

GESTIÓN Y TRATAMIENTO DE DEYECCIONES GANADERAS

Xavier Flotats

GIRO Centro Tecnológico. Rambla Pompeu Fabra 1. 08100 Mollet del Vallés.
Departamento de Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología. Universidad Politécnica de
Cataluña. Parque Mediterráneo de la Tecnología Edificio D-4, 08860 Castelldefels.

1.- INTRODUCCIÓN

En los últimos años hemos pasado de hablar de “echar purines al campo” a “fertilizar con purines”. Este cambio de nomenclatura es indicativo de una evolución positiva en el sector, en la que además estamos aprendiendo que no debe abordarse la problemática de los purines como algo independiente de la producción animal. La gestión de las deyecciones es una actividad que ha de formar parte íntegra de la producción ganadera, tan primaria como la alimentación o el control sanitario, y estrechamente relacionada con éstas.

No existe una solución única y universal de tratamiento de deyecciones ganaderas que asegure la “eliminación” del problema. La solución es una combinación de gestión y tecnología, adaptada a cada realidad, y siempre con el objetivo, u objetivos, que se definan en cada zona en función del balance de nutrientes realizado en ésta, del problema de transporte que se deba resolver y de otros requerimientos que se deban cumplir. La herramienta básica de toma de decisiones, y de ordenación de las actuaciones, ha de ser el plan de gestión de nutrientes (PGN), individual o colectivo, de las deyecciones y otros residuos orgánicos en el área geográfica objeto del plan.

Los residuos orgánicos potencialmente valorizables como fertilizantes o enmiendas deben verse como recursos a gestionar, en lugar de contaminantes a eliminar. Siguiendo este simple concepto, las deyecciones deben considerarse un subproducto de la producción animal y ser tratadas conforme se requiera para cumplir el objetivo de una gestión óptima como fuente de recursos. Esta gestión depende de condicionantes locales, tales como la

accesibilidad a los cultivos, los costes de transporte o los precios de los fertilizantes minerales (Cuadro 1).

Cuadro 1.- Factores a considerar durante el diseño del PGN y posibles objetivos a cumplir por el tratamiento de las deyecciones.

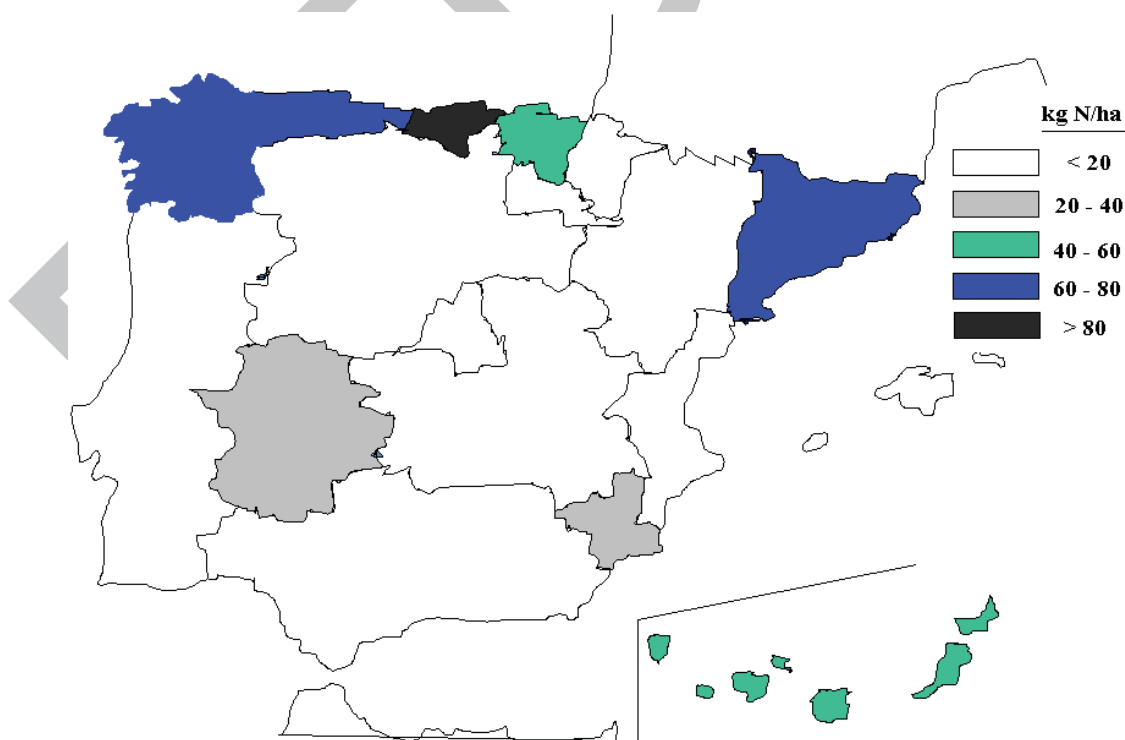
Factores a considerar
Disponibilidad de suelos y cultivos accesibles para fertilizar Requerimientos nutricionales y productividad de estos cultivos Presencia de otros fertilizantes orgánicos competitivos/sinérgicos en la zona Precios de los fertilizantes minerales Factores climáticos Densidad e intensidad de granjas Estructura de la propiedad de granjas y parcelas de cultivos Distancias y costes de transporte Precios de la energía
Posibles objetivos de la estrategia de tratamiento adoptada
Adecuar la producción a las necesidades estacionales de los cultivos Transportar fuera de la zona de producción; reducir volumen Transformar las deyecciones en productos con valor añadido Adecuar la composición a la demanda agrícola Recuperar nutrientes Eliminar nitrógeno Estabilizar, eliminando materia orgánica fácilmente biodegradable Higienizar Eliminar xenobióticos u otros contaminantes orgánicos Producir energía renovable Reducir emisiones de gases de efecto invernadero Reducir emisiones de amoníaco

Un plan de gestión se puede definir como un conjunto de acciones conducentes a adecuar la producción de deyecciones a la demanda de los suelos agrícolas como productos de calidad (Teira-Esmatges y Flotats, 2003). Este conjunto de acciones debe incluir la minimización de componentes limitantes (por ejemplo, reducción del contenido en agua de las deyecciones mediante la desviación de aguas pluviales o el control de bebederos, la reducción del contenido en metales pesados, nitrógeno o fósforo mediante cambios en la alimentación del ganado, etc.); un plan de fertilización de suelos; el análisis económico de costes; y el análisis de posibles tratamientos conducentes a la mejora de la gestión. Cuando en una determinada zona la cantidad de nutrientes producidos es superior a la demanda, la complejidad del sistema hace necesario un mayor nivel de planificación, lo cual significa un cambio de escala de análisis y de gestión, de individual a colectiva. La diferenciación

en la escala de planificación de la gestión es, pues, un factor clave para posteriores implantaciones de instalaciones de tratamiento individuales, a escala de granja, o colectivas, centralizadas (Flotats *et al.*, 2009). En este sentido, la decisión sobre la escala de tratamiento y su complejidad tecnológica ha de resultar de la planificación de la gestión en lugar de ser un objetivo en sí mismo.

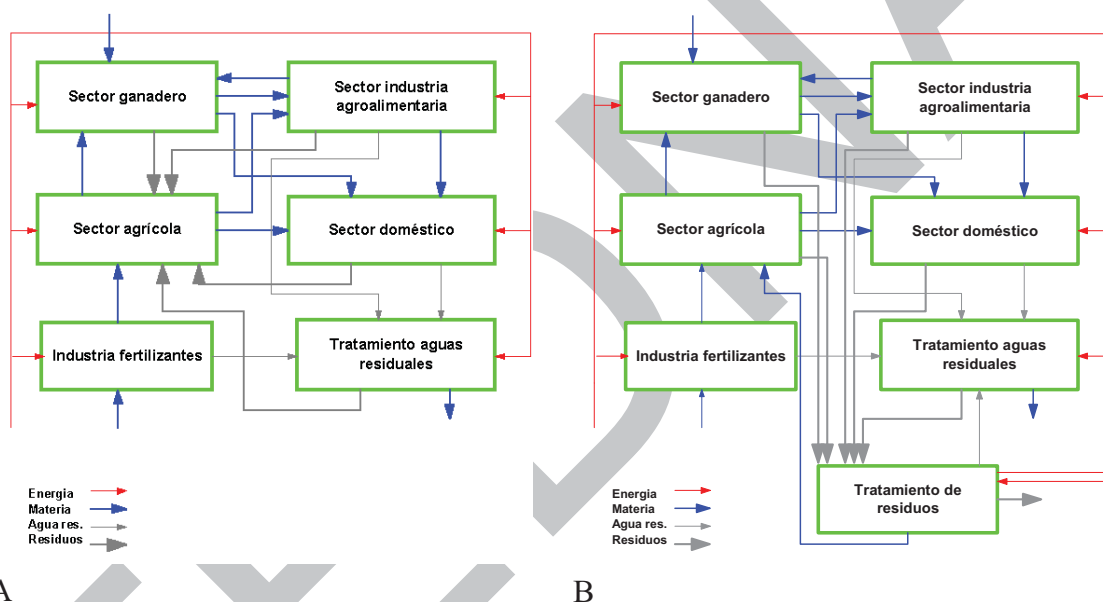
La producción de nitrógeno de origen ganadero podría sustituir una parte del nitrógeno mineral que se consume, y se importa. Por otro lado, la dosis media de nitrógeno de origen ganadero aplicable por unidad de superficie agraria útil en España es relativamente baja (21,8 kg N/ha; ver Figura 1), de manera que en líneas generales podría afirmarse que España es un país que no debería tener problemas graves en este ámbito. El principal problema radica en la producción ganadera concentrada en determinadas áreas geográficas, donde localmente puede existir un problema especialmente grave. En este contexto, el transporte se convierte en un limitante técnico y económico para una adecuada gestión. El coste de transporte también aporta un criterio económico para la toma de decisiones: un tratamiento será interesante si el coste final del tratamiento, transporte y uso de los productos obtenidos es inferior al coste de transporte de las deyecciones en bruto.

Figura 1.- Dosis media de nitrógeno de origen ganadero en España: 21,8 kg N/ha.
Elaboración propia a partir de datos MAPA: Encuesta ganadera en España
(diciembre 2003) para: porcino, bovino, caprino y ovino;
Encuesta de superficies agrarias (pastos incluidos) de 2004.



