

DESENVOLUPAMENT D'UN SIMULADOR NUMÈRIC DEL PROCÉS DE COMPOSTATGE, I APLICACIÓ A L'OPTIMITZACIÓ DEL COMPOSTATGE DE LLOTS I MESCLES AMB ALTRES RESIDUS ORGÀNICS

*Antoni Sánchez, Teresa Gea, Juan Baeza,
Luz Ruggieri i Belén Puyuelo*

Departament d'Enginyeria Quími ca. Universitat Autònoma de Barcelona
(antoni.sanchez@uab.cat)

*Jorge Domínguez, Domingo Pérez, David Cereijo
i Salustiano Mato*

Departament d'Ecologia i Biologia Animal. Universitat de Vigo

Francina Solé i Josep Illa

Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl.
Universitat de Lleida.

*Xavier Flotats, Francesc Prenafeta, Felicitas Vázquez
i Albert Magrí*

GIRO-Centre Tecnològic

Agustí Pérez, Antonio Huerta, Xavier Roca i Albert Oliver

Laboratori de Càlcul Numèric. Universitat Politècnica de Catalunya

RESUM

L'objectiu principal del present projecte és l'obtenció d'un simulador, basat en un model estructurat, que permeti optimitzar les condicions del procés de compostatge de llots de depuradora, així com predir-ne l'evolució. L'esmentat simulador i el model associat hauran de ser aplicables al compostatge d'altres residus orgànics com la fracció orgànica de residus municipals, els residus ramaders i, en general, les mescles de residus de composició coneguda (cocompostatge). L'esmentada optimització es considera en dos nivells: a) la millora de l'eficiència del procés per a l'obtenció d'un compost de qualitat estabilitzat i higienitzat; i b) la minimització dels impactes ambientals del procés, en especial les emissions a l'atmosfera d'amoniac i el consum energètic associat. Alhora, i per millorar el caràcter universal del model ja desenvolupat en les fases prèvies del projecte, es planteja l'estudi detallat de les interaccions microbianes que es produeixen durant el procés com una nova línia de treball.

Actualment, es troba disponible una primera versió simplificada del simulador, i s'estan realitzant els treballs corresponents per millorar-lo, perquè permeti la integració de fenòmens fisicoquímics i biològics.

1. INTRODUCCIÓ

1.1. El compostatge de fangs

HAUG (1993) defineix el procés de compostatge com la descomposició biològica aeròbica i l'estabilització dels substrats orgànics sota condicions que permetin el desenvolupament de temperatures termòfiles com a resultat de la calor produïda biològicament, per produir un producte acabat, estable i lliure de patògens i llavors, i que pot ser aplicat beneficiosament al sòl. Les temperatures termòfiles es consideren generalment per sobre de 45 °C. Els factors que intervenen en el compostatge són complexos i estan interrelacionats. Els més importants són la temperatura, l'aeració, el balanç de nutrients i la presència d'una població microbiana capaç de descompondre els residus. Tots aquests factors estan determinats per les condicions ambientals, pel tipus de residu i pel maneig del procés.

Un problema seriós i complex dels nostres temps és la disposició de grans quantitats de residus urbans, llots industrials i de depuradora o residus alimentaris o de l'agricultura, entre d'altres. El compostatge és un mitjà efectiu i segur de tractar la fracció biodegradable dels residus (DAS I KEENER, 1995), que redueix pes, volum, humitat, destrueix patògens i millora la qualitat del material abans de la seva aplicació. El producte obtingut és més estable, emmagatzemable, transportable i aprofitable en agricultura.

Els esforços d'I+D que s'estan desenvolupant a Espanya en el camp del compostatge es dirigeixen principalment cap al compostatge de residus urbans, agroalimentaris i ramaders, així com a l'aplicació del compost obtingut com a substrat en sòls. En canvi, la generació de fangs residuals constitueix, tant pel seu volum com per la seva composició, un dels principals problemes a què s'enfronten les diferents administracions i les empreses gestores d'aquest tipus de residus. La producció de fangs en estacions depuradores d'aigües residuals urbanes a Espanya s'ha estimat per a l'any 2005 en 1.300.000-1.500.000 tones (expressades en pes sec) (CEBRIÁN et al., 2001). A aquest fang se li ha d'afegir el fang d'origen industrial, la gestió del qual és encara més crítica per la seva procedència i la varietat de composició.

