

AVALUACIÓ DE LA CAPACITAT DE SEGREST DE CARBONI D'UN SÒL RESTAURAT AMB FANGS DE DEPURADORA: PAPER DE LES PROPIETATS FÍSQUES DEL SÒL

Resum de la memòria del projecte de final de carrera presentada per:
Idoia Perera Bach

Dirigida per: Josep Maria Alcañiz Baldellou i Gerardo Ojeda Castro
*Llicenciatura de Ciències Ambientals, Universitat Autònoma de Barcelona
Bellaterra, 2010*

Resum

S'ha estudiat el grau de protecció física del carboni dins d'agregats de diferents mides en un sòl d'una pedrera restaurada fa 17 anys amb terres adobades amb fangs de depuradora, i s'ha interpretat el seu paper en el context del segrest de carboni en el sòl. La metodologia aplicada es basa en la d'humitejament ràpid dels agregats del sòl per immersió en aigua (Le Bissonnais, 1996), que simula l'estabilitat d'un sòl sec que es veu sotmès a processos tals com la inundació local o saturació ràpida. També s'ha determinat la quantitat de carboni oxidable present en els agregats del sòl amb el mètode de Nelson i Sommers (1982). Els resultats han mostrat que l'adobat amb fangs de depuradora contribueix a augmentar el contingut de carboni orgànic en els agregats del sòl i n'estimula el segrest a mitjà termini (unes 10 tones ha⁻¹ en 17 anys), aportant estabilitat al sòl i protegint físicament el carboni orgànic dins dels agregats de mida major (5-2 mm). A més s'ha constatat que per determinar l'estabilitat del carboni segrestat en el sòl cal conèixer com es distribueix entre les diferents mides d'agregats. Finalment, l'augment del segrest de carboni en el sòl propiciat per l'aplicació dels fangs de depuradora li dona més capacitat per fixar CO₂ atmosfèric.

Paraules clau: carboni orgànic del sòl, segrest de carboni, protecció física, agregats del sòl, fangs de depuradora, rehabilitació de sòls.

Resumen

Se ha estudiado el grado de protección física del carbono dentro de agregados de diferentes tamaños en un suelo de una cantera restaurada hace 17 años con tierras abonadas con lodos de depuradora, i se ha interpretado su papel en el contexto del secuestro de carbono en el suelo. La metodología aplicada se basa en la de humedecimiento rápido de los agregados del suelo por inmersión en agua (Le Bissonnais, 1996), que simula la estabilidad de un suelo seco sometido a procesos como la inundación local o la saturación rápida. También se ha determinado la cantidad de carbono oxidable presente en los agregados del suelo con el método de Nelson i Sommers (1982). Los resultados han mostrado que la aportación de lodos de depuradora contribuye a aumentar el contenido de carbono orgánico en los agregados del suelo y estimula su secuestro a medio plazo (unas 10 toneladas ha⁻¹ en 17 años), dando estabilidad al suelo y protegiendo físicamente el carbono orgánico dentro de los agregados de mayor tamaño (5-2 mm). Además, se ha constatado que para determinar la estabilidad del carbono secuestrado en el suelo es necesario conocer cómo se distribuye entre los diferentes tamaños de agregados. Finalmente, el aumento del secuestro de carbono en el suelo propiciado por la aplicación de los lodos de depuradora le confiere más capacidad para fijar CO₂ atmosférico.

Palabras clave: carbono orgánico del suelo, secuestro de carbono, protección física, agregados del suelo, lodos de depuradora, rehabilitación de suelos.

Abstract

The degree of physical protection of the carbon inside aggregates of different sizes in a soil amended with sewage sludge from a restored quarry 17 years ago has been studied, and the role in the context of soil carbon sequestration has been interpreted. The applied methodology bases on fast wetting by immersion of soil aggregates in water (Le Bissonnais, 1996) that simulates the stability of a dry soil submitted to processes as flooding or fast saturation. Also, the quantity of oxidable carbon present in soil aggregates has been determined with Nelson and Sommers method (1982). The results have showed that the sludge amendment contributes to increase the content of organic carbon in soil aggregates and stimulates his medium-term sequestration (approximately 10

tons ha⁻¹ in 17 years), contributing to the soil stability and to the physical protection of the organic carbon inside the aggregates of bigger size (5-2 mm). In addition, in order to determine the stability of the sequestered carbon in the soil, it is necessary to know how it is distributed between the aggregates of different sizes. Finally, the increase of organic carbon sequestered in the soil propitiated by the application of the sewage sludge awards more aptitude to fix atmospheric CO₂.

Keywords: soil organic carbon, carbon sequestration, physically protection, soil aggregates, sewage sludge, soil rehabilitation.

