
LA GESTIÓ I EL TRACTAMENT DE LES DEJECCIONS RAMADERES: UN EXEMPLE DE TRAJECTÒRIA EN RECERCA ORIENTADA

Xavier Flotats

Gestió Integral de Residus Orgànics (GIRO). Unitat Mixta IRTA-UPC
Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia. Universitat
Politécnica de Catalunya - BarcelonaTECH

REBUT: 13 de maig de 2016 - ACCEPTAT: 19 de maig de 2016

RESUM

En aquest article es fa una revisió de treballs de recerca i desenvolupament sobre gestió i tractament de dejeccions ramaderes fets per un grup de recerca des de mitjan anys noranta. Amb un enfocament orientat a trobar solucions, ha calgut combinar els treballs més bàsics, orientats a conèixer els fonaments dels processos, amb els més aplicats, orientats a optimitzar la seva aplicació en condicions de camp reals. En aquesta combinació s'han mostrat molt útils les eines de biologia molecular per a conèixer la dinàmica de les poblacions de microorganismes en processos biològics, tant a escala de laboratori com industrial, i les eines de modelització matemàtica i simulació numèrica, tant per a entendre els fenòmens observats com per a optimitzar el disseny i l'escalat de les instal·lacions. Com a resultat dels diferents treballs, es conclou que les dejeccions són un subproducte de la producció animal i no un residu, que és possible la recuperació de nutrients per a substituir fertilitzants minerals i que la digestió anaeròbia és un procés clau en qualsevol estratègia tecnològica sostenible.

PARAULES CLAU: dejeccions ramaderes, plans de gestió, digestió anaeròbia, codigestió anaeròbia, nutrients, recuperació.

LA GESTIÓN Y EL TRATAMIENTO DE LAS DEYECCIONES GANADERAS: UN EJEMPLO DE TRAYECTORIA DE INVESTIGACIÓN ORIENTADA

RESUMEN

En el presente artículo se hace una revisión de trabajos de investigación y desarrollo sobre gestión y tratamiento de deyecciones ganaderas realizados por un grupo de investigación desde mediados de los años noventa. Con un enfoque orientado a encontrar soluciones, ha sido necesario combinar los trabajos más básicos, orientados a conocer los fundamentos de los procesos, con los más aplicados, orientados a optimizar su aplicación en condiciones de campo reales. En esta combinación se han mostrado muy útiles las técnicas de biología molecular para conocer la dinámica de las poblaciones de microorganismos en procesos biológicos, tanto a nivel de laboratorio como industrial, y las herramientas de modelización matemática y simulación numérica, tanto para entender los fenómenos observados como para optimizar el diseño y el escalado de las instalaciones. Como resultado de los diferentes trabajos, se concluye que las deyecciones son un subproducto de la producción animal y no un residuo, que es posible la recuperación de nutrientes para sustituir fertilizantes minerales y que la digestión anaerobia es un proceso clave en cualquier estrategia tecnológica sostenible.

PALABRAS CLAVE: deyecciones ganaderas, planes de gestión, digestión anaerobia, codigestión anaerobia, nutrientes, recuperación.

MANAGEMENT AND TREATMENT OF MANURE: AN EXAMPLE OF A RESEARCH-ORIENTED APPROACH

ABSTRACT

This article presents a review of research and development studies on the management and treatment of livestock manure by a research group since the mid-90s. With a focus on solutions, it was necessary to combine basic scientific studies, aimed to determine the basic aspects of the processes, with the most widely applied ones, addressed to optimizing their application under field conditions. In this combination, molecular biology techniques have been very useful tools for determining the dynamics of bacterial populations in biological processes, both in the laboratory and at industrial level, together with mathematical modelling and numerical simulation, in order to understand the observed phenomena and to optimize design and

facilities scaling. Manure should be considered a by-product of animal production instead of a waste. An appropriate technological strategy should be chosen in order to achieve proposed objectives and to obtain products with value for either the livestock owner or the market, helping to enhance crop production economy and to decrease the impact on water, soils and the atmosphere. The production of materials substituting mineral nitrogen and phosphorous fertilizers should have an economic value and should help to establish a market of quality products. Anaerobic digestion is a key process for building sustainable technological strategies.

KEYWORDS: manure, nutrients management plan, anaerobic digestion, anaerobic co-digestion, nutrients, recovery.

1. INTRODUCCIÓ

Les dejeccions ramaderes són un recurs energètic i agronòmic que cal gestionar correctament per a evitar el seu impacte negatiu sobre els medis receptors (sòl, aigües i atmosfera). Per a prendre les decisions apropiades a cada circumstància, és necessari conèixer-ne les característiques, la dinàmica complexa, les tecnologies per a transformar-les i les eines de gestió. El co-neixement és sempre resultat de l'aprenentatge previ i de les aportacions de la recerca i, per tant, és dinàmic.

La recerca es classifica sovint en bàsica o aplicada, però sembla més convenient que la recerca estigui orientada als objectius que es persegueixen. En el camp de les dejeccions ramaderes, investigar, per exemple, els factors que afecten la dinàmica de la transferència del nitrogen amoniacal dels purins a un corrent gasós podria considerar-se recerca bàsica, però és necessària per a aconseguir produir posteriorment sulfat amònic i possibilitar l'exportació dels excedents de nitrogen que es generen en una zona de densitat ramadera elevada. Un altre exemple, desenvolupar un mètode de mesura fiable de la demanda química d'oxigen (DQO) dels residus sòlids heterogenis (Noguerol-Arias *et al.*, 2012) permet posteriorment poder fer balanços correctes de massa i energia de les plantes de biogàs. Aquest seria un enfocament de recerca orientada, en què cal establir objectius a curt, mitjà i llarg termini, i en què sovint cal dedicar un temps apreciable a treballs bàsics sense que el mercat objectiu obtingui respostes immediates. Si no s'estableixen objectius a llarg termini, si els agents polítics i econòmics no els tenen clars i si no es creen marcs estables d'actuació, la recerca no pot contribuir de manera significativa en el sector corresponent. Aquest és el cas de les dejeccions ramaderes, camp en què diferents grups de recerca a Catalunya han fet contribucions molt interessants, però en el qual sembla que periòdicament el país comença de nou.

X. Flotats

L'objectiu d'aquest article és fer una síntesi dels treballs de recerca orientada en el camp de les dejeccions ramaderes duts a terme per investigadors actuals del grup consolidat de recerca GREA (Grup de Recerca en Enginyeria Agroambiental), format per personal de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), de l'Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA) i de la Universitat de Lleida (UdL). Aquest grup va tenir com a nucli inicial el grup de recerca en Residus Ramaders de la UdL creat l'any 1994, el qual es va transformar el 1998 en el LEA (Laboratori d'Enginyeria Ambiental de la UdL), que va ser un dels nou grups iniciadors de la Xarxa IT (Xarxa de Centres de Suport a la Innovació Tecnològica de la Generalitat de Catalunya) el 1999, i que en el període 2005-2012 es va integrar en el GIRO Centre Tecnològic, acrònim de Gestió Integral de Residus Orgànics, centre adscrit a l'IRTA i a la UPC.

A mitjan anys noranta, la visió inicial va ser considerar que els purins de porc, un dels aspectes més problemàtics de la producció porcina en aquell moment, eren un recurs i que calia desenvolupar metodologia per a fer plans d'aplicació al sòl en funció del sistema agrari. Un dels primers treballs del grup de Residus Ramaders de la UdL sobre aquest desenvolupament metodològic (Flotats *et al.*, 1995) es va dur a terme a la granja Mas el Cros de Santa Pau, a Girona, la qual disposava d'una planta de biogàs des del 1983 que cobria de l'ordre del 50 % de la demanda d'energia tèrmica per a calefacció (Flotats i Gibert, 2002).