En els casos en els quals el contingut de matèria orgànica del fang és elevat, la seva aplicació directa al sòl per al seu aprofitament com a adob o esmena orgànica o la seva disposició en abocador controlat han estat les vies de gestió més comunament adoptades. Les noves directives o propostes de directives europees estan encaminades a controlar i restringir el tractament de residus biodegradables, l'aplicació directa de llots al sòl i la seva disposició en abocador (*Working Document on Sludge, 3rd Draft, 2000*; Directiva 99/31/CE, relativa a l'abocament de residus, 1999).

El compostatge de fangs comporta una sèrie de problemes, associats principalment al seu elevat contingut en aigua, fins a un 90% o més, i a la seva composició nutricional (CHOI et al., 2001; DAS et al., 2001). Una elevada humitat provoca la saturació de tots els espais buits del llot, i dificulta així la transferència d'oxigen al material a compostar, ja que els nutrients poden ser necessaris per evitar limitacions per falta de nitrogen, fòsfor i altres micronutrients (HAUG, 1993; LARSEN I McCARTNEY, 2000). Per tal de minimitzar aquests problemes, condicionar els fangs abans de ser sotmesos a compostatge és una etapa essencial per al procés.

El condicionament consisteix bàsicament en la mescla de fang amb altres materials per tal de millorar-ne les característiques tant estructurals com nutricionals. Els materials utilitzats per condicionar un fang poden ser considerats: I) condicionadors estructurals, que són materials orgànics o inorgànics que redueixen la densitat aparent del fang i incrementen els espais buits per permetre una millor aeració (entre els més utilitzats es troben serradures, palla, pellofa d'arròs, residus de jardineria, torba, etc.); II) condicionadors energètics, que incrementen la quantitat de material biodegradable a la mescla; en

aquest cas el més comú és utilitzar materials complementaris que cobreixin, a més, les deficiències nutricionals del llot. El compostatge conjunt de diferents residus amb l'objectiu de complementar les mancances de cada un d'ells es coneix com a *cocompostatge* (FANG et al., 1998; ZORPAS et al., 2003).

1.2. La modelització del procés de compostatge

Els objectius de la modelització són el desenvolupament d'eines matemàtiques que permetin la integració del coneixement sobre el fenomen considerat per orientar el disseny experimental, avaluar els resultats experimentals, provar hipòtesis, posar de manifest les relacions entre variables, predir l'evolució d'un sistema i, en definitiva, per dissenyar processos optimitzats i estratègies de gestió.

L'objectiu d'universalitat i de descriure el procés general amb un conjunt d'equacions diferencials, on cada subconjunt o cada equació individual descriu un subprocés determinat, explica l'evolució de la generació de models dinàmics, mecanístics i estructurats. Tots estan basats en els mateixos principis, i cada un se centra en una variable o paràmetre clau considerats moduladors del procés.

La modelització del procés de compostatge és més complexa que la dels tractaments d'aigües, aeròbic o anaeròbic, a causa de l'heterogeneïtat del medi sòlid. Els models descrits a la literatura se centren en l'aspecte físic o biològic del compostatge, encara que difícilment es troben models on s'integrin ambdós aspectes, que en el compostatge estan íntimament relacionats. En la part biològica es modela només hidròlisi, creixement i lisi dels microorganismes heteròtrofs aeròbics.

2. OBJECTIUS

2.1. Objectius del projecte

El treball presentat s'emmarca en un projecte global denominat SIMUCOM (SIMulació numèrica del COMpostatge) en el qual participen diferents grups de recerca i que ja porta tres anys de feina. A continuació es mostra el logotip del projecte:



Figura 1: Logotip del projecte SIMUCOM.

L'objectiu principal del present projecte és la continuació dels treballs ja iniciats prèviament, encaminats a l'obtenció d'un simulador basat en un model estructurat que permeti optimitzar les condicions del procés de compostatge de llots de depuradora, així com predir-ne l'evolució. L'esmentat simulador i el model associat hauran de ser aplicables al compostatge d'altres residus orgànics com a fracció orgànica de residus municipals, residus ramaders i, en general, mesclades de residus de composició coneguda (cocompostatge). L'esmentada optimització es considera a dos nivells: a) la millora de l'eficiència del procés, per a l'obtenció d'un compost de qualitat estabilitzat i higienitzat; i b) la minimització dels

impactes ambientals del procés, especialment les emissions a l'atmosfera d'amoníac i el consum energètic associat. Alhora, i per millorar el caràcter universal del model ja desenvolupat en les fases prèvies del projecte, es planteja l'estudi detallat de les interaccions microbianes que es produeixen durant el procés com una nova línia de treball.