1. FONAMENTS TEÒRICS

1.1. El paper dels fangs de depuradora en el procés de restauració de les activitats extractives

La dinàmica econòmica de Catalunya durant els darrers anys ha propiciat el desenvolupament d'un gran nombre d'activitats extractives. Aquestes produeixen diferents impactes sobre el medi, i en especial sobre el sòl, però gràcies al creixent interès pel manteniment de les característiques naturals del medi ambient, les accions de restauració estan adquirint cada vegada un paper més important (Alcañiz *et al.*, 2008). Cal afegir a més que el sòl constitueix un recurs natural considerat pràcticament no renovable a l'escala temporal humana (Porta *et al.*, 1985 -citat per Ortiz, 1998-), d'aquí la necessitat que siguin restaurats.

Aquest projecte s'inclou dins la temàtica de la restauració del sòl mitjançant l'addició d'una esmena orgànica, en aquest cas els fangs de depuradora. Aquests són un tipus de residu que s'obté de la depuració de les aigües residuals urbanes i està comprovat que constitueixen una font de matèria orgànica (MO), rica en micro i macro nutrients, la qual cosa estimula l'activitat biològica del sòl (Metzger i Yaron, 1986), provocant millores, no només en les propietats biològiques del sòl, sinó també en les físiques, ja que en disminueix el risc d'erosió (estimulant l'agregació del sòl) i n'augmenta l'estabilitat estructural (Metzger i Yaron, 1986; Sollins *et al.*, 1996; Albiach *et al.*, 2001; Ojeda *et al.*, 2008; Alcañiz *et al.*, 2008). Amb tot, cal tenir en compte que poden ocasionar efectes negatius sobre el medi ambient si no hi ha un control dels seus paràmetres químics i si la seva aplicació no es du a terme d'una forma adequada.

1.2. Mecanismes d'estabilització del carboni al sòl: protecció física

La capacitat dels sòls per acumular i estabilitzar carboni (C) orgànic ha rebut en els últims anys una atenció especial, principalment per avaluar en quin grau l'increment del CO₂ atmosfèric podria ser compensat per polítiques com la reforestació d'àrees degradades (Rovira i Vallejo, 2003), o l'adobat del sòl amb residus orgànics.

El terme "estabilitat" de la MO s'usa generalment com a indicatiu de protecció o resistència a la mineralització, mitjançant mecanismes que contribueixen a prolongar els seus temps de renovació al sòl. De tots els processos d'estabilització del C orgànic en el sòl, la protecció física o inaccessibilitat espacial dins els agregats és un dels més importants (Rovira i Vallejo, 2003). El C orgànic pot quedar retingut mitjançant la seva incorporació durant la formació d'agregats (Six *et al.*, 1998; Puget *et al.*, 2000) i gràcies a l'acció de la biota del sòl.

El concepte de jerarquia d'agregats proposat per Tisdall i Oades (1982) és probablement l'avançament teòric més significatiu en el coneixement de les interaccions entre agregats i la matèria orgànica del sòl (MOS) (Lützow *et al.*, 2006). En aquest concepte

es postula que els diferents agents lligands actuen en diferents nivells o estatges jeràrquics d'agregació. Les partícules primàries fines lliures (<20 µm) s'agrupen en els microagregats (20-250 µm) que, a la vegada, s'uneixen per formar macroagregats (> 250 µm).

Pel que fa als factors biòtics que contribueixen a l'agregació, es classifiquen en (Lützow *et al.*, 2006):

1) La fauna del sòl: els cucs de terra i els tèrmits ingereixen sòl i l'excreten en forma de turrícules petites i/o boles fecals, i, juntament amb tèrmits, formigues, aranyes i larves d'escarabats formen bioporus (Oades, 1993).

2) Els microorganismes del sòl: la població microbiana desenvolupada en els substrats orgànics és responsable fonamentalment de la formació i estabilització dels agregats (Metzger i Yaron, 1986) través de la producció i consum de components orgànics làbils (Tisdall i Oades, 1982; Oades, 1984).

3) Les arrels: quan aquestes penetren al sòl, indueixen la formació de microagregats (Dorioz *et al.*, 1993), a part d'alliberar material orgànic descomponible a la rizosfera (Tisdall i Oades, 1982; Oades, 1993; Tisdall, 1996). També poden embolcallar les partícules edàfiques per formar i estabilitzar macroagregats (Tisdall i Oades, 1982).

També els agents lligands inorgànics (principalment òxids de Fe i Al i sals de calci) (Six *et al.*, 2002) i les variables ambientals (cicles de congelació-descongelació, cicles d'assecat-humitejament i foc) (Tisdall, 1996; Six *et al.*, 2004) tenen influència en la protecció física del carboni orgànic del sòl (COS).