Asimismo, el mercado de las deyecciones ganaderas aplicables a los suelos, como abono o enmienda orgánica, encuentra competencia: fangos de estaciones depuradoras, residuos orgánicos de la industria alimentaria y fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (Figura 2.A). Esta situación de competencia es positiva a fin de tender a un mercado que evolucione hacia cotas de calidad en los productos que se aplican a los suelos y cultivos, pero requiere de un marco global que ordene esta evolución y de las herramientas de gestión, control y tecnológicas que lo hagan posible. Este marco abre un campo de actividad nuevo, el de la gestión y tratamiento de residuos orgánicos, de importancia estratégica para cualquier país.

Figura 2. Las deyecciones ganaderas no son los únicos productos orgánicos que compiten por el suelo agrícola (A). La gestión y tratamiento de los residuos orgánicos ha de abastecer de productos de calidad al sector agrícola (B).



Uno de los principios inspiradores básicos para la creación del marco global del conocimiento es considerar que el suelo no es un vertedero, sino que es un valor patrimonial que hay que conservar y, en su caso, mejorar. Este principio básico implica que al suelo y a los cultivos no se les puede aplicar residuos, sino productos de calidad comprobada y contrastada. Implica, también, que los residuos orgánicos han de modificar sus características mediante los procesos tecnológicos de transformación que permitan obtener productos de calidad.

Un último concepto, implícito en todo lo mencionado hasta ahora, es el de la gestión integrada de residuos de diversos orígenes por áreas geográficas. Las mezclas pueden permitir composiciones adecuadas a un suelo o cultivo concreto, pueden mejorar el perfil de un proceso de tratamiento y pueden abaratar costes de transporte. Asimismo, la gestión integrada puede permitir pasar de una situación de competencia por el suelo

agrícola a otra de complementariedad (Figura 2.B). Hay que evitar, obviamente, que la mezcla de residuos sea una práctica para diluir contaminantes.

La herramienta básica de toma de decisiones, y de ordenación de las actuaciones, ha de ser el plan de gestión de los residuos orgánicos en el área geográfica objeto de éste. Este plan puede ser individual, por cada granja, o colectivo, por granjas o por área geográfica.

2.- PLANES DE GESTIÓN

Un plan de gestión de residuos ganaderos es un programa, individual o colectivo, de actuaciones que conduzcan a adecuar la producción de deyecciones a las necesidades de productos de calidad contrastada para los cultivos, en el espacio y en el tiempo. A ser posible, un plan de gestión ha de incluir todos los residuos orgánicos, producidos en la zona geográfica objeto de estudio, susceptibles de ser aplicados, también, a suelos y cultivos, a fin de pasar de situaciones de competencia a situaciones de complementariedad y de aprovechamiento de sinergias. Un plan de gestión ha de contemplar actuaciones en los tres ámbitos que se indican, por orden de prioridad:

2.1.- Medidas de reducción en origen

- *Medidas de reducción de caudales.* Estas medidas son especialmente importantes para los purines de cerdo, los cuales tienen un contenido en agua superior al 90%. Su aplicación se ha traducir en un ahorro en los costes de transporte y tratamiento. Una acción simple con gran impacto en esta reducción de costes es evitar que las aguas pluviales lleguen a las balsas de almacenamiento de purines.
- *Medidas de reducción de componentes,* tales como nitrógeno, fósforo, potasio y metales pesados. Su aplicación concierne a la modificación de las dietas del ganado, y se ha ver compensada con la posibilidad de aplicar dosis superiores de purines en cultivos próximos, reduciendo costes de transporte.

Estas medidas tienen asociados costes de producción, pero también reducción de costes de gestión y tratamiento de los purines. La internalización de los costes ambientales se presenta como una herramienta necesaria para determinar la relación óptima.

2.2.- Plan de aplicación a suelos y cultivos

Un plan de aplicación, o de fertilización, se ha de confeccionar a partir del conocimiento de la composición de los residuos, o de los productos derivados de ellos, el mapa de suelos de la zona de aplicación, y características de los cultivos, del sistema

agrícola, climatológicos e hidrológicos. En caso de gestión colectiva y centralizada de varias granjas, la distribución geográfica de estas, y la logística de recogida a adoptar, también han de ser objeto de consideración. El balance de nutrientes entre los contenidos en los residuos ofertados y la demanda de los cultivos, las demandas externas a la zona de aplicación del plan, y los costes de transporte asociados, definen la posible problemática a la que los tratamientos han de dar solución. Asimismo, el plan de aplicación estacional a los cultivos incide directamente en el volumen necesario de almacenamiento, en las propias granjas o en almacenes colectivos.

La ejecución del plan comporta dificultades extremas si hay que gestionar gran cantidad de parcelas, con cultivos y tipologías de suelos diferentes. Si a la vez hay que gestionar muchas granjas, es necesario el uso de aplicaciones informáticas (Thompson *et al.*, 1997). Este es el caso de la zona norte de la comarca de Les Garrigues (Lleida), donde se ejecuta un plan de gestión desde el año 2001, en el que se combina un programa informático de logística de recogida a granjas, la distribución a parcelas utilizando un sistema de información geográfica (SIG) y el tratamiento colectivo en dos plantas de concentración térmica, combinando la digestión anaerobia, la evaporación al vacío y el secado para obtener un producto seco que concentra todo el nitrógeno orgánico y amoniacal, el cual se transporta a zonas deficitarias en nutrientes (Palatsi *et al.*, 2005)

2.3. Tratamientos

Una estrategia de tratamiento es una combinación de procesos unitarios con el objetivo de transformar los residuos a fin de adecuarlos a la demanda como productos de calidad. La definición anterior comporta un cambio en la apreciación popular sobre el tratamiento de residuos y obligan a un cambio en la nomenclatura, primando los conceptos de recuperación o creación de nuevos productos a partir de residuos orgánicos. El tratamiento de residuos es una nueva actividad industrial de importancia estratégica y deben utilizarse términos que la dignifiquen.

La idoneidad de una estrategia de tratamiento dependerá de cada zona geográfica, de las necesidades que hayan puesto de manifiesto los estudios preliminares del plan de gestión, de la calidad del producto final obtenido y de los costes asociados. En todo caso, el objetivo básico que hay que perseguir es el de aumentar la capacidad de gestión sobre el residuo. Los objetivos a cumplir por los tratamientos pueden ser múltiples, pudiendo ser: 1) *Adecuar* la producción de residuos a las necesidades estacionales de los cultivos; 2) *Transportar* fuera de la zona de aplicación del plan de gestión; 3) *Valorar* económicamente el residuo; 4) *Adecuar* la composición a los requerimientos del entorno (suelos, cultivos, malos olores, eliminar parte del nitrógeno...); 5) *Extraer y recuperar* nutrientes valorizables (nitrógeno, fósforo, ...); 6) *Higienizar*: reducir o eliminar patógenos; 7) *Producir* energía; 8) *Aislar*, en caso de no ser posible su valorización o no cumplir los requerimientos de calidad, previa estabilización y/o valorización.

Un análisis detallado de cada operación y estrategia de tratamiento puede encontrarse en Burton y Turner (2003). Una descripción más simple y visual, con objetivos pedagógicos, puede encontrarse en Campos *et al.* (2004).

En el cuadro 2 se sintetizan las características básicas de los procesos susceptibles de ser aplicados en la estrategia de tratamiento, indicando las formas de energía necesarias limitantes del proceso. En todos los casos, la energía eléctrica se refiere al consumo de energía mecánica para separar fases, agitar o transferir O₂. Una combinación de estos procesos corresponderá a una estrategia de tratamiento.

En general, las tendencias legislativas a nivel europeo priman la introducción de los procesos de compostaje y digestión anaerobia, por separado o integrados en la estrategia de tratamiento, para obtener productos orgánicos estables, mineralizados, higienizados, ahorrar energía o minimizar emisiones gaseosas. La tendencia legislativa y la necesidad de primar la recuperación de compuestos a fin de reintroducirlos en los ciclos productivos, crea problemas locales allí donde la demanda de productos recuperables es muy inferior a la oferta de éstos. Éste es el caso de las zonas excedentarias de nutrientes. En estas zonas se pueden adoptar tres tipos de soluciones genéricas:

- 1) Cerrar granjas y localizarlas de nuevo en zonas deficitarias en nutrientes;
- 2) Reducir el volumen de los residuos y modificar su calidad a fin de favorecer el transporte a zonas donde el mercado los acepte;
- 3) Depurar, eliminando o apartando de los circuitos de reciclaje los residuos o parte de sus componentes.

La primera opción tiene repercusiones socioeconómicas para la zona geográfica considerada, y ha sido una de las actuaciones emprendidas por países como Holanda. La segunda opción corresponde a los sistemas de depuración, para los cuales es necesario considerar que sólo son “eliminables” en parte la materia orgánica (por vía aerobia o anaerobia) y el nitrógeno (mediante nitrificación-desnitrificación). Si también se producen excedentes en fósforo, será necesario concentrar éste para ser transportado a zonas con demanda. La tercera opción, complementable con la segunda, corresponde a los sistemas de concentración de la fracción sólida, mediante separación física o concentración, para favorecer económicamente el transporte y uso en zonas con demanda de fertilizantes.