Aquest article s'estructura segons els blocs temàtics següents: plans de gestió i eines de presa de decisions, producció d'energia de les dejeccions, hidròlisi tèrmica per a millorar la biodegradabilitat, recuperació de nitrogen i fòsfor per al seu ús en altres àrees geogràfiques o altres sectors d'activitat, i l'eliminació biològica de nitrogen de les dejeccions. Dins d'aquests blocs temàtics es mencionen diferents tecnologies que no es descriuen, o es descriuen de manera molt simplificada, per evitar un article massa extens. El lector podrà trobar aquestes descripcions a Campos *et al.* (2005) o a Flotats *et al.* (2012).

2. PLANS DE GESTIÓ

Un pla de gestió de dejeccions ramaderes és un programa d'actuacions, individual o col·lectiu, que condueix a adequar la producció a les necessitats dels conreus, en l'espai i en el temps. Un pla de gestió hauria de considerar actuacions a tres nivells: 1) De reducció en origen de cabals i de components de les dejeccions, un excés dels quals pot limitar-ne l'aprofitament. L'objectiu és evitar un contingut excessiu d'aigua, nitrogen, fòsfor o metalls pesants, cosa que implica revisar les tècniques de maneig a la granja i adaptar les dietes del bestiar. 2) De la seva aplicació als sòls i conreus, és a dir, el

pla de fertilització, que s'ha de confeccionar a partir del coneixement dels sòls, dels requeriments dels conreus i de les característiques climatològiques i hidrològiques. 3) D'estratègia de tractament. Una estratègia de tractament és una combinació de processos unitaris amb l'objectiu de modificar les característiques de les dejeccions per tal d'adequar-les a la demanda com a producte de qualitat (Teira-Esmatges i Flotats, 2003).

La idoneïtat d'una estratègia de tractament dependrà de cada zona geogràfica, de les necessitats que hagi posat de manifest el mateix pla de gestió, de la qualitat del producte final obtingut i dels costos econòmics associats. Els objectius particulars que cal complir poden ser múltiples, però l'objectiu bàsic ha de ser el d'augmentar la capacitat de gestió sobre les dejeccions, o sigui, la capacitat de prendre decisions.

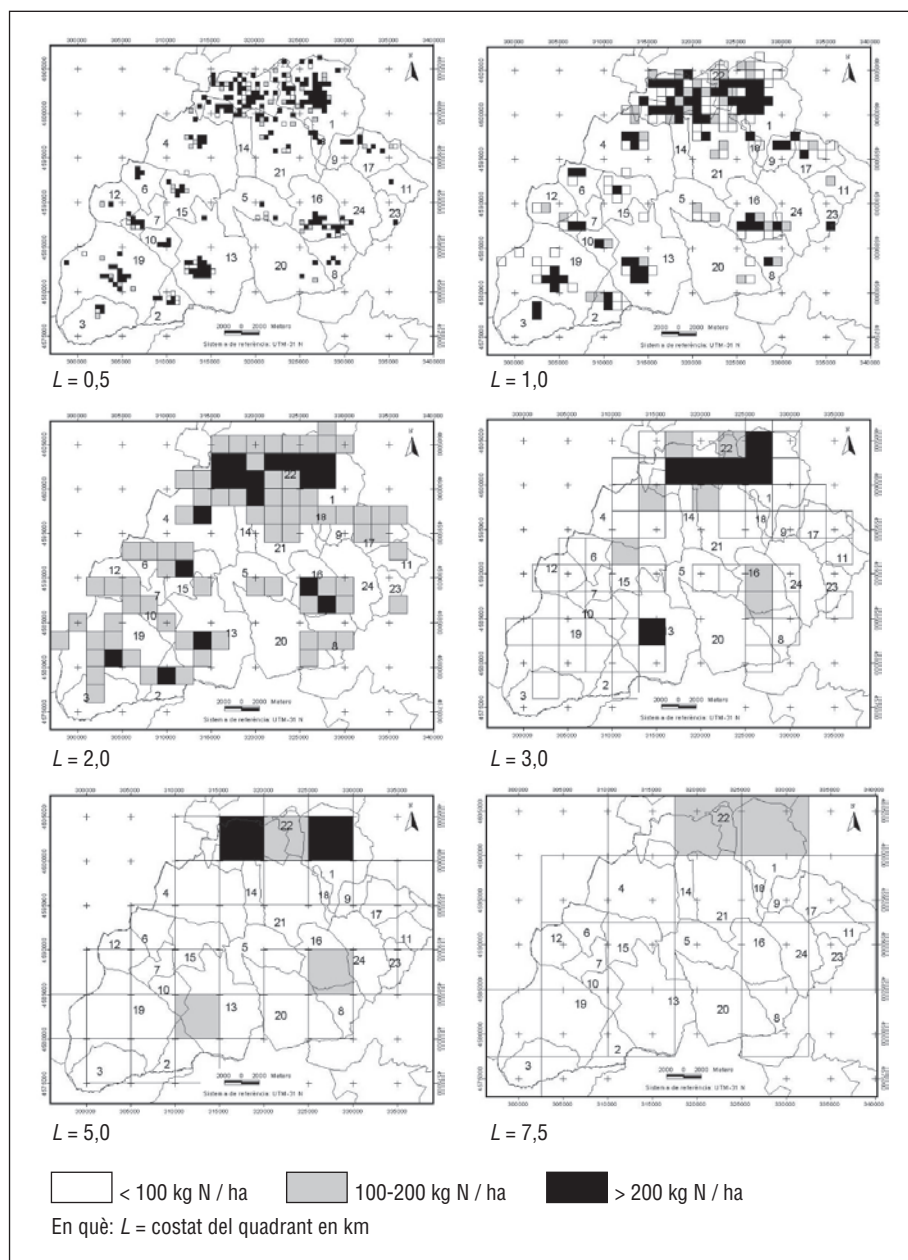
Durant el període 1998-2001 es van fer els estudis de base per a l'elaboració dels plans de gestió de dejeccions a les comarques de l'Alt Urgell, la Cerdanya, la Noguera, les Garrigues i l'Urgell, així com un estudi de detall al terme municipal de Juncosa de les Garrigues.

Per a una comarca, independentment de si el balanç de nutrients entre els continguts a les dejeccions i les demandes de fertilització és excedentari o deficitari, els problemes apareixen quan la concentració de granges, i per tant la generació de nutrients, es presenta en localitzacions específiques que no coincideixen amb les zones amb necessitats agrícoles. En aquestes situacions es presenta un problema de transport. Per a valorar aquesta problemàtica, es va desenvolupar una metodologia que permet detectar en un territori o comarca agrupacions especialment denses de granges quant a generació de nitrogen, bé perquè hi ha moltes granges properes, bé perquè són grans. Consisteix a delimitar el territori amb quadrícules de mida diferent, i marcar cada quadrant amb una trama de color de més o menys intensitat en funció del nitrogen generat per les granges contingudes per unitat de superfície. En augmentar la mida de la quadrícula, es dilueixen les zones amb poca intensitat en la producció de nitrogen, i resten amb trama fosca, corresponent a una alta producció de nitrogen per unitat de superfície, els quadrants que engloben moltes granges properes. Aquests quadrants identificats com d'alta densitat de producció de nitrogen permeten localitzar les àrees especialment problemàtiques i, per tant, les zones on cal prioritzar la creació d'infraestructures col·lectives de gestió i/o tractament.