1.3. Mecanismes de trencament d'agregats per acció de l'aigua

El trencament dels agregats per acció de l'aigua es produeix a través de diversos mecanismes físics i fisicoquímics. Tot i que actuen en diferents escales en el sòl, (Tisdall i Oades, 1982) se'n poden descriure quatre de principals (Le Bissonnais, 1996):

1) L'*slaking*: quan els agregats secs són immersos en aigua o són humitejats ràpidament, part de l'aire dels porus no té temps per sortir i es queda "atrapat" entre els agregats humits subjecte a pressió hidrostàtica. En l'esforç per sortir, aquest aire comprimit trenca els agregats, donant lloc al fenomen anomenat *slaking* (Emerson, 1967).

2) L'expansió diferencial del sòl durant l'humitejament i la seva contracció durant l'assecatge, especialment en sòls argilosos, dona lloc a un *microcracking* ("microesquerdes") dels agregats (Le Bissonnais, 1996).

3) L'acció directa de les gotes de pluja: aquest fenomen actua mitjançant el mecanisme anomenat *splash* (Le Bissonnais, 1996), és a dir, trenca els agregats, els projecta i els desplaça (Farres, 1987).

4) La dispersió físico-química: es basa en la reducció de les forces atractives entre les partícules col·loïdals del sòl mentre s'humiteja el sòl (Emerson, 1967). Els cations polivalents causen floculació, mentre que els monovalents causen dispersió (Edwards i Bremner, 1967 - citats per Six *et al.*, 2004-).

2. OBJECTIUS

L'objectiu general d'aquest estudi és:

- Avaluar la quantitat i grau de protecció física del carboni segrestat en un sòl restaurat amb fangs de depuradora i interpretar el seu paper en el context de les mesures de mitigació contra el canvi climàtic.

Per tal d'assolir amb més exactitud aquest objectiu general, es desglossa en els següents objectius específics:

- Calcular la quantitat de carboni segrestada en un sòl restaurat amb fangs de depuradora a mitjà termini (17 anys).
- Determinar el grau de protecció física del carboni segrestat en diferents mides d'agregats.
- Avaluar si la dosi inicial de fang aplicat ha influït en la quantitat de carboni segrestada i en el seu grau de protecció física.
- Valorar el paper d'un sòl restaurat amb fangs de depuradora en el context de les mesures de lluita contra el canvi climàtic.

3. ZONA D'ESTUDI I PROCÉS DE RESTAURACIÓ

Aquest projecte s'ha realitzat a partir de les mostres de sòl obtingudes d'una zona de talussos restaurats l'any 1992 situats en una pedrera de calcàries de l'empresa RUBAU S.A. localitzada a la part nord de Girona (Sort, 1997).

El desembre del 1992 s'hi va dur a terme un estudi inicial per determinar, entre d'altres, les propietats estructurals d'un sòl restaurat amb fangs de depuradora (Sort, 1997), i és en base al disseny experimental d'aquest estudi que s'ha desenvolupat el present projecte. En un dels talussos de la part de la pedrera on es va realitzar l'estudi, es van preparar diverses parcel·les experimentals consistents en una capa de 40 cm de sòl adobat amb dues dosis diferents de fang de l'EDAR de Girona (Sort, 1997): 7,5% de fang sobre terra fina seca (< 2 mm) ($\approx 200 \text{ Mg ha}^{-1}$), 2) i 15% ($\approx 400 \text{ Mg ha}^{-1}$), basant-se en el fet que la dosi màxima de fangs aplicable per a un ús agrícola en el sòl utilitzat correspon al 7,5% (Sort, 1997). El mostreig de sòl es va realitzar el novembre de 2009, agafant amb una sonda la capa de 0-20 cm, en quatre parcel·les de 20 x 2,5 m per cada tractament, és a dir, control (C), 200 MG ha⁻¹ (7B) i 400 MG ha⁻¹ (15B) de fang en el sòl.

4. METODOLOGIA

4.1. Humitejament ràpid d'agregats per immersió en aigua

La metodologia aplicada en aquest projecte es basa en la de Le Bissonnais, de mesura de l'estabilitat dels agregats. El tractament d'humitejament ràpid per immersió en aigua avalua el comportament (l'estabilitat) d'un sòl sec sotmès a processos tals com la inundació, la irrigació i les tempestes. Per dur-lo a terme s'ha utilitzat l'equip Eijkelkamp[®] (Figura 1) seguint les recomanacions del fabricant, i posteriorment s'ha mesurat el pH i la conductivitat elèctrica de l'aigua d'immersió, per observar-ne possibles canvis.

