

REVISTA DE ESTUDIOS REGIONALES

I.S.S.N.: 0213-7585

2ª EPOCA Enero-Abril 2018



111

SUMARIO

Manuel de Maya Matallana, María López Martínez y Prudencio José Riquelme Perea. Estimación del bienestar socioeconómico de las comarcas de la Región de Murcia

Anselmo Carretero Gómez, Jaime de Pablo Valenciano, Juan Francisco Velasco Muñoz. Recursos endógenos mineros y desarrollo territorial. El caso de la comarca del Mármol (Almería, España)

Paula Sánchez Acereda y Yolanda Martínez Martínez. Combinación de instrumentos económicos para el control de la contaminación difusa en el sector porcino de Aragón

Silvana Jiménez y Rafael Alvarado. Especialización sectorial, capital humano e ingreso regional en Ecuador

María Rosa Herrera, Cristina Mateos Mora y Clemente Navarro Yañez. Difusión y efectos del movimiento 15M en Andalucía: mayo de 2011

Juana M^a Morcillo Martínez, Eva M^a Sotomayor Morales y Yolanda M^a de la Fuente Robles. La triada: inicio, tránsito y consolidación versus retorno de mujeres que emigran desde Tánger a Andalucía en un contexto de crisis económica

Francisco Javier Correa Restrepo, Juan David Osorio Múnera y Carolina Andrea Carreño Campo. Estimación de la relación entre el ruido y la molestia generada por el tráfico vehicular: una aplicación en la ciudad de Medellín, Colombia

Textos

Combinación de instrumentos económicos para el control de la contaminación difusa en el sector porcino de Aragón

Combination of economic instruments to control nonpoint pollution of swine production in Aragón

Paula Sánchez Acereda

Yolanda Martínez Martínez

Instituto Agroalimentario de Aragón (IA2) (Universidad de Zaragoza-CITA)

Recibido, Septiembre de 2016; Versión final aceptada, Julio de 2017.

PALABRAS CLAVE: Contaminación por nitratos, Sector porcino, Instrumentos económicos.

KEYWORDS: Nitrate pollution, Swine industry, Economic instruments.

Clasificación JEL: Q15, Q53, Q58.

RESUMEN:

La contaminación por nitratos derivada de la actividad ganadera es un problema de gran relevancia social en muchas zonas de Aragón, donde la elevada concentración de explotaciones porcinas supone una amenaza para la calidad de los cursos de agua. El objetivo de este trabajo es diseñar una combinación de instrumentos económicos eficientes que pueden reducir las exigencias de información y control respecto al basado en un *impuesto pigouviano* sobre las emisiones contaminantes. El análisis teórico se completa con una aplicación numérica, para la cual se utilizan datos de una explotación típica de la región de estudio.

ABSTRACT:

Nonpoint source pollution from livestock activities is a relevant economic and social problem in many areas of Aragon, a Spanish region where the high concentration of pig farms is a potential threat for water resources quality.

Designing an environmental policy to control nonpoint pollution is very difficult in practice. Due to the lack of powerful instruments, regulation in European Union member states is concentrated on command and control instruments (like technology related standards and best management practices). But these instruments often do not introduce economic incentive and farmers do not act voluntarily. In addition, since information problems prevent the use of first-best instruments, a theoretical rationale for combining instruments may exist.

In this paper a combination of incentives to reduce nitrate emissions due to pig slurry management is proposed. The aim of this study is to obtain the combination of taxes and subsidies that attain the social optimum conditions and reduce the need for monitoring and enforcement.

The theoretical approach of this work is based in a partial equilibrium model where a central regulator that maximizes social benefits of the region exists. In the private problem we assume the existence of a fixed number of perfectly competitive farmers that produce swine and use pig slurry as a fertilizer to cultivate crops. There are two decision variables in the maximization model: nitrogen and land use. In our analysis we aim to determine the first order conditions for the social and private maximization problems separately and then to design the policy instruments that can induce the social optimum. Five alternative situations have been considered: 1) the regulator have perfect information on emissions, 2) The regulator can only observe outputs of both production activities, 3) and 4) The regulator can observe only one output and one input, 5) The regulator can observe all inputs of agrarian activity.