A la figura 1 es representa aquest procés per a la comarca de les Garrigues, com a exemple. S'hi detecta una zona especialment densa a la zona nord de la comarca, on té sentit adoptar una gestió col·lectiva de les dejeccions i implantar instal·lacions de reducció de volum i/o de transformació en productes valorables. Els anys 2001 i 2004 es van implantar en aquesta zona dues plantes de digestió anaeròbia i concentració tèrmica de purins per evaporació al buit i un pla col·lectiu de gestió de les dejeccions. El grup va assessorar tant en el desenvolupament d'una eina informàtica per a la gestió

X. Flotats

FIGURA 1. Densitat de producció anual de nitrogen d'origen ramader (kg N/ha) a la comarca de les Garrigues segons quadrícules de mida diferent



FONT: Teira-Esmatges i Flotats (2003).

de la logística de recollida de purins a les granges com en l'estudi de la combinació digestió anaeròbia / evaporació (Bonmatí i Flotats, 2003a), els resultats del qual van permetre l'optimització del disseny dels equips.

Al mapa amb $L = 3$ km de la figura 1 s'aprecia un quadrant especialment dens al sud: és al municipi de Juncosa, caracteritzat per una important cabana de bestiar boví. De l'estudi específic de les alternatives de gestió en aquest terme, en va resultar la proposta de construir una planta col·lectiva de compostatge (Teira *et al.*, 1999), que els ramaders van portar a terme (Flotats *et al.*, 2009).

L'experiència adquirida en els estudis anteriors va fer que en alguns fòrums internacionals es demanés als investigadors sobre què era més convenient: el tractament individual per granja o el col·lectiu. La conclusió, elaborada a partir de l'anàlisi de casos d'èxit a Catalunya i publicada per Flotats *et al.* (2009), va ser que en zones d'alta densitat i intensitat ramadera és convenient la gestió col·lectiva, que les plantes de tractament col·lectiu poden ser una ajuda a la gestió i que, per l'èxit de les instal·lacions, és imprescindible la implicació dels ramaders, tant individualment com col·lectivament, i l'existència d'un pla de gestió com una eina per a ordenar les actuacions.

3. OBTENCIÓ D'ENERGIA DE LES DEJECCIONS

La *digestió anaeròbia* és el procés controlat de descomposició biològica en medi anaerobi de matèria orgànica, amb el resultat final de producció d'una mescla de gasos o biogàs, dels quals els més importants són el metà (CH_4), present en una proporció del 60-70 %, i el diòxid de carboni (CO_2), en una proporció del 30-40 %, amb la presència de traces d'altres gasos. La potència calorífica del biogàs és de l'ordre de 25 MJ/m^3 en condicions normals de pressió i temperatura, si la proporció de CH_4 és de l'ordre del 65 %.

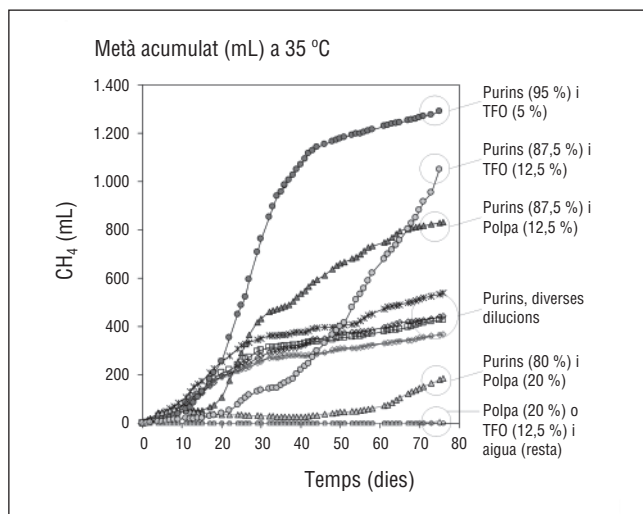
La *codigestió anaeròbia* és la digestió de mescles de materials orgànics de diferent origen per a aconseguir una composició més equilibrada en nutrients i una producció més gran de biogàs.

L'experiència positiva de la planta de biogàs de Mas el Cros va fer que molts ramaders es preguntessin sobre com es podia fer rendible la producció d'energia elèctrica a partir de purins. La resposta immediata va ser que no era possible; els purins no contenen prou matèria orgànica. Això va portar a estudiar, com a primer treball del grup en aquest camp, les possibilitats de la codigestió anaeròbia, temàtica de la qual no hi havia cap referència a Espanya en aquell moment.

Els primers treballs van anar dirigits a estudiar la codigestió de purins de porc i fangs de depuradora, tant en règim mesofílic ($35 \text{ }^\circ\text{C}$) com termofílic ($55 \text{ }^\circ\text{C}$). Les elevades concentracions d'amoni (NH_4^+) no van permetre un

X. Flotats

FIGURA 2. Produccions mitjanes de CH_4 de la codigestió en discontinu de diferents proporcions de purins de porc amb terres filtrants d'oli d'oliva (TFO) o amb polpa de pera



NOTA: Valors calculats en vials de 120 mL, amb 50 g de mostra i 5 g d'inòcul.

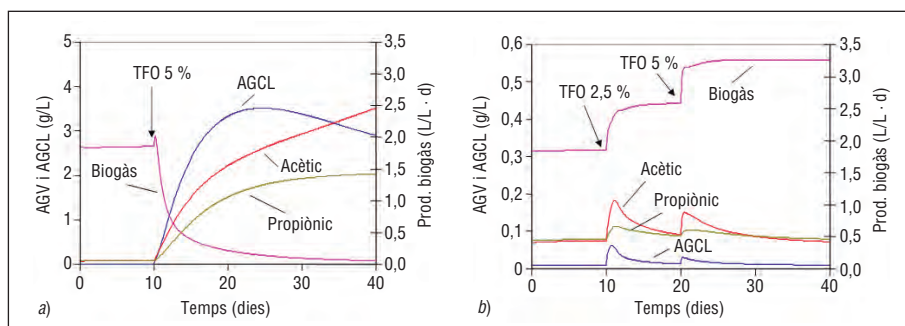
FONT: Elaboració pròpia a partir de Campos (2001).

procés estable en règim termofílic, a aquestes temperatures la proporció $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ augmenta, cosa que palesa l'efecte inhibitori de l'amoniac (NH_3). Aquest primer treball va permetre millorar el coneixement sobre la dinàmica complexa del procés (Bonmatí, 1998; Flotats *et al.*, 1999), posar a punt tècniques d'assaig més acurades que es van oferir al sector (Flotats *et al.*, 1998), i va aconsellar d'abordar la modelització matemàtica del procés, a fi de bastir eines d'anàlisi i predicció de la dinàmica complexa del sistema (Campos i Flotats, 2003).

Els resultats dels estudis posteriors de codigestió de purins amb residus de la indústria alimentària varen demostrar la importància de la complementarietat de les composicions (Campos *et al.*, 1999). A la figura 2 es mostren els resultats de la codigestió en discontinu¹ de purins de porc i terres filtrants d'oli d'oliva (TFO) o polpa de pera. Es pot comprovar que la digestió d'aquests residus industrials per separat no aconsegueix produir una quantitat apreciable de gas, mentre que la mescla en unes proporcions determinades amb purins de porc fa que el procés s'activi significativament, a causa dels nutrients i de l'alcalinitat que aporten les dejeccions. Els avantatges de

1. Assaig de digestió en discontinu: se segueix la dinàmica del procés d'una mescla única de mostra i inòcul durant el temps que dura la seva reacció en una ampolla tancada (vial).