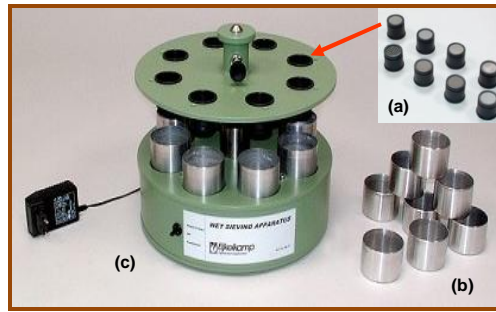


Figura 1. *Aparell de tamisat en humit Eijkelkamp i els seus diferents accessoris: (a) garbells de 2, 1, 0.5, 0.250, 0.125, 0.053 mm; (b) vasos d'immersió; (c) instrument i accessoris en posició per posar-se en marxa. Font: Ojeda et al. (2010).*

4.1.1. Distribució de mides dels agregats

Un cop dut a terme el tractament d'humitejament ràpid s'ha obtingut el percentatge d'agregats estables en aigua entre diferents rangs de mida d'agregats, restant els pesos nets de cada mida de garbell de la quantitat inicial de sòl sec. Mides de garbell: >2, 2-1, 1-0.5, 0.5-0.250, 0.250-0.125 i 0.125-0.053 mm. El pes de la fracció <0.053 mm s'ha determinat per la diferència entre la massa inicial i la suma de les altres 6 fraccions (> 0.053).

Aleshores, l'estabilitat dels agregats per cada mecanisme de trencament és expressada usant el diàmetre mitjà ponderat (DMP), que pot ser calculat de la següent manera:

$$\text{DMP} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i}{100}, \text{ on:}$$

\bar{x} = diàmetre intermedi de malla entre dos garbells

w = pes en percentatge de sòl contingut entre els dos garbells

D'aquesta fórmula es dedueix que la ponderació (l'acció de multiplicar el % d'agregats per la mida mitjana dels garbells) implica que les fraccions més grans es multipliquin per valors majors a 1, i això fa que quan el sòl reté més macroagregats estables en aigua, el DMP sigui major. És per això que es proposa el DMP com un índex d'estabilitat estructural del sòl.

4.2. Determinació del carboni oxidable

Amb aquesta metodologia (Nelson i Sommers, 1982) es determina la quantitat de C oxidable de la mostra. Es basa, per tant, en l'oxidació de la MOS per l'ió Cr^{6+} en medi àcid (sulfúric i fosfòric) i en la valoració de l'excés de crom no consumit en l'oxidació per una sal de ferro (sal de Mhor). En aquest projecte s'ha determinat el C oxidable de la mostra original i de cada fracció d'agregats de les mostres sotmeses a humitejament ràpid.

Per obtenir el % de carboni orgànic, s'ha utilitzat la següent expressió:

$$\text{Corg (\%)} = \frac{1,2}{n} * \frac{(B - U)}{B}, \text{ on:}$$

n = pes del sòl en grams

B = ml de sal de Mhor consumits pel blanc

U = ml consumits per la mostra

4.3. Anàlisi estadística

Pel tractament estadístic dels resultats s'ha utilitat el paquet estadístic StatView ® versió 5.0.1, SAS Institute Inc, 1998. A més de l'estadística descriptiva, s'ha realitzat l'anàlisi de la variància de les dades mitjançant ANOVA de dos factors. Quan s'han trobat efectes significatius, s'ha utilitzat el test de Tukey-Kramer per la comparació de promitjos.

5. RESULTATS I DISCUSSIÓ

5.1. Influència a mitjà termini del fang de depuradora sobre el contingut de carboni orgànic del sòl

L'aplicació de fangs de depuradora (amb les dues dosis estudiades 200 Mg ha⁻¹ i 400 Mg ha⁻¹) al sòl de la pedrera estudiada ha fet augmentar el seu nivell de COS (Figura 2) 17 anys després de l'addició. L'explicació més probable d'aquest resultat és que els nutrients i la MO aportada pels fangs de depuradora han estimulat en tal grau el desenvolupament vegetal i l'activitat microbiana i faunística del sòl (Golchin *et al.*, 1994, 1995; Ortiz, 1998; Lützwow *et al.*, 2006) que s'ha induït la formació dels agregats mitjançant la producció d'agents lligands derivats dels microorganismes (Golchin *et al.*, 1994, 1995) i plantes.