The results show that social optimum can be attained through several combinations of taxes and subsidies. Specifically, we obtain that the pigouvian tax on nitrate emissions can be substituted by taxes on pigs and crop yield, taxes on pigs and land use, taxes on crop yield and land use or taxes on nitrogen input and land use. Moreover, we discuss the influence of the particular specification of emissions function on the sign of the alternative instruments. In the case of strictly convex pollution function, we obtain that in situations 4 and 5, the taxes on land use become negative (subsidies) while the sign of instruments in situations 2 and 3 cannot be determined *a priori*. In the case of strictly concave function, the taxes on land use become positive (true taxes) in situation 4 and 5. Finally, a linear emissions function imply that the taxes on land use in situations 4 and 5 and the tax on crop yield in situation 2 become zero, meaning that regulator can substitute the emission tax by a unique tax on polluting productive activity (pigs), on polluting input related with productive activity (nitrogen) or a combination of a non-polluting activity tax (yield crop production) and a non-polluting input subsidy (land use).

From the perspective of the information needs for the designed two-part instruments, their advantage is they can partially avoid the obstacle for the regulation of nonpoint pollution since emissions are either not observable or cannot be observed at a reasonable cost. The design of these instruments requires that the regulator can monitor the amount of outputs and inputs used by farmers, which in principle be expected to be easier to obtain than emissions. Moreover, the regulator should know the value of the marginal damage of pollution and the first derivative of pollution function (portion of the total nitrogen used emitted for the case of linear function).

The numerical illustration of our study requires the functions and parameters of the theoretical model to be specified. Our study is based in real data from a typical farm located in Aragon, an autonomous community in Northeast Spain which is one of the main areas of intensive pig farming in the country and also in the European Union. Spain has the second largest swine population in the European Union, with 18% of the total production and Aragon accounts for 26.5 % of the total Spanish swine production.

For our numerical analysis we consider the operational costs of an average farm located in the study area. The farm model reproduces the typical conditions of the region with respect to the farm size and biophysical data. The crop production is a strictly concave function of applied nitrogen and the emissions function follows a linear specification.

In the results section the social and private values for all the outputs and inputs considered in the model are calculated and also we obtain the farmer's private benefit. Moreover, in order to analyse the current legislation in the European Union, we also consider the effects of an upper limit for swine manure application of 210 kg/ha and 170 kg/ha in vulnerable designated zones on social and private values. The results show that attaining the social optimum implies a reduction of 7.5 % in nitrate emissions with a reduction of 29.5 % in the farmer's private benefits. The calculation of taxes for the case of linear pollution function shows positive values for crop production (proper tax) and negative value for land use (subsidy) in situation III, and positive values for swine production and nitrogen input in the rest of situations.

We conclude that the particular specification of emission function is a crucial aspect of the instruments design. Thus our findings highlight the importance of environmental regulators to invest

in systems that provide greater information on nonpoint pollution problems by undertaking its own research to gather data, building long-term institutional relationships with regulated farmers and creating reward structures that give farmers incentives to reveal information truthfully to the regulator. Our results aim to contribute to the literature on the design of specific control measures for the case of nonpoint pollution problems derived from livestock production.

1. INTRODUCCIÓN

Las actividades agrarias y ganaderas suponen, según la Agencia Europea del Medio Ambiente (2015), la primera causa del deterioro de la calidad del agua en más del 40 por ciento de los ríos y costas europeos. Una de las zonas en Europa con mayor presión ganadera y donde más preocupa el problema de contaminación difusa se localiza en el noreste de España. Esta región es una de las principales zonas de producción intensiva de porcino en España, que es el segundo país de la Unión Europea (UE) con mayor producción, después de Alemania. España representa el 18% del total de la producción en la UE, con una fuerte tendencia creciente durante los últimos 10 años.