Cuadro 2.- Síntesis de operaciones aplicables al tratamiento de residuos ganaderos (T: residuo íntegro; S: fracción sólida; L: fracción líquida)

Proceso	Aplicado a fracción S, L, o T	Objetivo	Necesidades energéticas limitantes
1. Balsas homogeneización, estercoleros	T, S, L	Regular la producción continua al consumo estacional de cultivos. Regular entradas discontinuas a plantas de tratamiento. Reducir patógenos	
2. Separación de fases	T	Separar para propiciar líneas específicas de tratamiento, transporte o aplicación a fracción S o L resultante	Energía eléctrica
3. Aplicación de encimas y bacterias a balsas	T	Aumentar concentración de sólidos. Transformar N amoniacal a orgánico	
4. Nitrificación	L	Transformar N amoniacal a nítrico	Energía eléctrica
5. Desnitrificación	L	Transformar N nítrico a N ₂ . Eliminar materia orgánica fácilmente degradable	
6. Descomposición aeróbica heterótrofa	L, T	Eliminar materia orgánica	Energía eléctrica
7. Digestión anaerobia	T, L, S	Producir CH ₄ (energía). Eliminar materia orgánica. Higienizar	
8. Compostaje	T, S	Eliminar/estabilizar materia orgánica. Higienizar. Obtener abono orgánico de calidad	Energía mecánica/ eléctrica
9. Reducción biológica de fósforo (P)	L	Transferir P soluble a fase biológica sedimentable. Eliminar materia orgánica fácilmente degradable.	Energía eléctrica
10. Precipitación química	L	Transferir algunos componentes a fase sedimentable. Separar P (apatitas, estruvita)	
11. Secado/peletización	S	Separar agua. Reducir volumen	Energía térmica
12. Evaporación/ concentración	L	Separar agua. Reducir volumen	Energía térmica
13. Stripping/absorción	L	Recuperar N amoniacal	Energía eléctrica/ térmica
14. Higienización térmica	T	Eliminar/inactivar patógenos. Hidrólisis térmica	Energía térmica
15. Dosificación de aditivos	T, S, L	Modificar composición para adecuarla a cultivos o posibilitar otros procesos	
16. Ozonización	L	Oxidación compuestos orgánicos recalcitrantes	Energía eléctrica
17. Filtración en membrana/osmosis inversa	L	Separar sales. Reducir conductividad	Energía eléctrica

El proceso de concentración puede realizarse mediante dos métodos genéricos: mediante separación en membrana o mediante procesos térmicos. La separación en

membrana, mediante osmosis inversa sólo es aplicable a la fracción líquida previamente separada mediante tamizado, filtración o ultrafiltración, y con costes de mantenimiento y de operación prohibitivos, siendo los costes energéticos elevados ($>25 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$). Según Burton y Turner (2003), el uso de tecnologías de membranas es posible, siempre y cuando se haya estabilizado previamente la materia orgánica y los sólidos hayan sido eliminados mediante un efectivo proceso de separación.

Los procesos térmicos unitarios aplicados a la concentración son, de forma genérica, la evaporación (aplicable a líquidos para concentrar hasta el 20 – 30% en sólidos totales) y el secado (aplicable a sólidos para concentrar hasta más del 90% en sólidos totales). Los procesos térmicos han de complementarse con otros para evitar el deterioro del material, la volatilización de compuestos orgánicos y amoníaco y, en general, para conseguir la recuperación de recursos con el mínimo impacto ambiental. Una revisión del estado de la tecnología de los procesos de concentración térmica puede encontrarse en Flotats *et al.* (2004).

Para la definición de las alternativas y asegurar que el plan de fertilización se puede cumplir, el estudio base del plan de gestión se ha de complementar con:

- a) *Cálculo de la capacidad de almacenaje* (balsas y estercoleros) para equilibrar la producción con la demanda temporal de los cultivos. La capacidad adecuada puede constituir un limitante económico para cada granja y puede ser recomendable un almacenaje colectivo para reducir costes. El método de cálculo de esta capacidad es igual al del cálculo de volumen de una balsa de homogenización de caudales en una planta depuradora. Un ejemplo de cálculo puede encontrarse en Campos *et al.* (2004)
- b) *Análisis de restricciones legales* a las aplicaciones en la zona geográfica objeto de estudio, tales como normativas municipales o de rango superior.
- c) *Análisis territorial de la distribución de granjas y de otros residuos orgánicos*, a fin de definir zonas donde sea posible y/o recomendable un tratamiento colectivo, reduciendo así los costes asociados al transporte.

La elección de la escala geográfica de análisis y aplicación del plan de gestión (individual por granja o colectivo) se considera una de las decisiones clave para el éxito de las soluciones.

3.- FACTORES DE TOMA DE DECISIÓN

El reciclaje de las deyecciones como fertilizante es la opción más adecuada para la gestión de estos materiales. De todas formas, en determinadas zonas con mayor producción de deyecciones que necesidades fertilizantes, se puede acumular un exceso de nutrientes. Los problemas causados por este exceso han sido ampliamente descritos (Burton y Turner, 2003) y en muchos países las políticas se han diseñado para orientar la gestión y minimizar estos efectos. En la Unión Europea, la Directiva “Nitratos” (EEC, 1991) ha sido la principal fuerza impulsora para el desarrollo y aplicación de métodos de gestión adoptando planes de fertilización adaptados a las necesidades locales de suelos y cultivos. A partir del establecimiento y aplicación de los Códigos de Buenas Prácticas Agrarias, los ganaderos deben tomar decisiones, diseñar y aplicar PGN. Estos PGN incluyen la adopción de estrategias de gestión focalizadas en la minimización del volumen de las deyecciones y la producción de nutrientes, la optimización del transporte y la organización del plan de fertilización. Finalmente, y en función de las condiciones locales, del grado del problema a resolver y de los objetivos a cumplir, también incluyen la adopción de diferentes estrategias tecnológicas de tratamiento.

Los factores de diseño del PGN están relacionados con la escala geográfica de análisis. Se pueden considerar varias situaciones dependiendo de la estructura de la propiedad de granjas y tierras de cultivo, así como su combinación con el balance de la oferta y la demanda. Estas situaciones llevan a plantear los siguientes escenarios (Flotats *et al.*, 2009):

- a) Equilibrio de nutrientes a nivel de granja. Este escenario comporta una planificación individual a nivel de granja y hace posible una gestión simple y relativamente barata. La complejidad sólo aparece cuando es interesante producir biogás (altos precios públicos de la energía y/o alta demanda de energía térmica en la granja). En este caso, el factor limitante para la toma de decisión será el beneficio definido por el balance energético. Las instalaciones deben tener un diseño simple y el granjero debe integrar las operaciones de mantenimiento en las tareas usuales de gestión de la granja.
- b) Equilibrio de nutrientes a nivel de zona geográfica (uniendo un granjero y un agricultor). Este escenario lleva a situación similar al escenario anterior. El transporte puede ser el factor limitante y los procesos de tratamiento se deben modular para minimizar este coste.
- c) Lo mismo que el escenario b) pero combinando muchos granjeros y muchos agricultores. Este escenario requiere de una gestión colectiva que puede comportar un tratamiento centralizado o combinado individual-conjunto para reducir los

costes globales de gestión y transporte. En este caso, el PGN y su aplicación es el factor limitante mientras que el tratamiento adoptado lo debe ser en menor medida.

- d) Exceso de nutrientes en la zona geográfica (uniendo muchos granjeros y agricultores). En este escenario, cada granjero puede decidir adoptar una estrategia individual o colectiva. Cuando el coste de transporte, tratamiento colectivo y aplicación agrícola es menor que el tratamiento individual y aplicación agrícola, la aproximación colectiva será la mejor solución. El objetivo de la planificación de la gestión es orientar el plan de fertilización y el establecimiento del procedimiento para transformar el exceso en productos para ser transportados, vendidos o utilizados en otra zona geográfica con demanda en nutrientes. En este escenario, tanto la gestión como el tratamiento son factores limitantes. Los dos se deben diseñar, implementar y operar siguiendo la directriz de mínima complejidad, pero teniendo en cuenta que éste es un proyecto complejo con muchas variables a tener en cuenta.

Cuadro 3.- Factores que influyen en la decisión sobre el tratamiento conjunto o individual.

Gestión y tratamiento colectivo/centralizado
Perfil económico de la zona: <u>industrial</u> , <u>ganadero</u> , <u>turístico</u> , <u>servicios</u> , <u>residencial</u> ,... Alta densidad e intensidad geográfica de granjas Impacto general del transporte de deyecciones: bajo Existencia de fuerte liderazgo de algunos granjeros o empresa cualificada Existencia de otros residuos orgánicos (codigestión-biogás) para ayudar económicamente Usos potenciales de calor residual (<i>district heating</i> , usos en planta,...) Existencia de tecnólogos y consultores profesionales Tratamiento centralizado como servicio a la gestión colectiva de la zona Variables sociales: ¿es fácil unir a los ganaderos en un proyecto común?
Gestión y tratamiento individual en granja
Perfil económico de la zona: <u>industrial</u> , <u>ganadero</u> , <u>turístico</u> , <u>servicios</u> , <u>residencial</u> ,... Impacto general del transporte de deyecciones: alto Grado de involucración del ganadero Usos de la energía térmica en la granja (si planta de biogás) Existencia de tecnólogos y consultores profesionales Instalaciones de tratamiento completamente integradas en la granja Simplicidad en el diseño y en la operación de las instalaciones de tratamiento

En el cuadro 3 se indican factores que influyen en la decisión sobre la adopción de estrategias individuales o colectivas en el escenario d). En el caso de seleccionar una estrategia conjunta de gestión y/o tratamiento, algunos de los objetivos a cumplir serán:

1. Unificar métodos, haciendo posible la evaluación de todos los diferentes aspectos relativos a la gestión por un equipo técnico común.
2. Amortiguar las variaciones temporales en las características de las deyecciones y otros substratos, aprovechando la complementariedad en las composiciones.
3. Aprovechar la economía de escala, favoreciendo las grandes instalaciones que permiten reducir costes de inversión y operación unitarios.

4.- DENSIDAD DE GRANJAS E INTENSIDAD EN LA PRODUCCIÓN DE DEYECCIONES

La tendencia general en la producción de proteína animal es la concentración y la especialización en determinadas zonas geográficas. Este hecho crea un problema especial de exceso de deyecciones en estas áreas. Estos *clusters* regionales se forman usualmente alrededor de ventajas económicas, ligadas a condiciones climáticas, el acceso a transporte de bajo coste, la existencia de infraestructuras tales como fábricas de pienso, la concentración de profesionales y operarios especializados y la proximidad a los *inputs* (Hegg, 2008). Con el fin de identificar estas áreas con mayor densidad de granjas y también mayor intensidad en la producción de deyecciones donde un tratamiento centralizado puede resultar ventajoso para los ganaderos, Teira-Esmatges y Flotats (2003) desarrollaron un método consistente en el cálculo de la densidad de generación anual de nitrógeno de origen ganadero (kg N/ha) en cuadrículas de superficie creciente (Figura 3). Cuando se incrementa la superficie de la cuadrícula, dentro de la cual se estima la producción de nitrógeno, ésta se diluye si la densidad de granjas es baja, mientras que si la cuadrícula contiene grandes explotaciones ganaderas o muchas granjas muy cercanas unas a otras se mantiene un valor elevado en la densidad de generación. Estas áreas siempre se corresponden con una alta densidad ganadera y, por tanto, una planta de tratamiento centralizado localizada en estas zonas minimizará los costes de transporte. Este método fue aplicado a toda Cataluña a fin de identificar zonas en las que los tratamientos centralizados pudieran ayudar a la gestión de las deyecciones (Figura 4).