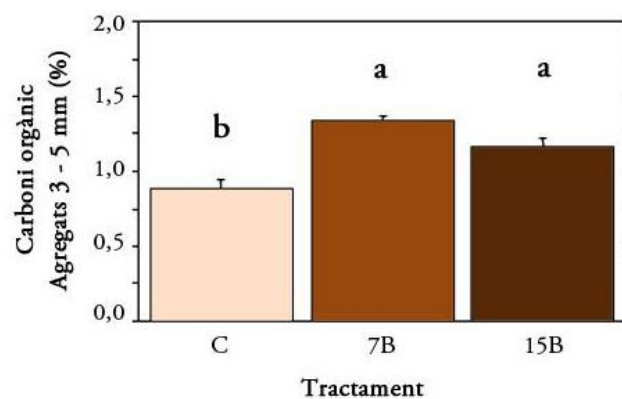


Figura 2. Valors mitjans de contingut de carboni orgànic (%) en el sòl (agregats entre 3 i 5 mm), tractat amb 200 Mg ha⁻¹ (7B) i 400 Mg ha⁻¹ (15B) de fang, 17 anys després de la seva incorporació al sòl.

Lletres diferents indiquen diferències significatives a $p < 0.05$.

Observant el COS segons la distribució de mides dels agregats i havent realitzat una anàlisi de la variància entre el diàmetre dels agregats i el tipus de tractament, els resultats mostren que el contingut de COS en els agregats estables en aigua d'entre 5 i 2 mm és major en el cas del sòl esmenat amb la dosi de 400 Mg ha⁻¹ de fang (15B), respecte els altres tipus de tractament i altres mides d'agregats. Altres autors han presentat resultats similars,

com per exemple, Sort (1997), amb mostres del mateix sòl 0.5, 1 i 2 anys després de l'aplicació de fang, i Puget *et al.* (2000). Segons la teoria de la jerarquia d'agregats de Tisdall i Oades (1982) això es podria explicar perquè els macroagregats es van anar formant a través de la unió de microagregats mitjançant agents lligands orgànics, i aleshores la quantitat de COS total dels macroagregats resulta major, ja que contenen el C dels agregats de mida menor i el C dels agents lligands orgànics persistents, temporals i transitoris. Aquest efecte es més notori en el tractament de major dosi de fang, ja que és el que en conté més. Així, la MO procedent dels fangs de depuradora contribueix directament i indirectament a la constitució de macroagregats.

5.2. Estabilitat estructural del sòl i protecció física del carboni orgànic

El diàmetre mitjà ponderat (DMP) dels agregats estables en aigua, després de ser sotmesos a humitejament ràpid, ha resultat ser major en el tractament 15B (400 Mg ha⁻¹) respecte els altres dos (Figura 3(a)). Això es deu principalment al fet que, durant els processos de ruptura dels macroagregats inicials ocasionats per l'humitejament ràpid s'ha produït una major proporció de macroagregats (5 – 2 mm) i una menor de microagregats (0.250 – 0.053 mm) a les mostres 15B (Figura 3(b)). Per tant significa que l'estabilitat estructural del sòl esmenat amb 400 Mg ha⁻¹ és major a la del sòl esmenat amb 200 Mg ha⁻¹ (7B) i a la del tractament control, sota condicions d'inundació o pluja torrencial. Aquests resultats són comparables als de molts altres autors, com Albiach *et al.* (2001), Ojeda (2005) i Ojeda *et al.* (2008), i suggereixen que és necessari tenir una idea de la distribució del COS en els agregats per establir una relació entre el COS i l'estabilitat del sòl, durant episodis d'inundació o pluja torrencial, ja que, si el COS es trobés associat, per exemple, amb els agregats <0.053 mm, no augmentaria la resistència del sòl a la desagregació, cas contrari al present, on el tractament 15B incrementa la quantitat de macroagregats estables en aigua (de 2 - 5 mm).

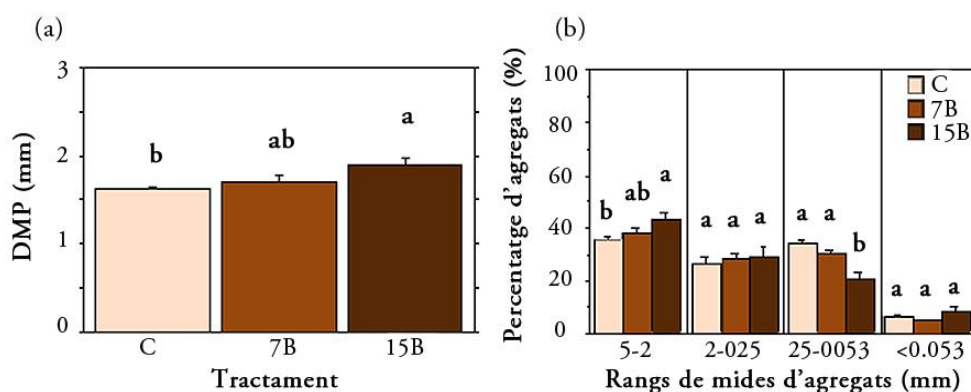


Figura 3. Valors mitjans de: (a) diàmetre mitjà ponderat (DMP) dels diferents tractaments (C = control; 7B = 200 Mg ha⁻¹; 15B = 400 Mg ha⁻¹), i (b) percentatge d'agregats en els diferents rangs de mides. Lletres diferents indiquen diferències significatives a $p < 0.05$, entre els diferents tractaments i en cada rang de mides d'agregats.