FIGURA 3. Simulació numèrica del comportament d'un reactor anaerobi de mescla completa en ser alimentat amb diferents proporcions de TFO



AGV = àcids grassos volàtils; AGCL = àcids grassos de cadena llarga; TFO = terres filtrants d'oli d'oliva
 Font: Campos (2001).

la codigestió, com a contrapartida, suporten la necessitat d'una gestió integrada de residus orgànics de diferents orígens.

La mescla que va donar millor resultat en els assaigs en discontinu va ser la de purins amb TFO al 5 %, de manera que aquesta va ser la proporció inicialment assajada en un reactor en continu² de mescla completa una vegada el procés va demostrar que era estable amb purins. Però el procés es va desestabilitzar ràpidament i en pocs dies la producció de biogàs es va fer nul·la. El model matemàtic desenvolupat va mostrar que a l'hora d'introduir les TFO calia fer-ho de manera esglaonada per a afavorir l'adaptació dels microorganismes als àcids grassos de cadena llarga (AGCL), els quals són inhibidors del procés (figura 3). Així doncs, en els experiments en continu es va procedir a alimentar amb dosis creixents, amb resultats satisfactoris (Campos, 2001). Aquesta és la manera de procedir quan s'introdueix un co-substrat nou a un digester anaerobi. A Flotats i Sarquella (2008) es pot consultar una guia sobre la codigestió amb dejeccions ramaderes.

La inhibició per AGCL va ser objecte d'estudi de detall uns anys després, quan la nova normativa europea sobre residus carnis (Reglament 1774/2002/EC i les seves modificacions posteriors) va fer augmentar la demanda d'informació sobre la seva codigestió amb dejeccions ramaderes. Mentre que abans es creia que la inhibició per AGCL era irreversible, els resultats obtinguts van demostrar que els digestors inhibits podien ser recuperats mitjançant diferents tècniques (Palatsi *et al.*, 2009; Affes *et al.*, 2013), i fins i tot va ser possible la modelització matemàtica d'aquest fenomen d'inhibició (Pa-

2. Assaig de digestió en continu: el reactor, que conté microorganismes, és alimentat de manera continuada amb un cabal de substrat problema. Un paràmetre important és el temps de retenció, quocient entre el volum del reactor i el cabal d'alimentació.

X. Flotats

latsi *et al.*, 2010; Juznic-Zonta *et al.*, 2013). Els treballs de codigestió amb residus carnis van permetre aprofundir en la dinàmica de les proteïnes i del NH_3 en medi anaerobi, com a inhibidor també del procés (Palatsi, 2010).

Es pot superar la inhibició per NH_3 mitjançant codigestió fent mescles de subproductes que permetin una relació C/N favorable (Rodríguez-Abalde, 2013), extraient prèviament part de l'amoni mitjançant *stripping*/absorció,³ amb el perill de perdre també matèria orgànica (Bonmatí, 2001), o operant a elevats temps de retenció, per sobre de cinquanta dies. En aquests temps de retenció poden créixer bacteris SAO (de l'anglès *syntrophic acetate oxidizers*). En ser menys sensibles a la inhibició per NH_3 , permeten que al gestor hi pugui haver concentracions de fins a 6 g N- NH_4^+ /L sense signes aparents de mal funcionament. Les plantes de codigestió en granges de porcs a Catalunya treballen actualment a aquests temps de retenció, i en una d'aquestes plantes ha estat detectada una elevada activitat SAO (Prenafeta-Boldú *et al.*, 2015). El bon funcionament d'aquesta planta davant elevades càrregues de proteïnes d'origen animal com a cosubstrats ja feia sospitar aquesta presència. L'ús de tècniques de biologia molecular ha estat molt útil per a estudiar la dinàmica dels microorganismes durant la codigestió, tant per a entendre-la com per a definir els paràmetres d'operació òptims del procés (Palatsi *et al.*, 2011).

Transportar purins de porc a plantes centralitzades de tractament presenta un cost energètic elevat, en comparació del seu baix contingut en matèria orgànica i potencial energètic. Per aquest motiu, es va estudiar la viabilitat de la digestió anaeròbia de la fracció sòlida, separada prèviament en granja, i es va concloure que no era recomanable la digestió anaeròbia única d'aquesta fracció per a concentracions de sòlids totals superiors al 12 % (Campos *et al.*, 2008).

Un sistema d'obtenció d'energia que ha merescut atenció darrerament, i amb el qual es treballa actualment, és la cèl·lula de combustible microbiana (MFC, *microbial fuel cell*), en què en lloc d'obtenir un gas combustible s'obté directament un corrent elèctric, resultat de la transferència d'electrons en les reaccions d'oxidació-reducció dins de la cèl·lula MFC (Bonmatí *et al.*, 2010). S'ha experimentat amb la fracció líquida de fems de boví (Viñas *et al.*, 2008) i de purins de porc (Sotres, 2015). El sistema, però, mostra el seu gran potencial quan se'l configura per actuar com a cèl·lula bioelectroquímica (BES, *bio-electrochemical cell*); llavors pot catalitzar reaccions específiques en funció del corrent elèctric aplicat (Sotres, 2015; Cerrillo *et al.*, 2016) i contribuir a la gestió del nitrogen excedentari dels purins, sia per a la seva recuperació o la seva eliminació.

3. *Stripping* d'amoniac: arrossegament del NH_3 mitjançant un corrent gasós, usualment aire. Absorció: captura de l'amoniac del corrent gasós mitjançant un àcid. Si s'utilitza aigua amb àcid sulfúric, s'obté una dilució de sulfat amònic.

4. PRETRACTAMENT TÈRMIC A LA DIGESTIÓ ANAERÒBIA

La implantació de sistemes de digestió anaeròbia en el sector ramader presenta dues limitacions: l'ús eficient i pràctic de l'energia tèrmica generada i la baixa velocitat del procés, motivada perquè la hidròlisi n'és la fase limitant.

S'ha comprovat que la taxa d'hidròlisi pot incrementar-se mitjançant el pretractament tèrmic a temperatura mitjana (Bonmatí *et al.*, 2001). S'aconsegueixen increments de la producció de metà superiors al 50 % si es mantenen temperatures de 80 °C durant tres hores. Aquest resultat es va obtenir amb purins frescos i encara amb un contingut de nitrogen amoniacal relativament baix, mentre que amb purins envellits, no frescos, els resultats van ser oposats (taula 1).

TAULA I. Produccions de metà per unitat de matèria orgànica afegida, amb purins de porc en assaigs anaerobis discontinus

	Purins frescos		Purins envellits	
	CH ₄ /SV _i (L/kg)	CH ₄ /DQO _i (L/kg)	CH ₄ /SV _i (L/kg)	CH ₄ /DQO _i (L/kg)
Purins no tractats tèrmicament	347,5	209,7	96,1	62,3
Purins tractats tèrmicament (80 °C, 3 h)	557,5	304,1	67,7	40,1
% increment	60,4	45,0	-29,5	-35,6

En què: SV_i = sòlid volàtil inicial; DQO_i = demanda química d'oxigen inicial.

FONT: Elaboració pròpia a partir de dades de Bonmatí *et al.* (2001).