Aragón es la comunidad autónoma que ocupa el segundo puesto en la producción de cerdos, después de Cataluña, con un 26,5% respecto a la producción total española. El desarrollo del sector ha seguido en la región una tendencia ascendente continuada a lo largo de los años, duplicándose entre 1999 y 2009 el número de cabezas producidas. Actualmente, Aragón cuenta con más de 3900 explotaciones con más de 6.900.000 animales (Magrama, 2015).

Los primeros estadios de la política ambiental se caracterizaron por la regulación de la contaminación de origen localizado o puntual. Esto se debió en parte a la fácil identificación de las fuentes que emiten este tipo de contaminación y al extendido consenso sobre la necesidad de su regulación. Por el contrario, la regulación de la contaminación difusa empezó mucho más tarde y todavía está lejos de ser un problema resuelto. Desde una perspectiva económica, el control de la contaminación difusa se caracteriza por la complejidad y la incertidumbre sobre las fuentes y cuantía en que éstas contribuyen al nivel final de emisiones.

Uno de los principales problemas en el control es la dificultad que el regulador puede encontrar para obtener la información necesaria para implantar un determinado instrumento: debe conocer el valor económico de los daños ambientales producidos, los impactos de la reducción de la contaminación (daños evitados), y también los parámetros y funciones de las empresas o agentes implicados, etc. Pero además, toda esta información está afectada en gran medida por la incertidumbre respecto a los procesos biológicos, ecológicos y físicos implicados en muchos procesos de contaminación. Este es el caso de la contaminación difusa generada por la agricultura y la ganadería, en la que la incertidumbre afecta no sólo

a la localización de las fuentes, sino también a los procesos de transporte de los contaminantes a los cursos del agua.

En general, los economistas tratan de buscar soluciones que sean eficientes, flexibles y baratas de administrar, que tengan efectos deseables a largo plazo y que mantengan ciertas propiedades con respecto a la equidad. Pero la información imperfecta no solo restringe la capacidad del regulador para idear buenos objetivos y para alcanzarlos al mínimo coste, sino que también complica considerablemente la elección del instrumento adecuado, porque las ventajas comparativas de unos y otros dependen de las características de cada caso particular (Panagopoulos *et al.*, 2011). Cuanto mayor es la incertidumbre, mayores son los costes de transacción, y la consideración de estos costes puede modificar completamente la jerarquía de los instrumentos respecto a su eficiencia. En consecuencia, resulta muy complejo extraer conclusiones generales respecto a la idoneidad de los distintos instrumentos en contexto de incertidumbre (Perman *et al.*, 2003).

Estos problemas han conducido a que la regulación en los países de la Unión Europea se base generalmente en controles directos sobre los insumos, las tecnologías o las prácticas de gestión (limitaciones de fertilizantes y códigos de buenas prácticas en el caso de la agricultura y ganadería). Sin embargo estos instrumentos, aparte de no ser coste-eficientes, tampoco incluyen incentivos económicos y por tanto los agentes no actúan voluntariamente, por lo que a menudo resultan poco eficaces en el logro de los objetivos de reducción de contaminación (Abdalla *et al.*, 2007).

Ante este escenario, los economistas han buscado soluciones basadas en combinaciones de instrumentos que generen incentivos a revelar la información de los agentes implicados y también comportamientos compatibles con los objetivos del regulador. En este ámbito, Walls y Palmer (2001), Srivastava y Kavi (2014) y Fullerton y Wolverton (2000) han propuesto un tipo de instrumentos basados en incentivos económicos que mantienen las propiedades de un *impuesto pigouviano* óptimo y reducen la necesidad de control. Estos instrumentos consisten en un impuesto sobre el producto o input contaminante acompañado de una subvención asociada al reciclado del producto en el final de su vida útil, o al uso de una tecnología limpia. Se trata por tanto del sistema típicamente utilizado para el reciclaje de botellas de vidrio o de baterías, pero a diferencia de éste el impuesto y la subvención asociada no tienen por qué ser de la misma cuantía ni recaer sobre el mismo producto o sobre el mismo agente.