Aquest augment en l'estabilitat es deu, segurament, a la reducció (directa o indirecta) de l'*slaking* causada per la major quantitat de MO present (Ojeda *et al.*, 2008). Aquesta major estabilitat estructural també dona als agregats del tractament 15B una reducció de l'*splash*

(almenys en el primer any d'agregació) (Sort, 1997) i del *microcracking* (Ojeda *et al.*, 2008), així com un menor risc d'erosió (Sollins *et al.*, 1996; Ojeda *et al.*, 2008; Alcañiz *et al.*, 2008).

La protecció física del C dins dels agregats del sòl és un dels mecanismes d'estabilització de COS més importants en el sòl (Rovira i Vallejo, 2003). Segons els resultats, majoritàriament el COS està protegit en les fraccions d'agregats de mida gran, influenciant l'accessibilitat del substrat per als microorganismes i la fauna, i també les taxes de difusió de l'oxigen i els productes procedents de les reaccions de síntesi extracel·lulars, tot i que en menor grau que en els microagregats (Golchin *et al.*, 1994; Sollins *et al.*, 1996). A més, la hidrofobicitat aportada per la MO del fang redueix la superfície humitejable, fet que dona lloc a taxes de descomposició més baixes, igual com l'absència d'aigua restringeix directament les condicions de vida dels microorganismes (Bachmann *et al.*, 2008). Així, segons Lützow *et al.* (2006) es podria afirmar que aquest és un altre argument per dir que l'agregació del sòl facilitada per l'aplicació de fangs de depuradora en un sòl redueix l'accessibilitat de la MO (al menys de part de la MO) als microorganismes.

5.3. Segrest de carboni i canvi climàtic

Tenint en compte que la quantitat de MO en els sòls representa un dels reservoris més grans de C orgànic a escala global (Schlesinger, 1995), qualsevol canvi en la mida i el temps de renovació dels compartiments de C edàfic pot alterar potencialment la concentració de CO₂ atmosfèric (Lützow *et al.*, 2006). En funció de les característiques pròpies o de l'ús que se li dona, el sòl juga un paper actiu o passiu en l'emissió i captura dels gasos amb efecte hivernacle, com el CO₂. Així, el sòl captura CO₂ transformant-lo en carbonats, o per la fixació fotosintètica del carboni atmosfèric en la biomassa vegetal que posteriorment s'incorpora al sòl, i allibera altre cop el carboni en forma de CO₂ mitjançant els processos de descomposició (Alcañiz *et al.*, 2005).

Tenint en compte la discussió dels apartats anteriors, l'augment en la producció de biomassa que propicien els fangs de depuradora (Sollins *et al.*, 1996; Ojeda *et al.*, 2008; Alcañiz *et al.*, 2008), i l'increment en la formació d'agregats que s'ha corroborat amb els resultats presentats, són aspectes que afavoreixen que el segrest de C en el sòl augmenti.

En el present projecte s'ha pogut determinar quantitativament que l'augment de segrest de carboni en les parcel·les esmenades amb fangs de depuradora respecte els controls, 17 anys després de la intervenció, ha estat del 0,4 %. A partir d'això, s'ha pogut calcular que l'augment a mitjà termini de la capacitat de segrest de carboni en aquest sòl atribuïble al fang de depuradora és d'aproximadament 10 tones ha⁻¹. És a dir, que l'aplicació d'aquesta esmena orgànica ha afavorit que aquest sòl sigui capaç de retenir, potencialment, unes 0,6 tones de CO₂ anuals més que el sòl control.

Aquesta seria una primera base per continuar estudiant i aprofundint en la capacitat dels sòls restaurats amb esmenes orgàniques d'acumular i d'estabilitzar COS per avaluar en quin grau l'increment del CO₂ atmosfèric podria ser compensat per polítiques com la reforestació d'àrees degradades, o pel canvi d'algunes pràctiques d'agricultura comunes o de la gestió del sòl (Rovira i Vallejo, 2003).