Aquests resultats donen peu a una alternativa interessant per a la utilització de l'energia tèrmica sobrant d'un procés de cogeneració, però fan centrar l'atenció en la qualitat de la matèria primera. Per a evitar pèrdues en el potencial de producció de biogàs, cal tractar els purins tan aviat com sigui possible i així, alhora, es redueixen les males olors al magatzem. Aquest fet explica les baixes produccions de biogàs de les plantes centralitzades de tractament de purins i obliguen a seguir plans molt acurats de recollida a les granges per tal de minimitzar el temps d'emmagatzematge (Palatsi *et al.*, 2005).

El pretractament tèrmic a temperatura mitjana també s'ha mostrat beneficiós per als residus carnis, i se n'ha comprovat l'augment de la biodegradabilitat després de la seva pasteurització si el seu contingut en carbohidrats no és apreciable, mentre que baixa quan aquests puguen, per producció de compostos recalcitrants mitjançant reaccions de Maillard (Rodríguez-Abalde, 2013).

5. RECUPERACIÓ DE NUTRIENTS: NITROGEN I FÒSFOR

Altres autors havien estudiat profusament l'obtenció de sals d'amoni per *stripping*/absorció d'aigües residuals d'origen industrial, però les aplicacions del procés al tractament de purins de porc no van rebre atenció fins al final dels anys noranta. Vàrem estudiar experimentalment aquesta aplicació i es va comprovar que treballant a 80 °C, amb la fracció líquida de purins digerits anaeròbiament, l'eficiència del procés no era tan dependent del pH com ho és amb la fracció líquida de purins frescos. D'altra banda, el producte obtingut (sulfat d'amoni) no presentava contaminació apreciable deguda a matèria orgànica ni olor que recordés els purins, si havien estat abans digerits anaeròbiament (Bonmatí i Flotats, 2003b). Un estudi més detallat va indicar la importància de la presència de matèria orgànica volàtil i com afectava negativament el procés (Laureni *et al.*, 2013). La combinació de la digestió anaeròbia i l'*stripping*/absorció d'amoni ha estat aplicada a algunes granges a Europa i Foged *et al.* (2012c) en descriuen una a Eslovènia.

La demanda d'informació sobre els sistemes de concentració tèrmica, per a aprofitar l'energia tèrmica de processos de cogeneració per a la millora de la gestió dels purins (Flotats *et al.*, 2004), van fer enfocar també els estudis a aquests processos, específicament mitjançant evaporació al buit a fi d'evitar emissions a l'atmosfera. Es va comprovar que els condensats presentaven una contaminació mínima amb matèria orgànica quan prèviament els purins havien passat per una digestió anaeròbia (Bonmatí i Flotats, 2003a). Aquesta combinació, digestió anaeròbia i concentració tèrmica, es va aplicar a cinc de les vint-i-vuit plantes centralitzades de tractament de purins que es van implantar a Espanya en el període 1999-2009, i va mostrar els seus avantatges si abans de l'evaporació s'abaixava lleugerament el pH. A Foged *et al.* (2012c) es pot trobar una descripció detallada d'una d'aquestes plantes a Juneda. Mentre que en aquestes plantes que incorporen la combinació digestió anaeròbia – evaporació al buit es recuperava de l'ordre del 95 % del nitrogen en el producte sec final (82,3 g N/kg matèria seca), en d'altres, que utilitzaven tractaments aerobis, la recuperació i les concentracions mesurades eren inferiors a la meitat (Ramírez *et al.*, 2011).

La recuperació de fòsfor s'ha estudiat mitjançant el procés de precipitació d'estruvita (fosfat amònic magnèsic), i s'ha comprovat també que la digestió anaeròbia prèvia afavoreix el procés i la qualitat dels cristalls obtinguts (Cerrillo *et al.*, 2014).

Es conclou que la digestió anaeròbia es configura com un procés clau que cal incloure en les estratègies de tractament quan l'objectiu és la recuperació de nutrients (Foged *et al.*, 2012d). A més a més, la producció de gas combustible contribueix a la reducció del consum de combustibles fòssils i de les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle.

6. ELIMINACIÓ BIOLÒGICA DE NITROGEN

Tot i que la recuperació de nitrogen és l'opció tecnològica més sostenible ambientalment, sempre queden fraccions i subproductes en què pot ser convenient ajustar les concentracions. Es va començar a estudiar el procés de nitrificació-desnitrificació (NDN)⁴ aplicat a la fracció líquida de purins de porc al final dels anys noranta, adoptant l'esquema de reactor SBR (*sequencing batch reactor*), perquè es va entendre que es podia adaptar a una bassa de purins, amb els sistemes de control apropiats. Un SBR és un únic reactor on tenen lloc tots els processos de manera seqüencial: emplenament, desnitrificació, nitrificació mentre s'oxigena, decantació dels microorganismes si no s'agita, buidat del líquid sobrenedant tractat, extracció de microorganismes sobrants, i emplenament de nou i reacció amb els microorganismes que havien quedat decantats. En aquesta tipologia de reactors, el control i l'automatització de les operacions són la clau per a l'èxit del procés. Els primers resultats van ser molt prometedors, amb eliminacions de nitrogen superiors al 90 % per a la fracció líquida de purins (Magrí i Flotats, 2000).

Els estudis posteriors es van dirigir a controlar i optimitzar el procés per tal que la nitrificació de l'amoni dels purins donés lloc a nitrats i que la desnitrificació fos a partir de nitrats en comptes de nitrats (Magrí, 2007). D'aquesta manera, el consum d'energia elèctrica per a fer l'aireig (oxigenació per a nitrificar) i el consum de matèria orgànica per a desnitrificar baixaven significativament, i s'afavoria l'ús d'una part de la matèria orgànica per a produir biogàs. En aquests estudis es va posar també de manifest la utilitat de la modelització matemàtica i la simulació numèrica per a optimitzar el procés i les eines de biologia molecular per a entendre la dinàmica de les poblacions de microorganismes (Magrí *et al.*, 2009). A Catalunya està en funcionament una planta NDN en una granja de porcs a Calldetenes (Osona) des de l'any 2004, la descripció detallada de la qual es pot trobar a Foged *et al.* (2012c).

Hom creu que el futur dels sistemes d'eliminació biològica de nitrogen de la fracció líquida de les dejeccions està en el procés Anammox (*anaerobic ammonium oxidation*), mitjançant el qual microorganismes autòtrofs duen a terme la desnitrificació a partir d'amoni i nitrats, sense consum de matèria orgànica, tan sols hi ha consum d'energia elèctrica per a la nitrificació parcial, d'amoni a nitrit, de part de l'amoni (Magrí *et al.*, 2012). Aquesta configuració permet la digestió anaeròbia prèvia per a l'obtenció de biogàs dels purins, ja que en aquest procés no cal matèria orgànica per a desnitrificar (Magrí *et al.*, 2013).

4. Procés combinat pel qual, mitjançant la nitrificació, microorganismes aerobis converteixen l'amoni en nitrats i nitrats, i, amb la desnitrificació, un altre grup de microorganismes converteix nitrats i nitrats en nitrogen molecular gas utilitzant matèria orgànica com a font d'energia.

7. EINES DE PRESA DE DECISIONS

Els estudis elaborats sobre la millor tecnologia que cal aplicar en cada cas van permetre el suficient bagatge per a elaborar l'any 2004 la *Guia de tractaments de les dejeccions ramaderes* (Campos *et al.*, 2005), per encàrrec de l'Agència de Residus de Catalunya i del Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca de la Generalitat de Catalunya. En aquesta guia es descriuen diferents processos de tractament de les dejeccions i s'hi exposa un arbre de presa de decisions sobre l'estratègia que cal adoptar en funció de la problemàtica que s'ha de resoldre i dels objectius que cal complir. Un concepte bàsic que s'hi va aplicar va ser que si una opció tecnològica simple ja solucionava el problema, no calia recórrer a una de més complexa, encara que fos més barata perquè estigués conjunturalment subvencionada.