El funcionament final del model desenvolupat (SIMUCOM) es presenta a la figura 2.

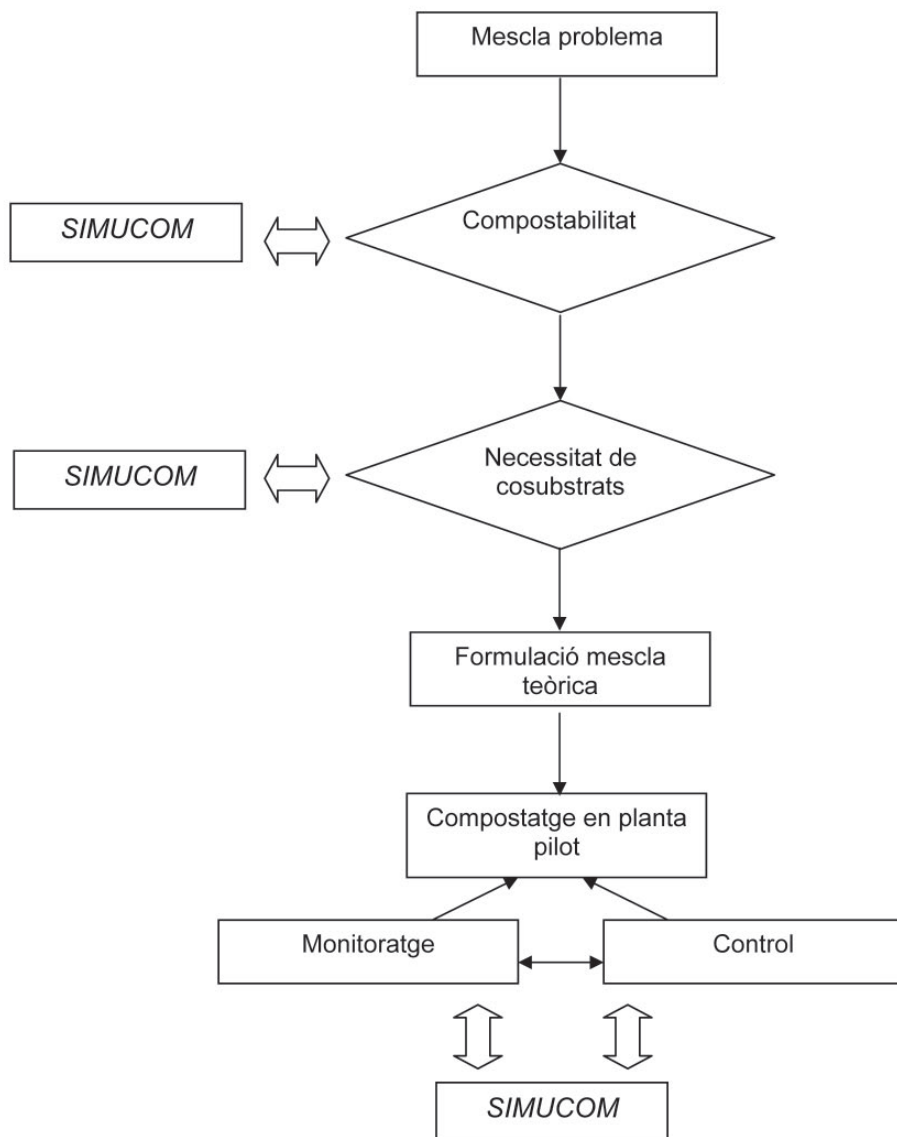


Figura 2: Objectiu final del projecte SIMUCOM.

