'épendage agricole des boues de stations d'epuration d'eaux usées urbaines. <http://www.inra.fr/dpenv/lesboues.htm>

ESPADA, A. (1998). Els fangs de depuradora urbana en la restauració de pedreres: efectes sobre la qualitat de *Pinus halepensis*. Treball final de carrera. Escola Superior d'Agricultura de Barcelona.

EUROPEAN COMMISSION. DG ENV. E3 (2000). Waste management. Working Document on sludge. 3rd draft. http://www.europa.eu.int/comm/environment/waste/facts_en.htm

IRIMIA, E.; BALANYÀ, T.; PUJOLÀ, M. (1995). Aplicación de fangos de depuradora en la restauración de canteras calcáreas: metales pesandos en suelo y tejido vegetal. En FARRAN, A.; FLORIDO, A.; DE PABLO, J. (ed.) Residus i medi ambient. Jornades de Química Analítica i Química Orgànica. UPC. Barcelona. p. 101-112.

PEIRÓ, J.L. (1993) Estudio "in vitro" del uso de fangos de depuradora en la restauración de canteras calcáreas: contaminación por elementos potencialmente tóxicos. Treball final de carrera. Escola Superior d'Agricultura de Barcelona.

PRATT, P.F.; DAVIS, S.; SHARPLESS, R.G.; PUGH, W.J.; BISHP, S.E. (1976) Nitrate contents of sudangrass and barley forages grown on plots treated with animal manures. *Agron. Jour.*, 68: 311-314.

PUJOLÀ, M.; BALANYÀ, T.; CLOTET, M.T. (2001). Utilización de lodos de depuradoras urbanas en la restauración de terrenos degradados: metales pesados. *Proceedings 2º Congreso Iberoamericano de Física y Química Ambiental*. Varadero, 5-9/11/01. Cuba. (en premsa).

REAL DECRETO 1310/1990 de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. BOE nº 265 de 5/11/1990.

SOPPER, W. (1993). *Municipal sludge use in land reclamation*. Lewis Publishers, Boca Raton, EUA.

SORT, X.; ALCANIZ, J.M. (1996) Contribution of sewage sludge to erosion control in the rehabilitation of limestone quarries. *Land degradation and development*, 7:69-76.

WHITE, C.S.; LOFTIN, S.R.; AGUILAR, R. (1997). Application of biosolids to degraded semiarid rangeland: nine-year responses. *J. Environm. Qual.*, 26:1663-1671.