L'any 2010, el nostre grup junt amb el centre tecnològic danès ABP va guanyar un concurs de la Comissió Europea per a fer un inventari d'àmbit europeu de les tecnologies de tractament de dejeccions, descriure la caracterització tècnica, econòmica i ambiental d'aquestes tecnologies, avaluar-ne la idoneïtat en cada circumstància i definir les tendències de futur en aquest àmbit (Flotats *et al.*, 2012; Foged *et al.*, 2012a, 2012b, 2012c, 2012d). En aquest treball es va concloure que les estratègies de tractament que cal prioritzar són les de recuperació i valoració d'energia a partir de la digestió anaeròbia i les de recuperació de nutrients, i que perquè això sigui possible és necessari enfortir el mercat dels productes obtinguts i les pràctiques d'economia circular.

Un darrer projecte en el qual hem participat en aquest àmbit és el LIFE + MANEV (2015), en el qual s'han avaluat tretze estratègies tecnològiques de tractament de dejeccions ramaderes localitzades en vuit regions pertanyents a quatre països europeus. Per a aquesta avaluació es va crear un protocol comú de mètodes de mesurament i de càlcul d'indicadors, els quals comprenen l'avaluació tècnica, econòmica i diferents aspectes ambientals, com ara l'eutrofització, l'acidificació o l'emissió de gasos amb efecte d'hivernacle. Un producte d'aquest projecte ha estat una eina informàtica d'ús públic (MANEV-TOOL, accessible des de la pàgina web del projecte), la qual permet a l'usuari avaluar diferents opcions de gestió i tractament de les seves dejeccions en funció de diferents escenaris.

En aquest projecte també s'han sistematitzat els mètodes de mesurament de les emissions gasoses (CH_4 , NH_3 , N_2O i H_2S) en diferents punts d'una instal·lació de tractament. S'ha comprovat que els mètodes d'estimació d'emissions proposats pel Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic (GIECC, de l'anglès Intergovernmental Panel on Climate Change, IPPCC) s'aproximen força als valors mesurats i que, tot i que la digestió anaeròbia té un efecte significatiu en la reducció de les emissions de metà, les emissions directes d'amoníac, i les indirectes de N_2O , augmenten des-

prés de la digestió durant l'emmagatzematge de la fracció líquida, a causa de la mineralització de les dejeccions (Torrellas *et al.*, 2015). Aquest resultat implica que, o bé cal cobrir les basses de purins digerits, o bé cal reduir la concentració de nitrogen amoniacal a les basses mitjançant la seva recuperació en forma concentrada.

Hom creu que en un futur proper la idoneïtat de la implantació d'una estratègia de gestió i tractament de dejeccions també haurà de ser avaluada per la seva capacitat a l'hora de reduir les emissions, de gasos amb efecte d'hivernacle i de pluja àcida, provocades per la producció animal. Per aquest motiu, cal continuar treballant per a caracteritzar aquestes emissions i per a trobar mètodes per a reduir-les.

8. SÍNTESI

Les dejeccions s'han de considerar un subproducte de la producció animal en lloc d'un residu. L'estratègia tecnològica adequada de tractament s'ha d'escollir en funció de l'objectiu que hagi posat de manifest el pla de gestió i a fi d'obtenir productes de valor, tant per als ramaders com per al mercat, contribuint alhora a millorar l'economia de la producció agrícola i a disminuir l'impacte sobre les aigües, els sòls i l'atmosfera.

Les tecnologies de recuperació de nutrients, dirigides a substituir fertilitzants minerals, tindran aplicació si es desenvolupa un mercat de productes de qualitat que valori econòmicament aquests productes.

La digestió anaeròbia és un procés clau en qualsevol estratègia tecnològica de tractament sostenible de les dejeccions.

La recerca orientada a trobar solucions tecnològiques adaptades a les diferents casuístiques es mostra necessària i útil. Els casos d'èxit descrits sempre han estat el resultat d'una col·laboració i un compromís entre els agents implicats. Tot i així, seria un error considerar que la tecnologia és la solució a la problemàtica de les dejeccions; aquesta és sempre una combinació de gestió i estratègia tecnològica apropiada. Per a avançar en aquesta línia calen marcs estables de col·laboració i un mercat econòmic actiu en la recerca d'una ramaderia sostenible.

9. AGRAÏMENTS

L'autor vol agrair la contribució de tot el personal que ha participat en els diferents treballs descrits, tant dels qui apareixen com a autors a les referències de la bibliografia com d'aquells altres, estudiants, personal auxiliar de laboratori o de camp, sense els quals no hauria estat possible obtenir resultats. També a totes les persones, empreses i institucions que amb el seu en-

X. Flotats

coratjament, finançament o participació activa des del sector han fet possible que ara en sapiguem tots plegats una mica més.

BIBLIOGRAFIA

- AFFES, R.; PALATSI, J.; FLOTATS, X.; CARRÈRE, H.; STEYER, J. P.; BATTIMELLI, A. (2013). «Saponification pretreatment and solids recirculation as a new anaerobic process for the treatment of slaughterhouse waste». *Bioresource Technology*, núm. 131, p. 460-467.
- BONMATÍ, A. (1998). *Digestió anaeròbia de purins amb altres residus orgànics*. Lleida: Pagès.
- (2001). *Usos de l'energia tèrmica per a la millora del procés de digestió anaeròbia i per a la recuperació de productes d'interès*. Tesi doctoral. Universitat de Lleida. També disponible en línia a: <<http://www.tdx.cat/handle/10803/8230>> [Consulta: 20 abril 2016].
- BONMATÍ, A.; FLOTATS, X. (2003a). «Pig slurry concentration by vacuum evaporation: influence of previous mesophilic anaerobic digestion process». *Journal of the Air & Waste Management Association*, núm. 53, p. 21-31.
- (2003b). «Air stripping of ammonia from pig slurry: Characterization and feasibility as a pre- or post-treatment to mesophilic anaerobic digestion». *Waste Management*, núm. 23, p. 261-272.
- BONMATÍ, A.; FLOTATS, X.; MATEU, L.; CAMPOS, E. (2001). «Study of thermal hydrolysis as a pre-treatment to mesophilic anaerobic digestion of pig slurry». *Water Science and Technology*, núm. 44, p. 109-116.
- BONMATÍ, A.; VIÑAS, M.; PRENAFETA-BOLDÚ, F. X.; MAGRÍ, A.; FLOTATS, X. (2010). «Sistemas bioelectroquímicos (BES), de la producción de energía a la recuperación de productos de interés». A: BONMATÍ, A.; PALATSI, J.; PRENAFETA, F.; FERNÁNDEZ, B.; FLOTATS, X. (ed.). *Libro de Actas del II Congreso Español de Gestión Integral de Deyecciones Ganaderas. Proceedings of the International workshop on Anaerobic Digestion of Slaughterhouse Waste*. Barcelona: Fira de Barcelona, p. 259-268. També disponible en línia a: <<http://hdl.handle.net/2117/21429>> [Consulta: 30 abril 2016].
- CAMPOS, E. (2001). *Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria*. Tesi doctoral. Universitat de Lleida. També disponible en línia a: <<http://www.tesisenred.net/handle/10803/8229>> [Consulta: 20 abril 2016].
- CAMPOS, E.; ALMIRALL, M.; MARTÍNEZ-ÁLMELA, J.; PALATSI, J.; FLOTATS, X. (2008). «Feasibility study of the anaerobic digestion of dewatered pig slurry by means of polyacrylamide». *Bioresource Technology*, núm. 99, p. 387-395.
- CAMPOS, E.; FLOTATS, X. (2003). «Dynamic simulation of pH in anaerobic processes». *Applied Biochemistry and Biotechnology*, núm. 109, p. 63-76.