Figura 3.- Producción de nitrógeno de origen ganadero en la comarca de les Garrigues (Lleida), para cuadrículas de diferente tamaño L en km (Teira y Flotats, 2003).

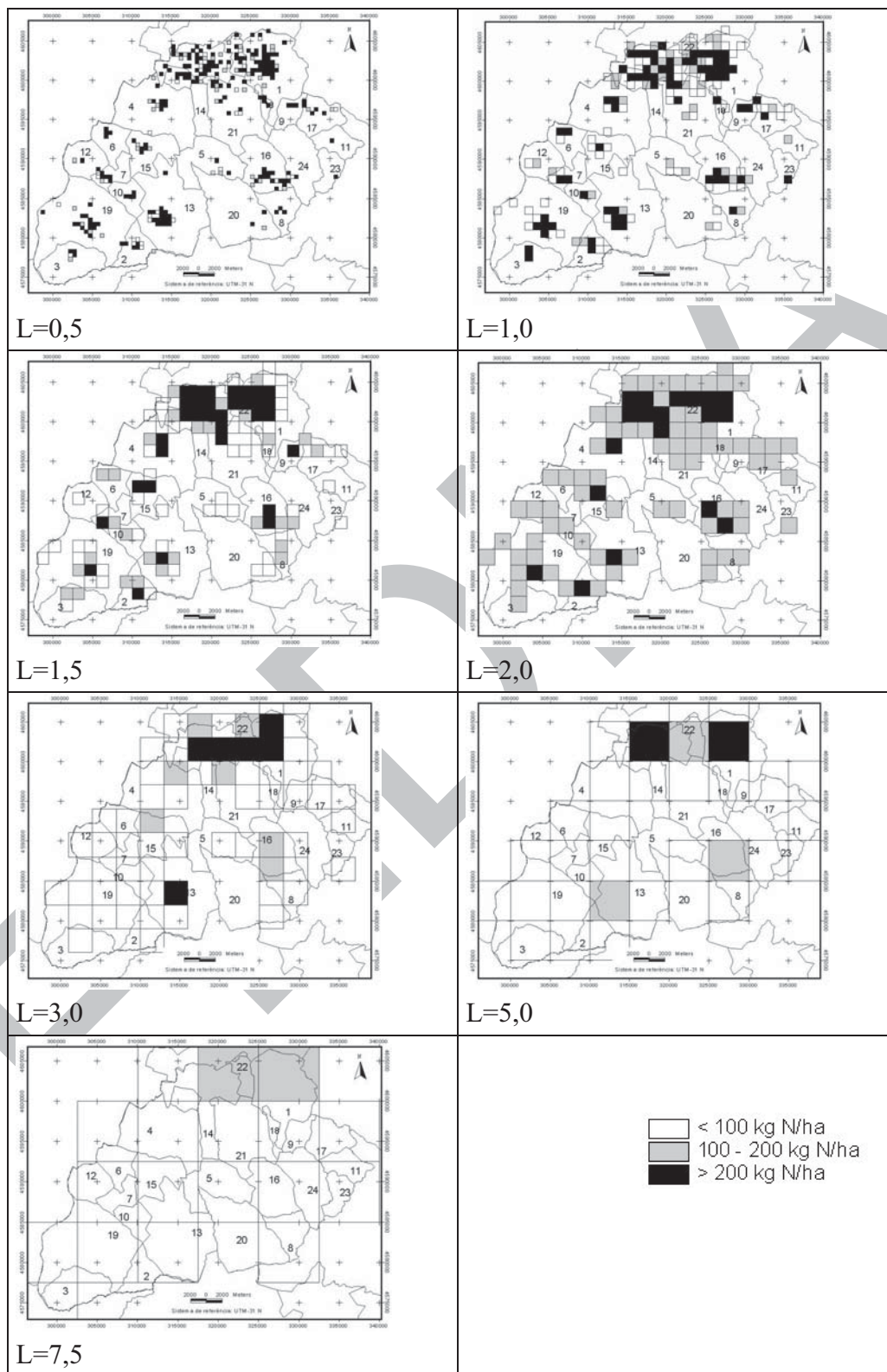
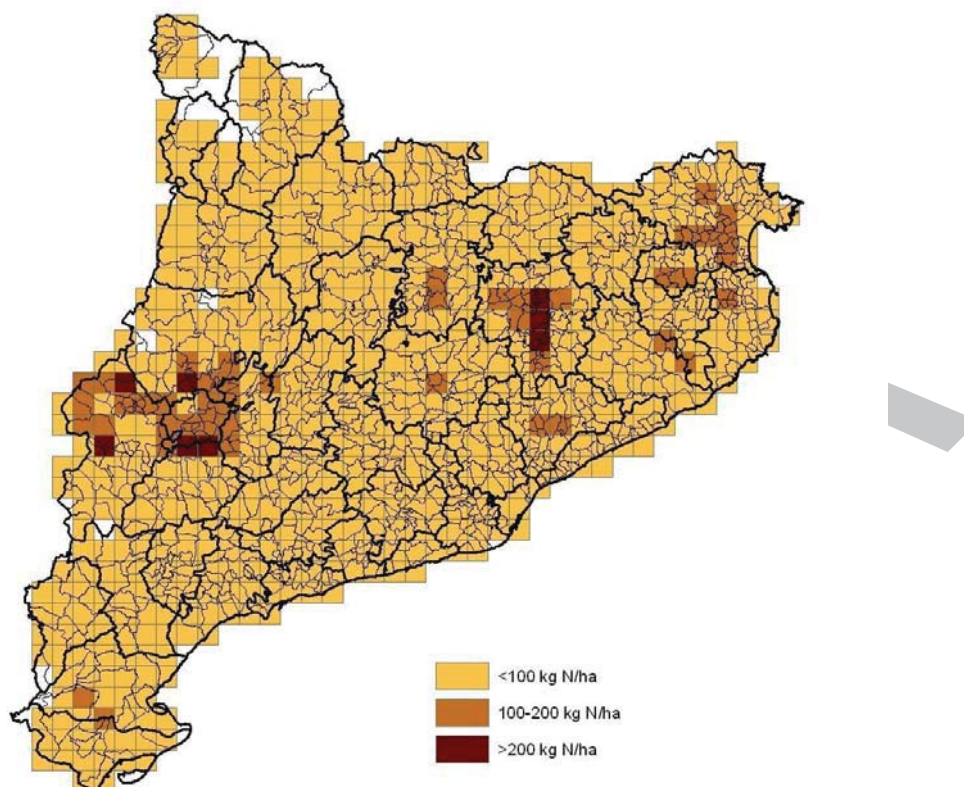


Figura 4.- Densidad de producción anual de nitrógeno de origen ganadero en Cataluña (kg N/ha) considerando cuadrículas de 7 km (Prenafeta-Boldú et al., 2005).



Dado que cada cuadrícula engloba superficie agrícola pero también urbana e industrial, la dosis de aplicación al suelo es necesariamente mayor que la de generación, por lo cual las cuadrículas con generaciones altas se corresponden necesariamente con las más problemáticas. Para decidir sobre la ubicación de posibles plantas de tratamiento es necesario considerar, también, la existencia de vías de comunicación, líneas eléctricas, óleo o gasoductos, disponibilidad de terreno, condiciones de inversión térmica, etc., (Teira y Flotats, 2001).

El estudio pormenorizado de la problemática de la zona norte de la comarca (Figura 3) concluyó con la necesidad de implantar un tratamiento de concentración térmica para facilitar la exportación de nutrientes a zonas lejanas con demanda de nutrientes (Bonmatí *et al.*, 2003; Palatsi *et al.*, 2005). En esta misma comarca (Figura 3) se aprecia una pequeña cuadrícula, en el sur, con alta intensidad de generación de nitrógeno para $L=3$ km, que se diluye al aumentar de tamaño. Ésta corresponde a una concentración de granjas de ganado bovino en el municipio de Juncosa, cuyo término municipal no presenta excedente de nutrientes según el balance realizado, pero en el que la distribución espacial de granjas, concentradas en una zona muy definida, crea un problema de transporte al suelo agrícola. El estudio particular para esta problemática concluyó con la necesidad de implantar un sistema de compostaje aerobio (Teira *et al.*, 1999)

5.- COSTES DE TRANSPORTE

El coste de transporte suele ser uno de los limitantes importantes a considerar cuando se planifica la gestión de las deyecciones. Este coste varía en función de la distancia y el volumen transportado y su incidencia cambia considerablemente en función del valor económico de los nutrientes transportados (Sangiorgi y Balsari, 1992) o del valor de la materia orgánica biodegradable como fuente de energía (Ghafoori y Flynn, 2007). Así pues, la distancia máxima de transporte permisible depende del valor económico de lo que se transporta. El coste de transporte se evaluó entre el 35% y el 50% de los costes de operación de las plantas de biogás centralizadas de Dinamarca en 1995, representando un ahorro importante si se optimizaba la logística de recogida y se mejoraban las instalaciones de carga de los camiones en cada granja (DEA, 1995).

El transporte de purines mediante tubería puede representar una alternativa económica en zonas de alta densidad de granjas, reduciendo el tráfico en carretera, riesgo de accidentes, generación de malos olores, emisiones de CO₂ y resistencias vecinales a la implantación de plantas centralizadas (Bjerkholt *et al.*, 2005; Ghafoori *et al.*, 2006). DEA (1995) ya proponía el estudio de esta opción en plantas centralizadas en Dinamarca, y algunos proyectos actuales lo están considerando.

El coste de transporte puede ofrecer un criterio simple para decidir la conveniencia de una tecnología de tratamiento. En este contexto, el tratamiento puede ser atractivo si el coste global de tratamiento, transporte y aplicación agrícola de los efluentes tratados es menor que el transporte y aplicación directa a los suelos accesibles, a las dosis adecuadas (Campos *et al.*, 2004). Por ejemplo, en la zona excedentaria del norte de la comarca de Les Garrigues (Figura 1), Bonmatí *et al.* (2003) concluyeron que la concentración mediante evaporación al vacío de purines, con producción previa de biogás, era interesante si el coste de tratamiento era menor que el coste de transporte de purines a distancias superiores a 100 km.