5.4. Efectes de la immersió dels agregats del sòl sobre el pH i la conductivitat elèctrica de l'aigua

El canvi en el pH de l'aigua d'immersió s'ha donat sempre en forma d'augment del mateix. Això és degut al fet que els agregats, al trencar-se, alliberen els cations retinguts provinents del propi sòl (cal recordar que aquest sòl és calcari, és a dir, de pH bàsic) i del fang aplicat. Els resultats fan pensar, però, que els cations provinents del fang són menors que els provinents del propi sòl, ja que les diferències entre tractaments són molt petites.

En general, els majors increments en el pH de l'aigua d'immersió han estat deguts al contacte amb els microagregats estables en aigua (<0.053 mm), en comparació als agregats majors. Aquest resultat es podria explicar amb dos fets:

1. Aquests últims, al ser més estables, com s'ha comentat en l'anàlisi de l'estabilitat dels agregats, no alliberen tants cations, produint així un menor augment en el pH de l'aigua d'immersió. És a dir, que a major trencament dels agregats, major és la quantitat de cations que són alliberats.

2. La major quantitat de MO dels macroagregats els confereix una major capacitat tamponant. És a dir, que la major presència de MO atenua els canvis de pH captant els cations en la seva superfície.

Aquests dos efectes segurament es complementen conferint als agregats menors més capacitat de variar el pH de l'aigua d'immersió.

En el cas de la CE, també augmenta en l'aigua d'immersió amb els agregats <0.053 mm. Aquestes dades corroboren que aquests agregats són els que alliberen més ions. Pel que fa a la dosi de fang aplicada, però, no s'observa cap diferència entre tractaments, per això es pot afirmar que els ions alliberats no provenen del fang, sinó del sòl, almenys en gran part.

Finalment, es pot concloure que un sòl més estable afavorirà que el pH i la CE de la dissolució del sòl es mantinguin més o menys constants, ja que a mesura que augmenta el percentatge i la mida dels agregats estables en aigua no incrementa tant el pH ni la CE de l'aigua d'immersió. Així, un sòl esmenat amb fangs de depuradora produirà menys canvis d'aquests paràmetres en l'aigua d'escorrentia o de pluja que un amb menor estabilitat.

6. CONCLUSIONS

- L'aplicació de fangs de depuradora és una bona tècnica per la restauració del sòl de les zones afectades per activitats extractives, ja que a mitjà termini (17 anys) contribueix a augmentar el contingut de carboni orgànic en els agregats del sòl, proporcionant unes bones condicions per al creixement vegetal i pel desenvolupament de tot l'ecosistema edàfic.
- Una aportació de fangs de depuradora al sòl redueix les pèrdues de carboni orgànic per erosió, ja que els macroagregats formats (entre 5 i 2 mm) són més resistents i acumulen més carboni. És a dir, es formen més agregats i de mides més grans, i es redueix el fenomen de l'*slaking*, disminuint, a la vegada, la pèrdua del carboni orgànic que es troba protegit físicament, el que confereix més estabilitat a mitjà termini.
- L'aplicació de fangs de depuradora al sòl redueix l'accessibilitat de la matèria orgànica als microorganismes ja que queda protegit físicament.

- Per establir la relació entre el carboni orgànic del sòl i la seva estabilitat és necessari conèixer com es distribueix aquest carboni entre els agregats del sòl.
- La matèria orgànica aportada pels fangs de depuradora augmenta la capacitat tamponant del sòl com es dedueix de les variacions de pH i de conductivitat elèctrica de la dissolució en comparació al control, i per tant, les seves fluctuacions seran menors.
- L'augment en la producció de biomassa i l'increment en la formació d'agregats que propicien indirectament els fangs de depuradora afavoreixen que el segrest de C en el sòl augmenti a mitjà termini, fet destacable com a mesura que pot contribuir a fixar més CO₂ atmosfèric.

7. BIBLIOGRAFIA DE REFERÈNCIA

Albiach, R., Canet, R., Pomares, F., Ingelmo, F., 2001. *Organic matter components and aggregate stability after the application of different amendments to a horticultural soil*. *Bioresource Technology*, 76, 125-129.

Alcañiz, J. M., Ortiz, O., Carabassa, V. (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREAM), 2008. *Utilització de fangs de depuradora en restauració. Manual d'aplicació en activitats extractives i terrenys marginals*. Agència Catalana de l'Aigua (ACA), Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge (DMAH).

Bachmann, J., Guggenberger, G., Baumgartl, T., Ellerbrock, R.H., Urbanek, E., Goebel, M.O., Kaiser, K., Horn, R., Fischer, W.R., 2008. *Physical carbon-sequestration mechanisms under special consideration of soil wettability*. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171, 14-26.