2.2. Reptes actuals

Actualment ja es disposa d'una primera versió del model (model simplificat) que té en compte molts dels processos fisicoquímics i biològics implicats en el procés de compostatge. Tanmateix, s'està treballant en una versió millorada que té com a principals punts d'interès:

- Seguiment de poblacions microbianes implicades: mitjançant tècniques moleculars d'anàlisi d'ADN (basades en l'extracció i amplificació de l'ADN mitjançant la reacció de PCR usant iniciadors específics que permetin determinar la composició de les comunitats bacterianes i fúngiques) i tècniques de determinació de compostos bioindicadors. L'evolució de la biomassa dels grans grups filogenètics (fongs, bacteris i actinomicets) serà quantificada a partir de la mesura dels àcids grassos dels fosfolípids de membrana (PLFA) i de l'ergosterol. Aquestes dades quantitatives contribuiran al calibratge del model ja que verifiquen l'evolució microbiana predita en les simulacions.
- Seguiment d'activitats enzimàtiques representatives: l'estudi es completarà amb la determinació de l'evolució de l'activitat enzimàtica hidrolítica dels principals substrats polimèrics de la massa en compostatge. La integració d'aquests resultats amb els de la composició microbiana permetrà ampliar el coneixement dels aspectes funcionals de les poblacions presents.
- Mètodes numèrics: es proposarà i validarà una extensió de la formulació del model per tal de simular processos heterogenis en una, dues i tres dimensions mitjançant el mètode dels elements finits (i altres també basats en la discretització de problemes variacionals). L'extensió permetrà abordar la simulació robusta i fiable dels sistemes no lineals d'equacions diferencials en derivades parcials que configuren el model i que recullen els balanços de massa i energia considerats en la modelització. Es mantindrà l'enfocament de dues fases i, en una primera fase, l'enfocament termobioquímic actual, i posteriorment es plantejarà el problema mecànic acoblat.

3. MUNTATGE EXPERIMENTAL

El projecte presentat disposa de diversos sistemes de compostatge a diferents escales que permeten realitzar experiments amb diferents objectius:

- 1. Reactors per a l'obtenció dels paràmetres del model** (figura 3): de petita escala i que permeten sacrificar certes mostres per tal d'obtenir valors de constants d'hidròlisi, provar mescles problema, etc.



Figura 3: Reactors per obtenir dades del model.

2. **Reactors de simulació** (figura 4): permeten realitzar experiments en què les equacions del model són provades i permeten experiments de calibratge del model, un cop desenvolupades les equacions que el regeixen. Permeten fer el seguiment de temperatura, massa total i registre de composició dels gasos de sortida.



Figura 4: Reactors de simulació.

3. **Reactors de control** (figura 5): reactors amb monitoratge complet de les variables de procés, els quals a més permeten determinar en línia la porositat del material (reactor-picnòmetre), destinats a la implementació del controlador basat en el simulador desenvolupat. Actualment aquests reactors s'estan destinant a l'obtenció massiva de mapes d'OUR (*oxigen uptake rate*, o velocitat de consum d'oxigen) que permetin la formulació d'un controlador basat en aquest paràmetre.



Figura 5: Reactor picnòmetre.

4. RESULTATS

4.1. Elaboració de mapes d'OUR

Un dels punts importants del treball és desenvolupar un procés de compostatge que pugui ser controlat sobre la base de les dades proporcionades pel model. En principi, aquest objectiu es planteja a mitjà termini, i de moment s'està desenvolupant un controlador avançat del procés de compostatge de fangs que permeti un control en base a una variable directament lligada a l'activitat biològica, en aquest cas la velocitat de consum d'oxigen, que es coneix com a *OUR*.

El primer pas per desenvolupar aquest controlador passa per l'obtenció dels punts de consigna, és a dir, unes condicions de temperatura i oxigen que proporcionin una activitat biològica més elevada i en els quals, en conseqüència, s'ha de basar el controlador. Amb aquest objectiu s'han elaborat els denominats «mapes d'OUR» que són representacions del valor d'OUR en diferents moments del procés i per a diferents condicions de treball. A continuació (figura 6) es mostra el mapa d'OUR obtingut en el procés de compostatge de fangs en la zona termòfila del procés:

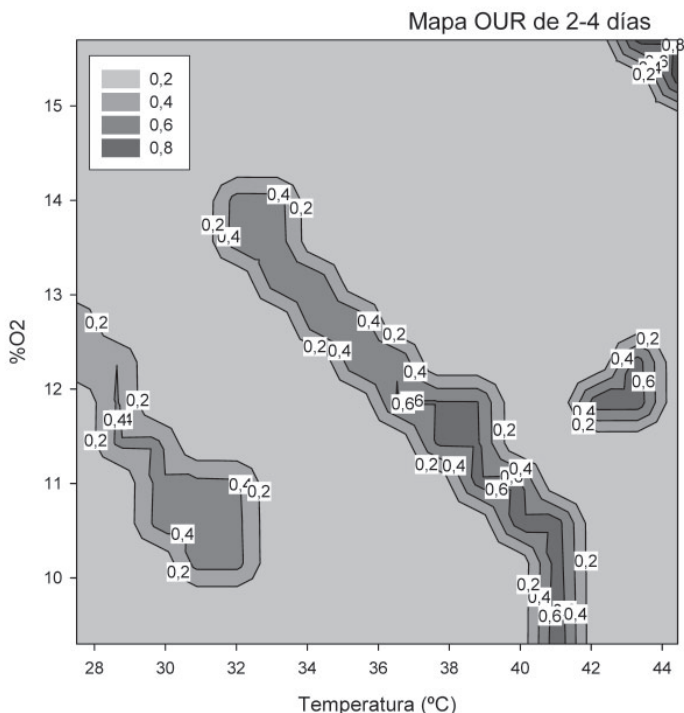


Figura 6: Mapa d'OUR en la zona termòfila del compostatge de fangs.

4.2. Simulacions amb el model simplificat

El model desenvolupat fins ara, que està plenament operatiu (model simplificat, SOLÉ-MAURI et al., 2006), ha estat utilitzat en la predicció del comportament de mescles de composició coneguda. El model considera un volum de control ocupat parcialment per una fase sòlid-líquid, constituïda per materials sòlids de diferents masses i per l'aigua. Pel que fa als processos bioquímics, s'ha considerat

la hidròlisi del substrat particulat, procés que suposa una transferència de massa de la fase sòlida a la líquida. Així mateix, es consideren sis poblacions de microorganismes amb diferent afinitat per a cada una de les fraccions de la matèria orgànica solubilitzada. El creixement dels microorganismes comporta la degradació de les fraccions monomèriques, consum d'oxigen, i la producció de CO_2 , H_2O i NH_3 .

A la figura 7 es presenta un exemple de corbes de simulació i dades experimentals:

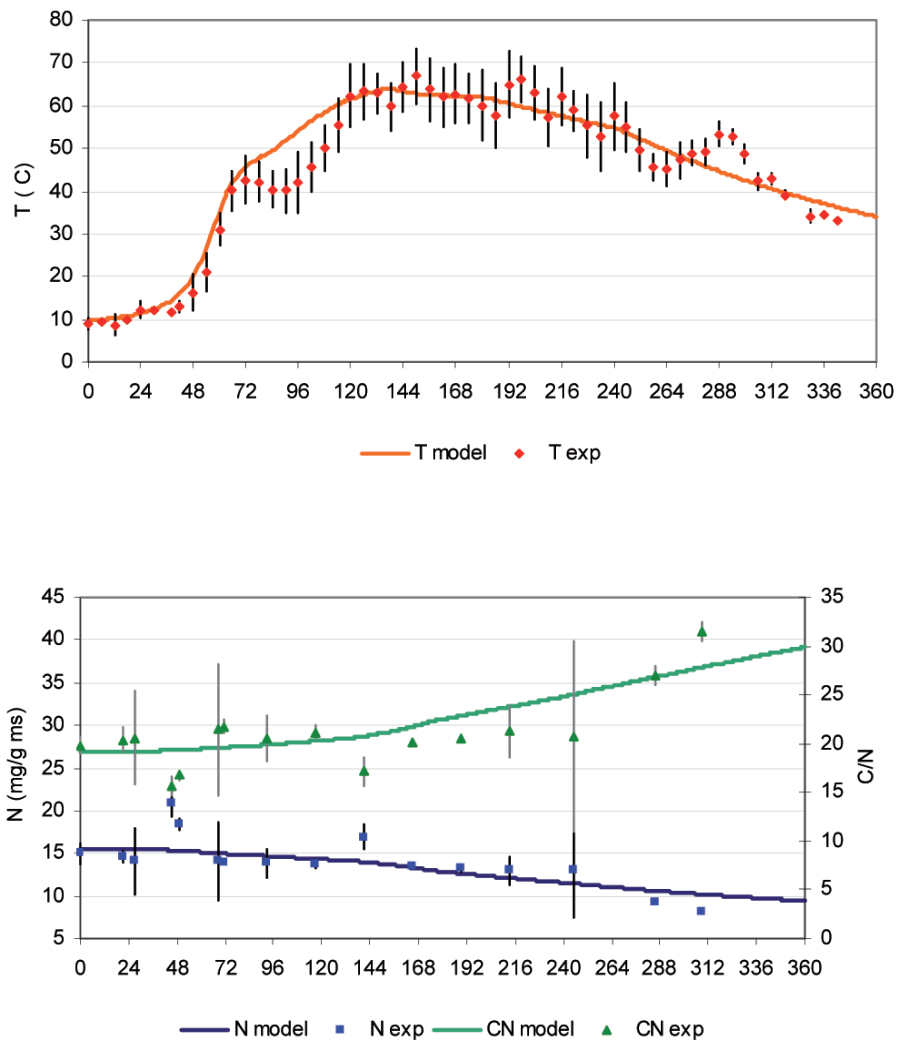


Figura 7: Simulacions de diferents experiments de compostatge obtingudes amb el model simplificat.

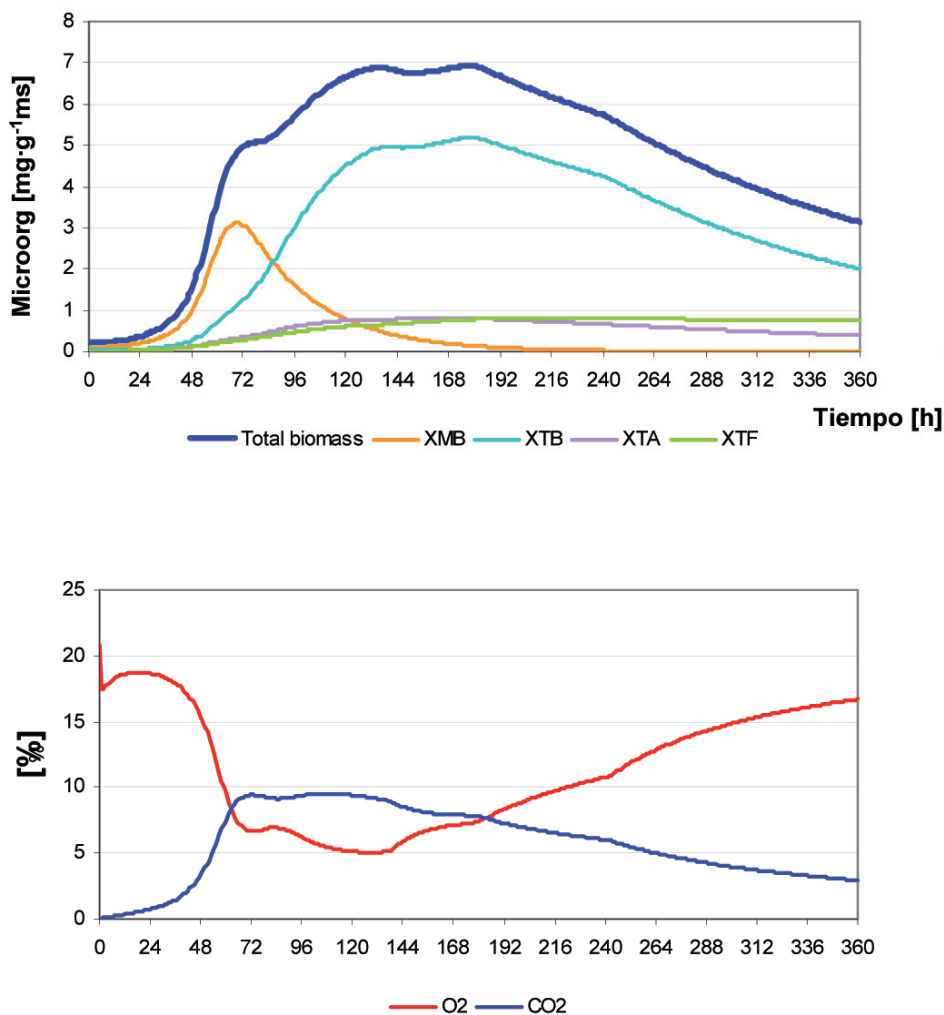


Figura 7: (Continuació)

Com es pot observar, les dades simulades permeten predir en bona mesura el comportament experimental de variables clau del procés de compostatge, com la temperatura i la relació C/N.

A la figura 8 es presenten les simulacions del procés de compostatge modificant una altra de les variables claus de procés: la humitat.