Yagüe y Iguácel (2007) y Yagüe *et al.* (2008) estudiaron el coste de transporte de purines de cerdo a fin de decidir la distancia máxima que permite económicamente la sustitución de fertilizante mineral. Evaluaron dos tipos de transporte: propiedad del granjero (10-20 m³ de capacidad) o servicio centralizado (tractor o camión de 20 m³ de capacidad). El servicio centralizado de transporte permitía optimizar la logística, el tiempo de utilización de los equipos y su amortización y, por tanto, una mejor evaluación económica. Sin necesidad de llegar a instalaciones de tratamiento centralizado, la gestión conjunta y la centralización de los servicios de recogida, transporte y aplicación, puede representar una opción ventajosa.

6.- ESTRATEGIAS TECNOLÓGICAS DE TRATAMIENTO

Como se ha indicado anteriormente, una estrategia de tratamiento es una combinación de procesos unitarios conducentes a modificar las características de las deyecciones, a fin de adecuarlos a las necesidades puestas de manifiesto en el PGN diseñado en función de los condicionantes locales (Teira-Esmatges y Flotats, 2003). No existe una solución tecnológica única aplicable en cualquier circunstancia y, obviamente, no existe ningún proceso capaz de eliminar las deyecciones. Tan solo las concentraciones de nitrógeno y materia orgánica pueden reducirse, transformando el nitrógeno en N_2 gas y el carbono orgánico en una forma reducida (metano, CH_4) o bien oxidada (dióxido de carbono, CO_2). En general, los componentes de las deyecciones pueden distribuirse en diferentes flujos a fin de mejorar la capacidad de gestión, es decir, mejorar la capacidad de toma de decisiones. El nitrógeno es el único nutriente que puede ser eliminado o recuperado y, por tanto, las estrategias tecnológicas se pueden clasificar teniendo en cuenta este hecho (Cuadro 4).

La separación de fases se puede aplicar como método simple para mejorar la capacidad de gestión. Permite separar en una fracción sólida, que puede ser compostada en la propia granja, transportada a larga distancia o transferida a una planta de compostaje centralizada, y en una fracción líquida que puede usarse en los cultivos más cercanos utilizando sistemas de irrigación o puede ser sometida a posterior tratamiento específico para esta fase (Møller *et al.*, 2002; Burton, 2007). La eficiencia en la separación puede mejorarse utilizando floculantes (Vanotti *et al.*, 2002; Campos *et al.*, 2008).

La recuperación del nitrógeno mediante *stripping*-absorción (Bonmatí y Flotats, 2003a), mediante concentración térmica (Bonmatí y Flotats, 2003b) o mediante precipitación de sales de fósforo y amonio – estruvita - (Uludag-Demirer *et al.*, 2005) se beneficia de una etapa previa de digestión anaerobia, como proceso proveedor de energía. Cuanto mayor sea la mineralización orgánica lograda durante la etapa de digestión mayor será la calidad de los corrientes recuperados ricos en nitrógeno. Resulta esencial el establecimiento de un mercado favorable para la comercialización de los productos obtenidos (Rulkens *et al.*, 1998) y unos precios de la energía que ayuden a la adopción de la digestión anaerobia para el éxito de la aplicación práctica de estos procesos. Han sido descritas experiencias exitosas de evaporación y concentración a escala de granja (Melse y Verdoes, 2005) y a escala colectiva (Palatsi *et al.*, 2005). Algunas experiencias fallidas a nivel colectivo en el pasado (Rulkens y ten Have, 1994; Rulkens *et al.*, 1998) muestran que los factores limitantes son los altos costes de operación, la falta de un marco adecuado de financiación y organización y la necesidad de una red bien establecida de distribución y comercialización de los productos obtenidos (Wossink y Benson, 1999). La aplicación de la codigestión anaerobia (digestión de mezclas de deyecciones ganaderas con otros residuos orgánicos -cosubstratos-), a fin de aumentar la producción de biogás y la venta de energía, puede ayudar a la viabilidad económica de las estrategias que incluyen digestión

(Hjort-Gregersen, 2002). La entrada en el sistema de nuevos residuos a utilizar como cosubstratos deberá de tenerse en cuenta en el PGN pues podrá afectar el balance de nitrógeno así como la calidad del digerido. Este tipo de estrategias se ven favorecidas mediante una aproximación colectiva a la problemática.

Cuadro 4. Estrategias tecnológicas basadas en la gestión del nitrógeno.

	Objetivo	Comentario
Estrategias basadas en la recuperación del nitrógeno		
Separación de fases	Separación de deyecciones en una fase líquida y una fase sólida, para favorecer otros tratamientos o para una gestión diferenciada.	Aplicable a deyecciones líquidas (purines).
<i>Stripping</i> de amoníaco y absorción	Recuperación de nitrógeno en forma de sal amoniacal o aguas amoniacales.	Aplicable a fracciones líquidas. La digestión anaerobia previa favorece el proceso.
Concentración térmica (evaporación al vacío y secado)	Concentración de nutrientes para favorecer el transporte.	La evaporación de puede aplicar a fracciones líquidas y el secado a concentrados y deyecciones sólidas. La digestión anaerobia previa favorece el proceso.
Precipitación de sales de amonio (estruvita)	Recuperación de nitrógeno en forma de sales de fósforo y amonio.	Aplicable a fracciones líquidas. Procesos previos de reducción en el contenido de materia orgánica (digestión anaerobia) favorecen el proceso.
Compostaje	Recuperación de nitrógeno en forma orgánica.	Deben prevenirse las pérdidas de amonio por volatilización.
Estrategias basadas en la eliminación del nitrógeno		
Nitrificación-desnitrificación (NDN)	Eliminación mediante oxidación del amonio a nitrito/nitrato y posterior reducción a N ₂ gas .	Aplicable a fracciones líquidas. Se requiere materia orgánica biodegradable para la desnitrificación.
Nitrificación parcial - oxidación anaerobia de amonio (NP - <i>anammox</i>)	Eliminación mediante nitrificación parcial del amonio a nitrito y posterior reducción a N ₂ gas.	Aplicable a fracciones líquidas. Debe eliminarse la materia orgánica, pues es contraproducente. Menores requerimientos energéticos que el NDN convencional.

La eliminación de nitrógeno mediante el proceso convencional de nitrificación-desnitrificación (NDN) es un proceso bien conocido y que ha sido implantado mayoritariamente a escala de granja para reducir excedentes. La optimización del proceso mediante la operación vía nitrito en lugar del habitual nitrato permite una disminución en el consumo de oxígeno durante la nitrificación y de los requerimientos de materia orgánica para la desnitrificación (Magrí y Flotats, 2008; Magrí *et al.*, 2009). Sirva de ejemplo el caso de la Bretaña francesa, una de las regiones europeas con mayor intensificación en la producción porcina, con casi el 70% de su área geográfica presentando excedente de nitrógeno. En esta zona se ha incentivado la implantación de sistemas de eliminación biológica de nitrógeno a escala de granja habiéndose contabilizado unas 250-300 unidades de tratamiento que permiten eliminar entre 6 y 7000 t N/año (Béline *et al.*, 2004; 2008). Las emisiones gaseosas de amoníaco, óxidos de nitrógeno, metano y dióxido de carbono se vieron reducidas con este tratamiento en comparación con la gestión tradicional basada en e almacenaje mínimo durante 6 meses antes de la aplicación a los suelos agrícolas (Loyon *et al.*, 2007). Martínez y Burton (2008) destacan como factores de éxito de esta experiencia el reconocimiento por parte de los ganaderos que la gestión de las deyecciones es una parte de la producción animal, con la misma importancia que cualquier otra tarea de la cadena productiva.

Nuevos sistemas de eliminación de nitrógeno, todavía en fase de desarrollo, basados en la combinación de una nitrificación parcial y la oxidación anaerobia de amonio *-anammox-* (Hwang *et al.*, 2005; Karakashev *et al.*, 2008; Molinuevo *et al.*, 2009) representan una alternativa de tratamiento prometedora, ya que permitirían una valorización completa de la materia orgánica mediante digestión anaerobia y un ahorro significativo de energía eléctrica debido a un menor requerimiento de aireación durante la nitrificación.

7.- CONDICIONES DE CONTORNO QUE AFECTAN A LA IMPLANTACIÓN DE TRATAMIENTOS

Los condicionantes de contorno que afectan a la implantación, definición y éxito de tratamientos de residuos orgánicos son: 1) Características de cada residuo; 2) Incentivos para la producción de energía - Costes y precios de la energía; 3) Distancias y costes de transporte; 4) Demanda de fertilizantes (minerales, enmiendas orgánicas,...); 5) Prácticas de manejo de las granjas; 6) Posibilidad de tratamiento conjunto de residuos orgánicos diferentes; 7) Aceptación por parte de la población, en caso de tratamiento colectivo; 8) Planes de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero; 9) Grado de implicación de los ganaderos en la gestión y tratamiento.

Las características de cada residuo favorecen o penalizan posibles estrategias de tratamiento. Una estrategia tecnológica bien elaborada y asequible económicamente puede

ser una mala solución si el residuo no cumple con unas condiciones determinadas de composición y temporalidad en la generación. Así, el potencial de producción de metano de purines de cerdo almacenados durante 4 meses bajo emparrillado es del orden de 25% del potencial inicial de éstos; asimismo, un tratamiento térmico para favorecer la hidrólisis puede aumentar el potencial de producción de metano en un 60% para purines recién generados, mientras que puede hacerlo disminuir en un 30% para purines envejecidos bajo emparrillado (Bonmatí *et al.*, 2001). En general, mantener altos tiempos de retención de purines bajo emparrillado limita la viabilidad de procesos posteriores de tratamiento que requieran materia orgánica biodegradable, como desnitrificación, digestión anaerobia o compostaje de la fracción sólida, debido a que la descomposición que se pretende controlar y aprovechar se ha realizado con anterioridad de forma incontrolada.