La gestió i el tractament de les dejeccions ramaderes

- CAMPOS, E.; FLOTATS, X.; ILLA, J.; MAGRÍ, A.; PALATSI, J.; SOLÉ, F. (2005). *Guia de tractaments de les dejeccions ramaderes* [en línia]. Barcelona: Agència de Residus de Catalunya. <http://residus.gencat.cat/ca/ambits_dactuacio/tipus_de_residu/dejeccions_ramaderes/guia_de_tractaments_de_les_dejeccions_ramaderes> [Consulta: 20 abril 2016].
- CAMPOS, E.; PALATSI, J.; FLOTATS, X. (1999). «Codigestion of pig slurry and organic wastes from food industry». A: MATA, J.; TILCHE, A.; CECCHI, F. (ed.). *II International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste* [Barcelona], vol. 2, p. 192-195. També disponible en línia a: <<http://hdl.handle.net/2117/26888>> [Consulta: 20 abril 2016].
- CERRILLO, M.; OLIVERAS, J.; VIÑAS, M.; BONMATÍ, A. (2016). «Comparative assessment of raw and digested pig slurry treatment in bioelectrochemical Systems». *Bioelectrochemistry*, núm. 110, p. 69-78.
- CERRILLO, M.; PALATSI, J.; COMAS, J.; VICENS, J.; BONMATÍ, A. (2014). «Struvite precipitation as a technology to be integrated in a manure anaerobic digestion treatment plant - removal efficiency, crystal characterization and agricultural assessment». *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, núm. 90, p. 1135-1143.
- COMISSIÓ EUROPEA (2002). «Reglament CE núm. 1774/2002 del Parlament Europeu i del Consell, de 3 d'octubre de 2002, pel qual s'estableixen les normes sanitàries aplicables als subproductes animals no destinats al consum humà». *Diari Oficial de la Unió Europea*, núm. 1273 (10 octubre 2002). [Derogat pel reglament (CE) núm. 1069/2009]
- FLOTATS, X.; BONMATÍ, A.; CAMPOS, E.; ANTÚNEZ, M. (1999). «Ensayos en discontinuo de codigestión anaerobia termofílica de purines de cerdo y lodos residuales. Efecto del amonio». *Información Tecnológica*, núm. 10, p. 79-85.
- FLOTATS, X.; BONMATÍ, A.; FERNÁNDEZ, B.; MAGRÍ, A. (2009). «Manure treatment technologies: on-farm versus centralized strategies. NE Spain as case study». *Bioresource Technology*, núm. 100, p. 5519-5526.
- FLOTATS, X.; CAMPOS, E.; BONMATÍ, A. (1998). «Banc d'assaig de digestió anaeròbia de residus orgànics». A: *2es Jornades Tècniques sobre Energia* [Barcelona], p. 21-28.
- FLOTATS, X.; CAMPOS, E.; PALATSI, J. (2004). «Concentración de deyecciones ganaderas mediante procesos térmicos». A: *Actas del II Encuentro Internacional Gestión de Residuos Orgánicos* [Pamplona, Navarra]. També disponible en línia a: <<http://hdl.handle.net/2117/22522>> [Consulta: 27 abril 2016].
- FLOTATS, X.; FOGED, H. L.; BONMATI, A.; PALATSI, J.; MAGRÍ, A.; SCHELDE, K. M. (2012). «Manure processing technologies». A: *Technical Report No. II concerning «Manure Processing Activities in Europe» to the European Commission, Directorate-General Environment*. 184 p. També disponible en línia a: <<http://hdl.handle.net/2117/18944>> [Consulta: 20 abril 2016].
- FLOTATS, X.; GIBERT, V. (2002). «Mas el Cros biogas plant. Evaluation of 18 years in operation». A: KALYUZHNYI, S. (ed.). *Proceedings of the 7th FAO/*

X. Flotats

- SREN Workshop on Anaerobic Digestion for Sustainability in Waste (water) Treatment and Re-use* [Moscow State University], vol. 1, p. 172-180. També disponible en línia a: <<http://hdl.handle.net/2117/22518>> [Consulta: 20 abril 2016].
- FLOTATS, X.; PORTA, J.; ANTÚNEZ, M.; BOIXADERA, J. (1995). «Metodología para el manejo integral de purines de cerdo». A: *Actas del IV Congreso de Ingeniería Ambiental*. Vol. Aguas [Bilbao], p. 72-81. També disponible en línia a: <<http://hdl.handle.net/2117/27281>> [Consulta: 20 abril 2016].
- FLOTATS, X.; SARQUELLA, L. (2008). «Producció de biogàs per co-digestió anaeròbia». *Quadern Pràctic*, núm. 1 [Barcelona: Institut Català d'Energia]. També disponible en línia a: <http://icaen.gencat.cat/web/.content/10_ICAEN/17_publicacions_informes/04_coleccio_QuadernPractic/quadern_practic/arxius/01_produccio_biogas.pdf> [Consulta: 30 abril 2016].
- FOGED, H. L.; FLOTATS, X.; BONMATÍ, A.; PALATSI, J.; MAGRÍ, A.; SCHELDE, K. M. (2012a). «Inventory of manure processing activities in Europe». A: *Technical Report No. I concerning «Manure Processing Activities in Europe» to the European Commission, Directorate-General Environment*. 138 p. També disponible en línia a: <<http://hdl.handle.net/2117/18943>> [Consulta: 20 abril 2016].
- FOGED, H. L.; FLOTATS, X.; BONMATÍ, A.; PALATSI, J.; MAGRÍ, A. (2012b). «End and by-products from livestock manure processing - general types, chemical composition, fertilising quality and feasibility for marketing». A: *Technical Report No. III concerning «Manure Processing Activities in Europe» to the European Commission, Directorate-General Environment*. 78 p. També disponible en línia a: <<http://hdl.handle.net/2117/18945>> [Consulta: 20 abril 2016].
- FOGED, H. L.; FLOTATS, X.; BONMATÍ, A.; SCHELDE, K. M.; PALATSI, J.; MAGRÍ, A.; JUZNIC-ZONTA, Z. (2012c). «Assessment of economic feasibility and environmental performance of manure processing technologies». A: *Technical Report No. IV concerning «Manure Processing Activities in Europe» to the European Commission, Directorate-General Environment*. 130 p. També disponible en línia a: <<http://hdl.handle.net/2117/18947>> [Consulta: 20 abril 2016].
- FOGED, H. L.; FLOTATS, X.; BONMATÍ, A. (2012d). «Future trends on manure processing activities in Europe». A: *Technical Report No. V concerning «Manure Processing Activities in Europe» to the European Commission, Directorate-General Environment*. 34 p. També disponible en línia a: <<http://hdl.handle.net/2117/18948>> [Consulta: 20 abril 2016].
- JUZNIC-ZONTA, Z.; ALVES, M. M.; FLOTATS, X.; PALATSI, J. (2013). «Modelling inhibitory effects of long chain fatty acids in the anaerobic digestion process». *Water Research*, núm. 47, p. 1369-1380.
- LAURENI, M.; PALATSI, J.; LLOVERA, M.; BONMATÍ, A. (2013). «Influence of pig slurry characteristics on ammonia stripping efficiencies and quality of the recov-