Dorioz, J.M., Robert, M., Chenu, C., 1993. *The role of roots, fungi and bacteria on clay particle organization. An experimental approach*. *Geoderma*, 56, 179-194.

Emerson, W.W., 1967. *A classification of soil aggregates based on their coherence in water*. *Australian Journal of Soil Research*, 5, 47-57.

Farres, P.J., 1987. *The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability*. *Catena*, 14, 119-130.

Golchin, A., Oades, J. M., Skjemstad, J. O., Clarke, P., 1994. *Soil structure and carbon cycling*. *Australian Journal Soil Resource*, 32, 1043-1068.

Golchin, A., Oades, J. M., Skjemstad, J. O., Clarke, P., 1995. *Structural and dynamic properties of soil organic matter as reflected ¹³C natural abundance, pyrolysis mass spectrometry and solid-state ¹³C NMR spectroscopy in density fractions of an Oxisol under forest and pasture*. *Australian Journal Soil Resource*, 33, 59-76.

Le Bissonnais, Y., 1996. *Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology*. *European Journal of Soil Science*, 47, 425-437.

Lützow, M., Kögel-Knaber, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., Flessa, H., 2006. *Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions - a review*. *European Journal of Soil Science*, 57, 426-445.

Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1982. *Total carbon, organic carbon and organic matter*. In: Page, A.L., Miller, H., Keeney, D.R. (Eds.), *Method of Soil Analysis Part 2: Chemical and Microbiological Properties No. 9. Gronomy Series*. *Soil Science Society of America*, pp. 570-571.

Oades, J. M., 1993. *The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure*. *Geoderma*, 56, 377-400.

- Ojeda, G. Tesi doctoral: *Aplicaciones en superficie de lodos de depuradora y sus repercusiones sobre la erosión y las propiedades físicas del suelo*, 2005. CREAM (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals). Departament de Biologia Animal, Vegetal i Ecologia, Unitat d'Ecologia, Facultat de Ciències, Universitat Autònoma de Barcelona. Bellaterra.
- Ojeda, G., Alcañiz, J. M., Le Bissonnais, Y., 2008. *Differences in aggregate stability due to various sewage sludge treatments on a Mediterranean calcareous soil*. *Science Direct*, 125, 48-56.
- Ojeda, G., Perera, I., Alcañiz, J.M. 2010. *La medida de la estabilidad estructural del suelo y su relación con el secuestro de carbono*. (Pòster resum).
- Ortiz, O. Tesi doctoral: *Activitat biològica i revegetació en sòls de pedreres de calcària restaurats amb fangs de depuradora*, 1998. Departament de Biologia Animal, Vegetal i Ecologia, Unitat d'Ecologia, Facultat de Ciències, Universitat Autònoma de Barcelona. Bellaterra.
- Puget, P., Chenu, C., Balesdent, J., 2000. *Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates*. *European Journal of Soil Science*, 51, 595-605.
- Rovira, P., Vallejo, R., 2003. *Physical protection and biochemical quality of organic matter in mediterranean calcareous forest soils: a density fractionation approach*. *Soil Biology and Biochemistry*, 35, 245-261.
- Schlesinger, W. H., 1995. *An overview of the C cycle*. A: *Soils and Global Change*. Eds. Lal, R., Kimble, J., Levin, J., Stewart, B.A. pp. 9-26. *Lewis Publishers*, Boca Raton, FL.
- Six, J., Elliott, K., Paustian, K., Doran, J. W., 1998. *Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils*. *Soil Science of American Journal*, 62, 1367-1377.
- Six, J., Conant, R. T. Paul, Paustian, K., 2002. *Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation soils*. *Plant and soil*, 241, 155-176.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Deneff, K., 2004. *A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics*. *Science Direct*, 79, 7-31.
- Sollins, P., Homann, P., Caldwell, B. A., 1996. *Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls*. *Geoderma* 74, 65-105.
- Sort, X. Tesi doctoral: *Propietats estructurals d'un sòl restaurat amb fangs de depuradora*, 1997. Departament de Biologia Animal, Vegetal i Ecologia, Unitat d'Ecologia, Facultat de Ciències, Universitat Autònoma de Barcelona. Bellaterra.
- Tisdall, J. M., Oades, J. M., 1982. *Organic matter and water-stable aggregates in soils*. *Journal of Soil Science*, 33, 141-163.
- Tisdall, J. M., 1996. *Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter*. A: *Structure and organic matter storage in Agricultural Soils*. *Advances in Soil Science*. Eds. Carter, M.R., Stewart, B.A. pp. 57-66. *CRC Press, Lewis Publishers*, Boca Raton, Florida.