A partir de datos de seguimiento de la composición de purines en granjas se pueden realizar las siguientes consideraciones (Bonmatí, 2001):

- a) Rango de variabilidad en la composición muy amplio, lo cual imposibilita la estandarización de métodos de tratamiento y obliga a un seguimiento permanente para adecuar las dosis de aplicación a cultivos.
- b) Elevado contenido en agua, lo cual limita económicamente cualquier práctica que conlleve transporte.
- c) Baja concentración de materia orgánica en comparación con otros residuos orgánicos. Junto con la elevada concentración de nitrógeno amoniacal con relación al orgánico, sitúa a los purines más cerca de un fertilizante mineral que de una enmienda orgánica. También implica un bajo potencial de producción de biogas y la dificultad de integrar la digestión anaerobia con la desnitrificación sin un aporte externo de materia orgánica.
- d) Materia orgánica mayoritariamente en forma particulada, lo cual implica que la velocidad de descomposición está limitada por el proceso de hidrólisis.
- e) Elevada concentración de macronutrientes (N, P y K), lo cual sitúa la aplicación como fertilizante en la máxima prioridad.
- f) Presencia de metales pesados (Cu y Zn), lo cual limita cualquier uso. En las concentraciones de Cu presentes en algunas granjas (> 100 mg/kg), éste puede ser tóxico para algunos procesos biológicos de tratamiento. La reducción de estos metales en las dietas se aprecia como el paso necesario para aumentar la capacidad de uso, gestión y tratamiento de los purines.
- g) Elevada alcalinidad, lo cual asegura estabilidad en el pH y la aplicabilidad de procesos como la digestión anaerobia o la nitrificación. También hace adecuados a los purines como co-substrato de digestión anaerobia de otros residuos orgánicos. Por el contrario, encarece los procesos que requieren una modificación del pH.

Una forma de superar limitaciones impuestas por las características de un residuo es la co-gestión y co-tratamiento conjunto con otros residuos, de forma que se compensen

carencias mutuas y se aprovechen las sinergias que aporta la complementariedad (Campos, 2001; Flotats y Campos, 2001; Flotats *et al.*, 2001).

La producción de energía primaria en Europa a través de la digestión anaerobia se estimaba en 2006 en unos 5,35 Mtep. De estos, 1,28 Mtep correspondieron a plantas de digestión anaerobia de residuos agropecuarios y fracción orgánica de residuos urbanos, y el resto a recuperación de biogás de vertederos y al tratamiento de lodos de aguas residuales municipales. La contribución de España se estimó en 2006 en 0,33 Mtep, con sólo 25,8 tep obtenidos de residuos agropecuarios y orgánicos municipales. La promulgación del RD 661/2007, que establece precios a la venta de energía eléctrica a partir de biogás, active el prometedor mercado del biogás en el sector primario.

El potencial de producción de biogás en el sector primario se estima en España (datos IDAE), a partir de datos de la cabaña ganadera para el sector porcino, bovino y avícola, en 1,5 Mtep/año, y un potencial total de los residuos orgánicos de unos 3 Mtep/año, adoptando hipótesis de descomposición parcial de la materia orgánica. En el sector ganadero, el sector porcino intensivo representa un potencial de 0,82 Mtep/año y el sector bovino de 0,57 Mtep/año. Mientras que el tipo de estabulación para el sector bovino puede limitar la realización de su potencial en algunos casos, el sector porcino intensivo presenta la ventaja de tener un control total sobre el volumen de purines que genera, que a su vez contribuyen de forma significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) si no se adoptan medidas mitigadoras, como la de producción controlada de biogás.

La emisión en España de GEI a la atmosfera se estimó en 2006 en 12,74 Mt equivalentes de CO₂ para las actividades de gestión de purines y estiércoles, según el Inventario Nacional de Emisiones GEI. Estas emisiones se deben mayoritariamente (70%) a las emisiones de metano de los purines líquidos durante su almacenamiento, el cual es, por otro lado, obligatorio para poder ajustar su producción a las necesidades de los cultivos como fertilizantes y para reducir su carga en patógenos. El metano tiene un efecto invernadero equivalente a 25 veces la del CO₂. Estas emisiones reducen el potencial de producción de biogás de los purines, pudiendo reducirlo en más del 70% para tiempos de almacenamiento previo a la digestión superiores a 3 meses (Bonmatí *et al.*, 2001). La digestión anaerobia de los purines tan pronto como se han generado, y el aprovechamiento energético del biogás producido, presenta un doble efecto sobre las emisiones GEI: reduce las emisiones de metano que de forma natural se emitirían a la atmosfera y se reduce las emisiones de CO₂ equivalentes a la energía fósil ahorrada. Este doble efecto confiere al proceso de digestión anaerobia de deyecciones ganaderas importancia estratégica para cualquier país y, concretamente en España, el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino ha preparado un ambicioso plan de biodigestión de purines (<http://www.mapa.es/es/ganaderia/pags/purines/purines.htm>).

La rentabilidad de las plantas de biogás, considerando los precios de venta de la energía eléctrica según el RD 661/2007, es muy sensible a la producción de biogás por tonelada de residuo digerido, pudiendo asegurar resultados favorables para producciones específicas superiores a 30 m³ biogás/t, dependiendo de los costes de inversión que, a su vez, presentan una marcada economía de escala (Flotats y Sarquella, 2008). Para purines de cerdo la producción específica se encuentra entre 10 y 20 m³/t debido a la baja concentración en materia orgánica, y aún inferior si el tiempo de almacenamiento previo es significativo. El método para conseguir producciones superiores a 30 m³ biogás/t es la codigestión, digestión anaerobia conjunta, de purines con residuos orgánicos de industrias agrarias y alimentarias con alto contenido en compuestos biodegradables y elevado potencial en producción de biogás, pero con composición deficiente para poder mantener un proceso de digestión estable por si solos. Así, por ejemplo, aceites vegetales y margarinas (potencial algo superior a 800 m³/t), tierras filtrantes de aceites (de 300 a 400 m³/t), pulpa de la industria de zumos de fruta (de 70 a 120 m³/t), fruta podrida (unos 60 m³/t), o lodos de flotación ricos en grasas de depuradora de aguas de industria cárnica (de 50 a 70 m³/t) presentan potenciales de producción interesantes, pero una composición deficiente en nutrientes o alcalinidad que no permite un proceso fácil de fermentación. La codigestión permite: 1) Aprovechar la complementariedad de las composiciones para permitir perfiles de proceso más eficaces; 2) Compartir instalaciones de tratamiento; 3) Unificar metodologías de gestión; 4) Amortiguar las variaciones temporales en composición y producción de cada residuo por separado; 5) Reducir costes de inversión y explotación, así como aumentar la producción efectiva media de biogás por encima de 30 m³ por tonelada de residuo tratado.

Con el objetivo de crear unas bases de conocimiento científico y tecnológico en España sobre la codigestión de deyecciones ganaderas con diversos residuos agroindustriales, así como contribuir a su difusión y popularización, en el año 2007 se creó un consorcio entre 28 entidades españolas de los campos de la investigación básica y aplicada (7 universidades y 6 centros de investigación o centros tecnológicos), empresas de ingeniería o del sector agroalimentario (11) y asociaciones u otras entidades públicas o privadas (4), para desarrollar sistemas sostenibles de producción y uso de biogás agroindustrial en España, bajo la denominación de proyecto PROBIOGAS, con un presupuesto de 6,6 M€. Esta iniciativa, coordinada por el Centro Tecnológico AINIA de Valencia, ha sido evaluada como proyecto singular y estratégico por el Ministerio de Ciencia e Innovación (www.probiogas.es).

Se considera que en el momento actual se dan sinergias sin precedentes en España para conseguir que la producción de energía renovable mediante digestión anaerobia, de residuos y subproductos agropecuarios, contribuya significativamente al balance energético del país, así como a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero. Para que también contribuya a la gestión racional de estos residuos como recursos agronómicos y se evite su impacto sobre la calidad de las aguas, deberá

complementarse la producción de biogás con sistemas tecnológicos y metodológicos de gestión de nutrientes. En este sentido, la única fuente de ingresos establecidos para la financiación de las instalaciones son la tarifa eléctrica (RD 661/2007) y las ayudas del Plan de Biodigestión de Purines, en el marco de las acciones para la lucha contra el cambio climático.

Estas ayudas económicas (energía renovable y mitigación gases efecto invernadero) difícilmente pueden cubrir en muchos casos todo el coste que representa la optimización de los planes de gestión de nutrientes, y se plantea la cuestión de si realmente deben cubrirlo, o hasta de si han de aportar beneficios económicos. Este es un debate abierto, en el que el autor piensa que lo importante es optimizar la actividad de producción ganadera, la integración de la gestión de deyecciones en las actividades usuales de producción y la internalización de los costes asociados, con reducción de estos mediante las ayudas anteriores, evitando su externalización.

8.- UNA PROPUESTA DE MÉTODO DE TOMA DE DECISIONES SOBRE LA ESTRATEGIA DE TRATAMIENTO

Los diferentes procesos de tratamiento se pueden combinar para dar lugar a una estrategia que de solución a la problemática concreta. La decisión sobre cual es la idónea no es simple, ya que las variantes ofertadas por cada empresa pueden ampliar las opciones por encima de las combinaciones básicas. Asimismo, puede haber soluciones tecnológicas muy diferentes que cubran los objetivos con la misma efectividad.

Las opciones se pueden agrupar en función del objetivo final a conseguir, y este depende básicamente de la problemática que deba solucionarse, de las características propias de cada granja, del grado de excedencia en nutrientes o de la seguridad, o confianza, que pueda dar el suministrador de la tecnología o el gestor autorizado en quien se delega la gestión.

La solución idónea, con sus variantes, depende básicamente del coste, el cual depende del caudal a tratar (función de cada granja), de los precios de la energía (depende de la política de primas vigente en cada momento), de las distancias y costes de transporte, y de la conveniencia de un tratamiento colectivo.