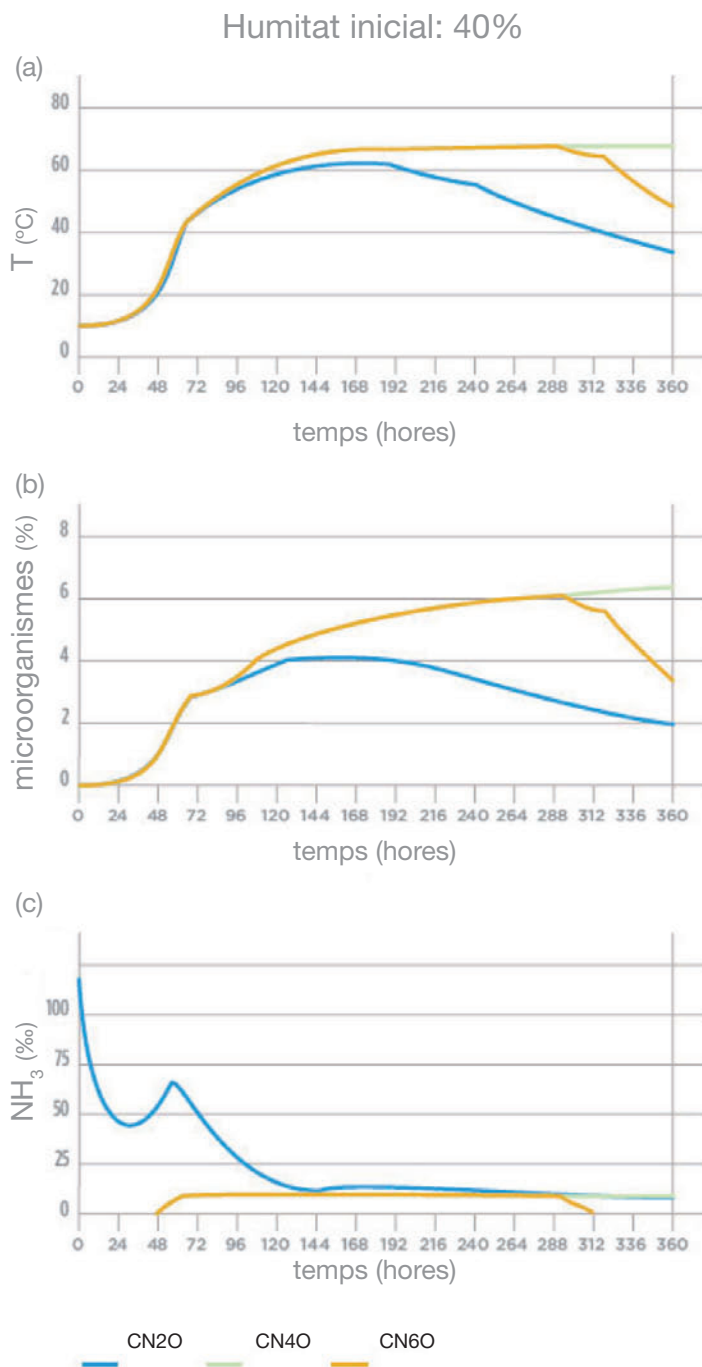


Figura 8: Simulacions de diferents experiments de compostatge obtingudes amb el model simplificat i considerant dos nivells d'humitat i tres nivells de relació C/N.