- ered ammonium-sulfate solution». *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, núm. 88, p. 1654-1662.
- LIFE + MANEV (2015). «Evaluation of manure management and treatment technology for environmental protection and sustainable livestock farming in Europe». A: *Projecte europeu LIFE09 ENV/ES/000453, 2011-2015* [en línia]. <<http://www.lifemanev.eu/>> [Consulta: 27 juny 2016].
- MAGRÍ, A. (2007). *Modelització del tractament biològic de la fracció líquida de purins orientat a l'eliminació de nitrogen*. Tesi doctoral. Universitat de Lleida. També disponible en línia a: <<http://www.tesisred.net/handle/10803/8149>> [Consulta: 20 abril 2016].
- MAGRÍ, A.; BÉLINE, F.; DABERT, P. (2013). «Feasibility and interest of the anammox process as treatment alternative for anaerobic digester supernatants in manure processing - An overview». *Journal of Environmental Management*, núm. 131, p. 170-184.
- MAGRÍ, A.; FLOTATS, X. (2000). «Biological treatment of the liquid fraction of pig slurry in a SBR». A: *Proceedings of the 2nd IWA International Symposium on Sequencing Batch Reactor Technology* [Narbona, França], vol. 2, p. 132-135.
- MAGRÍ, A.; GUIVERNAU, M.; BAQUERIZO, G.; VIÑAS, M.; PRENAFETA-BOLDÚ, F. X.; FLOTATS, X. (2009). «Batch treatment of liquid fraction of pig slurry by intermittent aeration - process simulation and microbial community analysis». *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, núm. 84, p. 1202-1210.
- MAGRÍ, A.; VANOTTI, M. B.; SZÖGI, A. A.; CANTRELL, K. B. (2012). «Partial nitrification of swine wastewater in view of its coupling with the anammox process». *Journal of Environmental Quality*, núm. 41, p. 1989-2000.
- NOGUEROL-ARIAS, J.; RODRÍGUEZ-ABALDE, A.; ROMERO, E.; FLOTATS, X. (2012). «Termination of chemical oxygen demand in heterogeneous solid or semi-solid samples using a novel method combining solid dilutions as a preparation step followed by optimized closed reflux and colorimetric measurement». *Analytical Chemistry*, núm. 84, p. 5548-5555.
- PALATSI, J. (2010). *Anaerobic digestion of slaughterhouse waste: impact of the ICFA inhibition*. Tesi doctoral. Universitat de Lleida. També disponible en línia a: <<http://www.tdx.cat/handle/10803/8159>> [Consulta: 20 abril 2016].
- PALATSI, J.; CAMPOS-POZUELO, E.; TORRES, M.; PORRAS, S.; FLOTATS, X. (2005). «Full-scale combination of anaerobic digestion and concentration by evaporation in *Les Garrigues* (Lleida, Spain): evaluation after 2 years of operation». A: BERNAL, M. P.; MORAL, R.; CLEMENTE, R.; PAREDES, C. (ed.). *Sustainable organic waste management for environmental protection and food safety*, vol. II, p. 155-158. També disponible en línia a: <<http://hdl.handle.net/2117/26034>> [Consulta: 20 abril 2016].
- PALATSI, J.; ILLA, J.; PRENAFETA-BOLDÚ, F. X.; LAURENI, M.; FERNÁNDEZ, B.; ANGELIDAKI, I.; FLOTATS, X. (2010). «Long-chain fatty acids inhibition and adaptation

X. Flotats

- process in anaerobic thermophilic digestion: Batch tests, microbial community structure and mathematical modeling». *Bioresource Technology*, núm. 101, p. 2243-2251.
- PALATSI, J.; LAURENI, M.; ANDRÉS, M. V.; FLOTATS, X.; NIELSEN, H. B.; ANGELIDAKI, I. (2009). «Strategies for recovering inhibition caused by long-chain fatty acids on anaerobic thermophilic biogas reactors». *Bioresource Technology*, núm. 100, p. 4588-4596.
- PALATSI, J.; VIÑAS, M.; GUIVERNAU, M.; FERNANDEZ, B.; FLOTATS, X. (2011). «Anaerobic digestion of animal by-products and slaughterhouse waste: main process limitations and microbial community interactions». *Bioresource Technology*, núm. 102, p. 2219-2227.
- PRENAFETA-BOLDÚ, F. X.; VILA, J.; FERNÁNDEZ, B.; RIAU, V.; GUIVERNAU, M.; ILLA, J.; FLOTATS, X.; VIÑAS, M. (2015). «Characterization of methanogenic biomass from a full-scale digester that might harbour SAO activity». A: *Proceedings of the 14th World Congress on Anaerobic Digestion*. També disponible en línia a: <<http://hdl.handle.net/2117/81887>> [Consulta: 20 abril 2016].
- RAMÍREZ, M.; PUJOLÀ, M.; QUEMADA, M.; JARAUTA-BRAGULAT, E.; BONMATÍ, A.; COMAS, J. (2011). «Soil nitrogen availability after addition of thermally dried pig slurry». *Soil Fertility & Plant Nutrition*, núm. 75, p. 940-948.
- RODRÍGUEZ-ABALDE, Á. (2013). *Anaerobic digestion of animal by-products. Pre-treatments and co-digestion*. Tesi doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. També disponible en línia a: <<http://www.tdx.cat/handle/10803/134769>> [Consulta: 20 abril 2016].
- SOTRES, A. (2015). *Microbial fuel cell running on high strength animal wastewater: nitrogen removal strategies and microbial community characterization*. Tesi doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. També disponible en línia a: <<http://www.tdx.cat/handle/10803/318371>> [Consulta: 25 abril 2016].
- TEIRA, M. R.; FLOTATS, X.; CASANÉ, A.; MAGRÍ, A.; MARTÍN, P.; MONTANÉ, L.; TARRADAS, J.; CAMPOS, E.; BONMATÍ, A. (1999). «A case study on livestock waste management: Juncosa de les Garrigues (Catalonia, Spain)». A: *Libro de textos completos de las Jornadas Internacionales de Ingeniería Ambiental*, vol. 1, p. 283-292. També disponible en línia a: <<http://hdl.handle.net/2117/26195>> [Consulta: 20 abril 2016].
- TEIRA-ESMATGES, M. R.; FLOTATS, X. (2003). «A method for livestock waste management planning in NE Spain». *Waste Management*, núm. 23, p. 917-932.
- TORRELLAS, M.; ANTON, A.; BURGOS, L.; TEY, L.; NOGUEROL, J.; PALATSI, J.; RIAU, V.; FLOTATS, X.; BONMATÍ, A. (2015). «Characterisation of emissions from a cow manure anaerobic codigestion plant». A: *Abstracts book of the 2nd International Conference on manure management and valorization (ManuREsource 2015)* [Gant, Bèlgica, 2-4 desembre 2015], p. 109-110.

La gestió i el tractament de les dejeccions ramaderes

VIÑAS, M.; GERRITSE, J.; PRENAFETA-BOLDÚ, F. X.; FLOTATS, X. (2008). «Caracterización electroquímica de una biocelda de combustible (MFC) que utiliza purines vacunos para la producción directa de electricidad». A: MAGRÍ, A.; PRENAFETA, F. X.; FLOTATS, X. (ed.). *Libro de Actas del I Congreso Español de Gestión Integral de Deyecciones Ganaderas*, p. 411-419. També disponible en línia a: <<http://hdl.handle.net/2117/18949>> [Consulta: 20 abril 2016].