



Foto: AXON COMUNICACIÓN

› 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 de 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 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 por el balance energético. Las instalaciones deben tener un diseño simple y el granjero debe integrar 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 una 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, 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 la decisión sobre el tratamiento conjunto o individual.

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

En el cuadro 3 se indican factores que influyen 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.

► 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 alre-

dedor de ventajas económicas, ligadas a condiciones climáticas, el acceso a transporte de bajo coste, la existencia de infraestructuras tales como fábricas de pienso, 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 en Cataluña a fin de identificar zonas en las que los tratamientos centralizados pudieran ayudar a la gestión de las deyecciones (Figura 4).

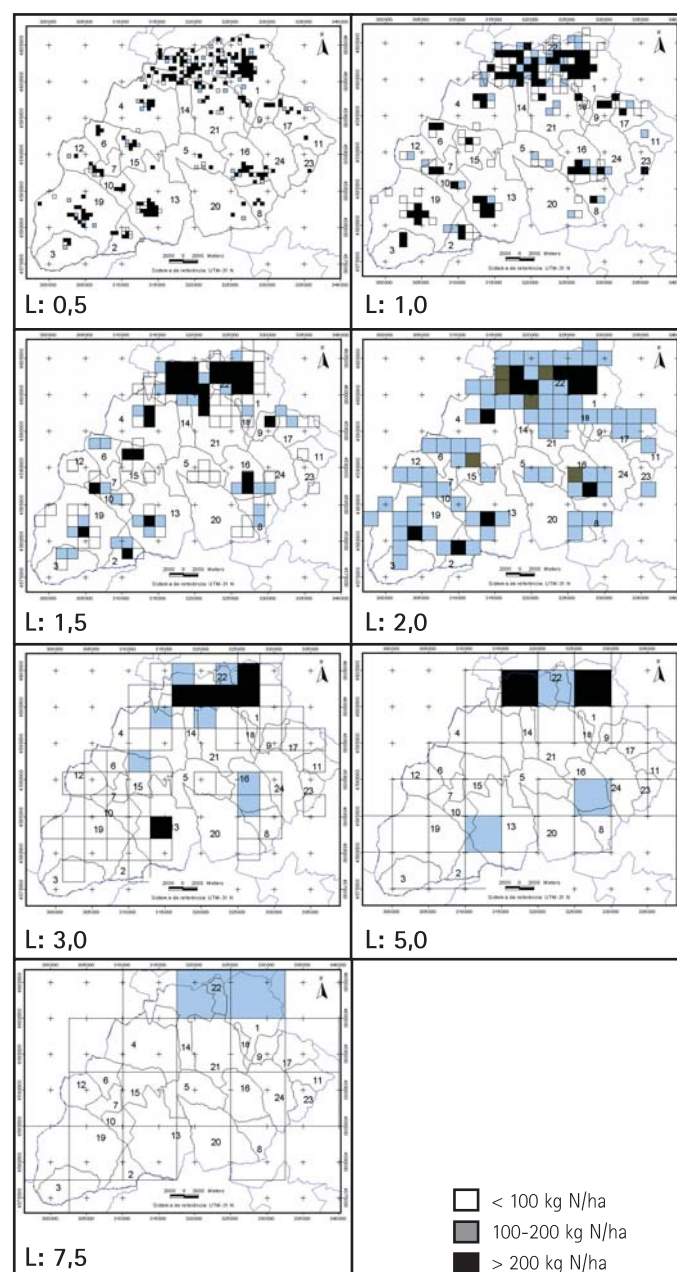
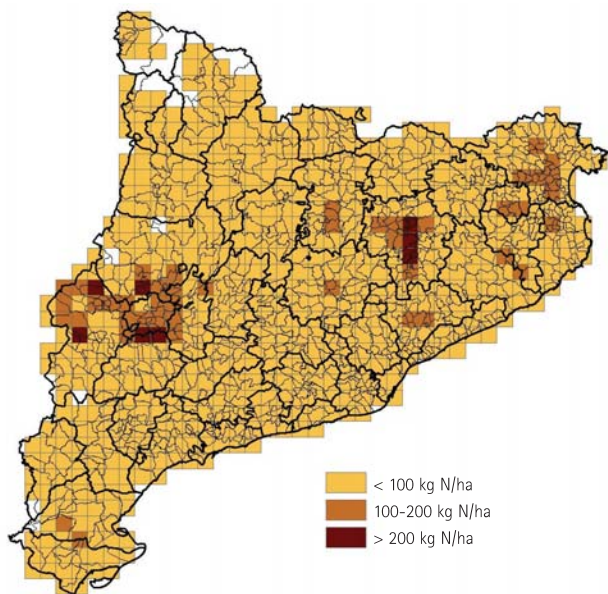


Figura 3: Producción de nitrógeno de origen ganadero en la comarca de les Garrigues (Lérida), para cuadrículas de diferente tamaño L en Km (Teira y Flotats, 2003).



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, oleo 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=3km, que se diluye al aumentar el 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).

► Costes de Transporte

El coste de transporte suele ser uno de los limitantes 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 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 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 100km.

Yagüe e 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.

► 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 N₂ gas y el carbono orgánico en una forma reducida (metano, CH₄) o bien oxidada (dióxido de carbono, CO₂). 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 tra-

tamiento 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 (Bonmati y Flotats, 2003a), mediante concentración térmica (Bonmati 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 cosubstrato deberá de tenerse en cuenta en el PGN pues podrá afectar al balance de nitrógeno así como la calidad del digerido. Este tipo de estrategias se ven favorecidas mediante una aproximación colectiva a la problemática.

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 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 amoniaco, óxidos de nitrógeno, metano y dióxido de carbono se vieron reducidas con este tratamiento en comparación con la gestión tradicional basada en el almacenaje mínimo durante 6 meses antes de la aplicación a 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 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 amoniaco –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.

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)
Stripping de amoniaco 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 se 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 nitrógenos en forma de sales de fósforo y amoniaco	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-anammox)	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 NDN convencional