Humitat inicial: 60%

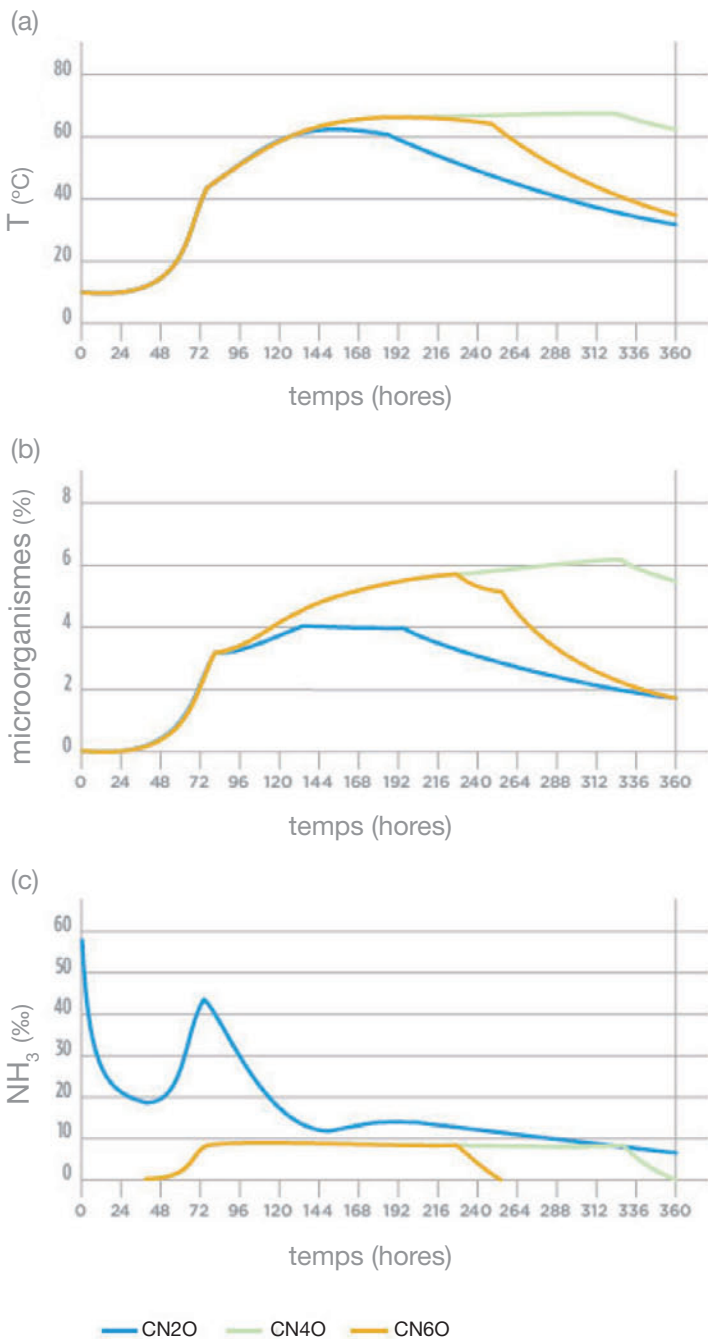


Figura 8. (Continuació)

Com es pot observar, la potencialitat del simulador és molt gran, ja que permet obtenir perfils de les variables del procés canviant-ne diferents paràmetres, sense la necessitat de realitzar els canvis.

Agraïments

El present projecte de recerca ha estat finançat pel Ministeri de Medi Ambient (subvencions d'R+D+I 2006 amb núm. d'exp. 185/2006/3-4.3).

BIBLIOGRAFIA

CEBRIÁN, M.; PÉREZ, E.; CUERDA, E. I FERNÁNDEZ, A. (2001) Compostaje de lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales de la industria agroalimentaria. *Residuos*, 63: 56-62 p.

CHOI, H. L.; RICHARD, T. L. I AHN, H. K. (2001) Composting high moisture materials: biodrying poultry manure in sequentially fed reactor. *Compost Sci. Util.*, 9: 303-311 p.

DAS, K. I KEENER, H. C. (1995) Dynamic simulation model as a tool for managing a large scale composting system. A: Sixth international conference on computers in agriculture.

DAS, K. C.; TOLLNER, E. W. I TORNABENE, T. G. (2001) Composting by-products from bleached kraft pulping process: Effect of type and amount of nitrogen amendments. *Compost Sci. Util.*, 9: 256-265 p.

FANG, M.; WONG, J. W. C.; LI, G. X. I WONG, M. H. (1998) Changes in biological parameters during co-composting of sewage sludge and coal ash residues. *Bioresource Technol.*, 64: 55-61 p.

HAUG, R. T. (1993) *The practical handbook of compost engineering*. Lewis Publishers. Boca Raton, Florida.

LARSEN, K. L. I MCCARTNEY, D. M. (2000) Effect of C:N on microbial activity and N retention: bench-scale study using pulp and paper biosolids. *Compost Sci. Util.*, 8: 147-159 p.

SOLÉ-MAURI, F.; ILLA, J.; MAGRÍ, A.; PRENAFETA-BOLDÚ, F. X.; FLOTATS, X. (2006) An integrated biochemical and physical model for the composting process. *Bioresource Technology* (en premsa, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2006.07.012>)

ZORPAS, A. A.; ARAPOGLOU, D. I PANAGIOTIS, K. (2003) Waste paper and clinoptilolite as a bulking material with dewatered anaerobically stabilized primary sewage sludge (DASPSS) for compost production. *Waste Management*, 23: 27-35 p.