Una aproximación a una metodología de toma de decisiones para escoger la solución tecnológica a adoptar se muestra en las Figuras 5 y 6 (Campos *et al.*, 2004). En estas se toma como acciones base para tomar decisiones posteriores la realización de: 1) un plan de minimización de caudales y cargas (reducción del volumen de agua en las deyecciones y de compuestos limitantes –nitrógeno, fósforo,...), y 2) un balance de nutrientes, entre los producidos en las granjas y las necesidades de los cultivos. Estas dos

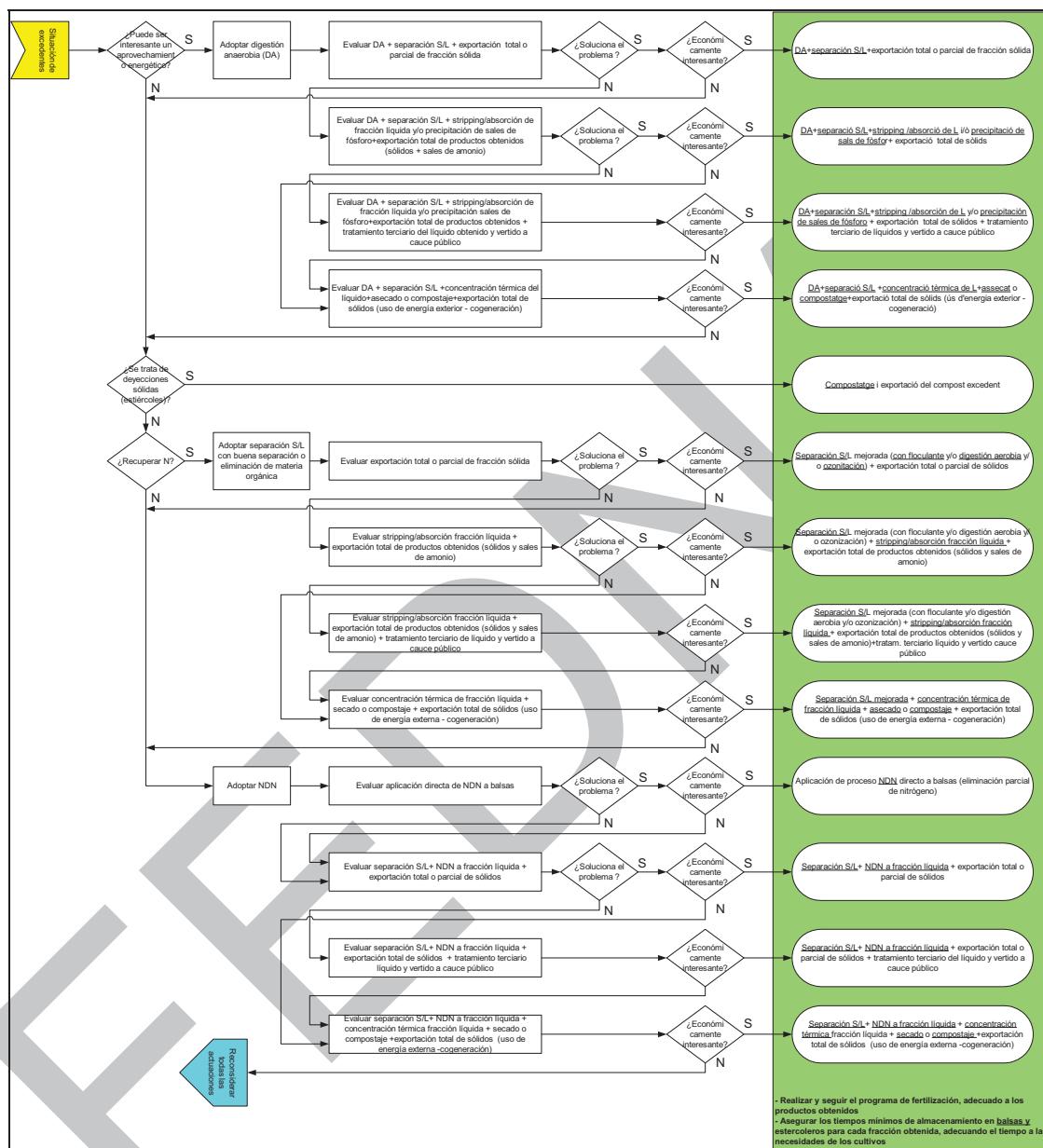
acciones han de dar respuesta a la pregunta de si se está en una situación de equilibrio o en una de excedente de nutrientes. En cualquiera de las situaciones se plantea la conveniencia de realizar una gestión individual o colectiva. En caso de gestión colectiva, debe crearse empresa, asociación u otra institución con entidad jurídica propia, que lidere y ejecute todas las actuaciones, desde la gestión del plan de fertilización del área de influencia hasta la gestión de las inversiones y subcontratación de la operación de la planta o plantas, que serán de su propiedad.

En caso de no excedencia de nutrientes, ya sea con gestión individual o colectiva, la solución tecnológica ha de poder mejorar la gestión de las deyecciones, ya sea desde el punto de vista práctico de mejora del manejo, como económico para reducir los costes de transporte y aplicación. En caso de excedencia de nutrientes (Figura 6), las soluciones tecnológicas se agrupan en 3 grandes grupos: 1) las soluciones que adoptan la digestión anaerobia y aprovechamiento energético del biogás; 2) las soluciones que se basan en el tratamiento físico-químico, para el cual los nutrientes se recuperan en forma sólida, y 3) las soluciones que adoptan el proceso de nitrificación-desnitrificación, para el cual parte del nitrógeno se elimina. Un apartado especial merece las deyecciones de consistencia sólida (estiércoles y gallinazas), las cuales tienen como mejor opción el proceso de compostaje y exportación del compost producido. En algún caso puede llegarse a plantear la producción de biogás con estas deyecciones, y por este motivo se llega a la decisión (en el diagrama) de conveniencia del compostaje si antes ya se ha valorado negativamente el interés técnico y/o económico de la digestión anaerobia.

Las tres grandes agrupaciones de opciones técnicas se presentan, cada una de ellas, con cuatro niveles diferentes de complejidad, de la más simple a la más compleja. Se inicia valorando si la más simple ya es suficiente para solucionar la problemática y en caso contrario se pasa a un nivel de complejidad superior, hasta llegar a aquella que es capaz de dar respuesta al problema. La más compleja corresponde a una estrategia que incorpore un proceso de concentración térmica (Flotats *et al.*, 2004). Si la más simple no es económicamente asumible, no es necesario pasar a la más compleja que todavía será más cara. En este sentido, el criterio primario de decisión es la capacidad para solucionar el problema, y el criterio secundario es el económico, a fin que una modificación coyuntural de precios no modifique apreciaciones técnicas, y que decisiones de presente no hipotequen soluciones técnicas de futuro.

En caso de no poder asumir el coste económico de ninguna opción técnica, el diagrama propone replantear el problema, y volver al inicio del proceso de decisión. Este replanteo indica que debe afrontarse con una perspectiva diferente el plan de minimización y el plan de gestión, pasando de una gestión individual a colectiva si esta aporta mejoras en las soluciones (economía de escala), o posiblemente transferir total o parcialmente las deyecciones a un gestor que ofrezca unas condiciones económicas asumibles.

Figura 6.- Diagrama de toma de decisiones para aproximarse a la solución tecnológica adecuada para la gestión de deyecciones ganaderas (continuación de Figura 5).



- Es siempre recomendable que las fracciones sólidas obtenidas, con contenido de materia orgánica, sean compostadas
- Puede llegar a ser interesante estudiar el posible aprovechamiento energético por digestión anaerobia:
 - Si hay demanda de energía térmica en la granja
 - Si hay línea eléctrica para evacuar la energía eléctrica producida excedentaria
 - Si, en general, hay un modo de rentabilizar el biogás producido.
- La cuestión "¿Soluciona el problema?" hace referencia a:
 - Consigue equilibrar el balance de nutrientes, o
 - Consigue solucionar el problema de transporte entre granja y parcelas de cultivos, o
 - En general, soluciona la problemática de la gestión de las deyecciones.
- La cuestión "¿Económicamente interesante?" hace referencia a:
 - Se considera que el coste económico es asumible
 - Se considera que es económicamente ventajoso respecto otras soluciones técnicas
 - Se considera que la relación prestaciones/coste es adecuada a las necesidades
- El objetivo del tratamiento terciario es la obtención del líquido final susceptible de ser vertido a cauce público, y evitar la inversión en infraestructuras de riego. Esto puede conseguirse, en función de las características del líquido, con:
 - Precipitación de sales (Separación sólido/líquido con aditivos específicos)
 - Separación con membranas

Una presentación dinámica de este proceso de toma de decisiones puede encontrarse en el sitio web <http://www.arc-cat.net/es/altres/purins/guia.html>, de la Agencia de Residuos de Catalunya. En esta misma referencia de Internet se encuentra una somera descripción de cada proceso unitario de tratamiento de deyecciones ganaderas y sus combinaciones, así como el trabajo de Campos *et al.* (2004) en el que se basan las presentaciones dinámicas.

9.- SÍNTESIS

Para el óptimo aprovechamiento de los purines como recurso es necesario abordar la gestión de forma integral, esto es, desde la minimización en origen de su producción, incidiendo en la alimentación y en la mejora de técnicas de manejo en granja, hasta los métodos de valorización agrícola final, teniendo en cuenta los aspectos organizativos y tecnológicos. La gestión integral ha de contemplar los aspectos económicos y, por tanto, la internalización de los costes en la actividad productiva. Integrar costes y beneficios ambientales ha de ser un elemento de competitividad para el sector. Abordar la problemática sólo con tecnologías de tratamiento puede ser un error. Así, invertir en plantas de biogás para tratar purines que han estado almacenados bajo *slat* varios meses puede ser contraproducente, ya que durante este tiempo los purines ya han desprendido biogás y amoníaco, que habrán respirado los animales, obligando a altas tasas de renovación de aire y ocasionando problemas respiratorios, así como emitiendo gases de efecto invernadero (GEI). Un cambio de diseño en las granjas, con almacenaje exterior cubierto de purines, ha de permitir las máximas cotas de transformación en biogás, la reducción de consumos energéticos y de emisiones GEI, la reducción de problemas respiratorios, mayor eficiencia en la producción de carne y mayor margen económico para abordar problemas ambientales.

Los cambios en la alimentación, a fin de tener un menor contenido de nitrógeno y fósforo en los purines, han de permitir reducir el problema de excedente de nutrientes y reducir costes de gestión, con menores necesidades de superficie para la aplicación agrícola. La minimización en el consumo de agua ha de permitir un menor volumen de purines y reducción de los costes de transporte. La cooperación entre ganaderos y agricultores, para una gestión colectiva del valor fertilizante de los purines, ha de permitir la optimización de la logística de aplicación.

Tecnológicamente se puede hacer prácticamente todo en el campo del tratamiento de las deyecciones ganaderas: separar fracciones líquidas y sólidas, compostar la fracción sólida, separar nitrógeno amoniacal para substituir fertilizantes minerales, producir energía mediante digestión anaerobia, eliminar parte del nitrógeno mediante nitrificación – desnitrificación, separar fósforo y amonio para obtener estruvita, y un largo etcétera. Pero ninguna de estas opciones tiene un coste nulo; su eficiencia y accesibilidad económica

dependen de los caudales y características de los purines, los cuales dependen de la estructura productiva de cada granja. El futuro de la gestión de los purines pasa por la mejora de esta estructura, contemplando la problemática de forma integral.

10.- RESUMEN

Como cualquier otra actividad industrial de transformación, la ganadería actúa sobre el entorno con grados diferentes de intensidad. No escapa a aquello que caracteriza al metabolismo industrial: consume materia y energía, y produce unos bienes y residuos. La consideración de las deyecciones como residuo o como recurso depende de su utilización, siendo el reciclaje como fertilizantes en las dosis adecuadas a los suelos y cultivos la estrategia más asequible de gestión y valorización como recurso.

No existen soluciones técnicas únicas a aplicar en cualquier circunstancia. Los requerimientos tecnológicos de tratamiento han de ser resultado de un plan de gestión por áreas geográficas, el cual ha de aportar una visión global de la problemática e integral de las soluciones. Los planes de gestión han de englobar desde las prácticas de minimización y prevención, y de planificación de las aplicaciones a suelos y cultivos, hasta las herramientas de internalización de costes. El sector debe desarrollar y dotarse de las herramientas organizativas y de gestión, de las cuales las estrategias tecnológicas de tratamiento son sólo un instrumento y no un objetivo en si mismo.

11.- REFERENCIAS

- BÉLINE, F., DAUMER, M.L. y GUIZIOU, F. (2004) *T. ASAE*. 47, 857-864.
- BÉLINE, F., DAUMER, M.L., LOYON, L., POURCHER, A.M., DABERT, P., GUIZIOU, F. y PEU, P. (2008) *Water Sci. Technol.* 57, 1909-1914.
- BJERKHOLT, J.T., CUMBY, T.R. y SCOTFORD, I.M. (2005) *Biosyst. Eng.* 91, 201-217.
- BONMATÍ, A. (2001) *Usos de la energía térmica para la mejora del proceso de digestión anaerobia de purines de cerdo y para la recuperación de productos de interés*. Tesis doctoral. Universidad de Lleida.
- BONMATÍ, A., FLOTATS, X., MATEU, L. y CAMPOS, E. (2001) *Water Science and Technology*, 44, 109-116.
- BONMATÍ, A., CAMPOS, E. y FLOTATS, X. (2003) *Water Science and Technology*, 48, 189-194.
- BONMATÍ, A. y FLOTATS, X. (2003a) *Waste Manage.* 23, 261-272.
- BONMATÍ, A. y FLOTATS, X. (2003b) *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 53, 21-31.
- BURTON, C.H. y TURNER, C. (2003) *Manure Management. Treatment strategies for sustainable agriculture*. Silsoe Research Institute. pp. 490.
- BURTON, C.H. (2007) *Livest. Sci.* 112, 208-216.

- CAMPOS, E. (2001) *Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos de la industria alimentaria*. Tesis doctoral. Universidad de Lleida
- CAMPOS, E., FLOTATS, X., ILLA, J., MAGRÍ, A., PALATSI, J. y SOLÉ, F. (2004) *Guia dels tractaments de les dejeccions ramaderes*. Noviembre 2004. Agencia de Residuos de Catalunya; <http://www.arc-cat.net/es/altres/purins/guia.html>.
- CAMPOS, E., ALMIRALL, M., MTNEZ-ALMELA, J., PALATSI, J. y FLOTATS, X. (2008) *Bioresource Technol.* 99, 387-395.
- DEA (1995) *Progress Report on the Economy of Centralized Biogas Plants*. Danish Energy Agency, Denmark.
- EEC (1991) *Directiva del Consejo 91/676/EEC, de 12 diciembre de 1991, sobre la protección de aguas contra la contaminación causada por nitratos de fuentes agrarias*. Comunidad Económica Europea, Bruselas, Bélgica.
- FLOTATS, X. y CAMPOS, E. (2001) *RETEMA, Revista Técnica de Medio Ambiente*, 81, pp 41-53.
- FLOTATS, X., CAMPOS, E. y PALATSI, J. (2004) Concentración de deyecciones ganaderas mediante procesos térmicos. En: *II Encuentro Internacional sobre Gestión de Residuos Orgánicos*. Pamplona.
- FLOTATS, X., CAMPOS, E., PALATSI, J. y BONMATÍ, X. (2001) *Porci; Monografías de actualidad*, 65, 51-65.
- FLOTATS, X., CAMPOS, E. y PALATSI, J. (2004) Concentración de deyecciones ganaderas mediante procesos térmicos. En: *II Encuentro Internacional Gestión de Residuos Orgánicos*. Universidad de Navarra, Pamplona.
- FLOTATS, X. y SARQUELLA, L. (2008) Producció de biogàs per codigestió anaeròbia. *Col·lecció Quadern Pràctic, número 1. Institut Català d'Energia*, Barcelona. pp. 55.
- FLOTATS, X., BONMATÍ, A., FERNÁNDEZ, B. y MAGRÍ, A. (2009) *Bioresource Technology*, 100, 5519–5526.
- GHAFOORI, E., FLYNN, P.C. y FEDDES, J.J. (2006) *Biomass Bioenerg.* 31, 168-175.
- GHAFOORI, E. y FLYNN, P.C. (2007) *Appl. Biochem. Biotechnol.* 136-140, 625-637.
- HEGG, R. (2008) En: *Libro de Actas del I Congreso Español de Gestión Integral de Deyecciones Ganaderas*. Magrí, A., Prenafeta-Boldú, F.X., Flotats, X. (eds.). Service Point. Barcelona. pp. 3-10.
- HJORT-GREGERSEN, K. (2002) En: *Economics of Sustainable Energy in Agriculture*. van Ierland, E.C., Oude-Lansink, A. (eds.). Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. pp. 177-188.
- HWANG, I.S., MIN, K.S., CHOI, E. y YUN, Z. (2005) *Water Sci. Technol.* 52, 487-494.
- KARAKASHEV, D., SCHMIDT, J.E. y ANGELIDAKI, I. (2008) *Water Res.* 42, 4083-4090.
- LOYON, L., GUIZIOU, F., BELINE, F. y PEU, P. (2007) *Biosyst. Eng.* 97, 472-480.
- MAGRÍ, A. y FLOTATS, X. (2008) *Biosyst. Eng.* 101, 239-259.

- MAGRÍ, A., GUIVERNAU, M., BAQUERIZO, G., VIÑAS, M., PRENAFETA-BOLDÚ, F.X. y FLOTATS, X. (2009) *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* **84**, 1202-1210.
- MAPA (2004) *Anuario de Estadística Agroalimentaria 2002*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. http://www.mapya.es/es/estadistica/Anu_02/indice.asp.
- MARTINEZ, J. y BURTON, C. (2008) En: *Libro de Actas del I Congreso Español de Gestión Integral de Deyecciones Ganaderas*. Magrí, A., Prenafeta-Boldú, F.X., Flotats, X. (eds.). Service Point. Barcelona. pp. 257-272.
- MELSE, R.W. y VERDOES, N. (2005) *Biosyst. Eng.* **92**, 47-57.
- MITC (2007) *Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Internet: <http://www.boe.es/boe/dias/2007/05/26/pdfs/A22846-22886.pdf>
- MOLINUEVO, B., GARCÍA, M.C., KARAKASHEV, D. y ANGELIDAKI, I. (2009) *Bioresource Technol.* **100**, 2171-2175.
- MØLLER, H.B., SOMMER, S.G. y AHRING B.K. (2002) *Bioresource Technol.* **85**, 189-196.
- PALATSI, J., CAMPOS, E., TORRES, M., JIMÉNEZ, M., PORRAS, S. y FLOTATS, X. (2005) En: *Proceedings of the 4th Internacional Symposium on Anaerobic Digestión of Solid Waste*, Copenhagen (Denmark), August 30 – September 2. Vol 2, pp 189-194.
- PRENAFETA-BOLDÚ, F.X., PÉREZ, A. y FLOTATS, X. (2005) *Anàlisi de la Distribució Espacial de Densitats de Producció de Dejeccions Ramaderes i dels Factors Limitants per a l'Aplicació de Tecnologies de Tractament*. ICAEN (Instituto Catalán de Energía). 32 pp.
- RULKENS, W.H., KLAPWIJK, A. y WILLERS, H.C. (1998) *Environ. Pollut.* **102**, 727-735.
- RULKENS, W.H. y TEN HAVE, P.J.W. (1994) *Water Sci. Technol.* **30**, 157-165.
- SANGIORGI, F. y BALSARI, P. (1992) *Supplemento a l'Informatore Agrario* **18**, 45-50.
- TEIRA, M.R., FLOTATS, X., CASAÑÉ, A., MAGRÍ, A., MARTÍN, P., MONTANÉ, L., TARRADAS, J., CAMPOS, E. y BONMATÍ, A. (1999) En: *Avances en Ingeniería Ambiental. Jornadas Internacionales de Ingeniería Ambiental. Volumen 1: Aire, Suelos, Residuos y Modelización Ambiental, parte ,3 Residuos: 292-303*.
- TEIRA, M.R. y FLOTATS, X. (2001) En: *Aplicación agrícola de residuos orgánicos*. Boixadera, J. y Teira, M.R. (Eds). Edicions de la Universitat de Lleida.. pp. 309-327.
- TEIRA, M.R. y FLOTATS, X. (2003) *Waste Management.* **23**, 917-932.
- THOMPSON R.B., MORSE D., KELLING K.A. y LANYON L.E. (1997) *J. Prod. Agric.* **10**, 58-69.
- ULUDAG-DEMIRER, S., DEMIRER, G.N. y CHEN, S. (2005) *Process Biochem.* **40**, 3667-3674.
- VANOTTI, M.B., RASHASH, D.M.C. y HUNT, P.G. (2002) *T. ASAE* **45**, 1959-1969.
- WOSSINK, A. y BENSON, G. (1999) En: *Emerging Environmental and Natural Resources Issues in the South*. Clearwater, Florida, USA.

- YAGÜE, M.R. y IGUÁCEL, F. (2007) En: *Informaciones Técnicas del Departamento de Agricultura y Alimentación del Gobierno de Aragón*, 178.
- YAGÜE, M.R., IGUÁCEL, F., ORÚS, F. y QUÍLEZ, D. (2008) En: *Libro de Actas del I Congreso Español de Gestión Integral de Deyecciones Ganaderas*. Magrí, A., Prenafeta-Boldú, F.X., Flotats, X. (Eds.). Service Point. Barcelona. pp. 249-252.

FEDNA