Pese a sus posibilidades, este tipo de instrumento no ha sido suficientemente explorado para el control de la contaminación difusa. En el presente trabajo se presentará un ejemplo de este tipo de medidas en que el regulador puede escoger una combinación de instrumentos para eludir el problema de información que afecta al control de emisiones de nitratos generadas por la ganadería del sector porcino. Para ello se diseñarán diversas combinaciones de instrumentos basados

en incentivos económicos que permiten obtener la solución socialmente eficiente, que se alcanzaría con un impuesto sobre las emisiones contaminantes. El modelo teórico se aplica numéricamente a una explotación de Aragón, donde la elevada concentración de granjas porcinas en algunas zonas de la región supone una amenaza para la calidad de los cursos de agua. En la siguiente sección se expone el modelo teórico y se presentan las distintas alternativas de control basadas en instrumentos en dos partes. Posteriormente se presentan las características de los datos utilizados en la aplicación numérica del modelo.

2. MODELO TEÓRICO

El enfoque teórico de este trabajo se basa en la definición de un modelo de equilibrio parcial en el que se asume la existencia de un regulador central que maximiza el beneficio social (*BS*), calculado como la diferencia entre el beneficio privado (*BP*) obtenido por la actividad ganadera y el valor económico del daño provocado por esta actividad como consecuencia de la contaminación de los cursos de agua por nitratos.

Se supondrá la existencia de un número fijo m de ganaderos en la región en un entorno de competencia perfecta y con idénticas características respecto a la tecnologías de producción utilizadas y a los precios percibidos y costes unitarios pagados¹. Asimismo, se considera que la actividad principal de un ganadero “tipo” es la producción de cerdos bajo el sistema denominado de “integración”.² Bajo este sistema, el ganadero percibe una cantidad fija o precio pactado por cada cerdo durante el periodo de vigencia del contrato de integración, que le permite escapar del riesgo asociado a la variabilidad de los precios de mercado. La actividad genera gran cantidad de purines como subproducto, que pueden ser utilizados como fertilizante orgánico en la producción de maíz, para lo cual dispone de una superficie total de s hectáreas de terreno agrícola. Esto supone la ventaja para el ganadero de que, además de no tener que incurrir en costes para deshacerse de los desechos porcinos, obtiene un ingreso adicional generado por la venta del cultivo fertilizado con purín. Se supondrá que en la producción del maíz el factor productivo principal

- 1 En el anexo 1 se presenta el modelo teórico relajando el supuesto de homogeneidad de los agentes.
- 2 Se entiende por integración el sistema de gestión de la explotación ganadera destinado a obtener productos pecuarios en colaboración entre dos partes, una de las cuales, llamada integrador, proporciona los animales y otros medios de producción y servicios pactados en contrato correspondiente (habitualmente los piensos utilizados para la alimentación), y la otra, llamada integrado, aporta las instalaciones y los demás servicios necesarios, comprometiéndose al cuidado y mantenimiento del ganado.

es el nitrógeno de origen orgánico. El BP se calcula por tanto como la suma de beneficios obtenidos de las actividades ganadera y agrícola.

El objetivo del presente análisis teórico consiste en determinar las condiciones de maximización de los problemas social y privado separadamente, y en diseñar un conjunto de instrumentos económicos que posibiliten que tales condiciones coincidan. Se plantearán para ello distintas situaciones en las que se comparará el tipo de información requerida y se discutirá su aplicabilidad.

El problema del regulador queda descrito en la siguiente expresión:

$$BS = [p_c \cdot q_c(n_p) - c_{np} \cdot n_p - Z + p_m \cdot q_m(n) - p_s \cdot K] \cdot s \cdot m - D(E) \quad (1)$$

Donde $q_m(n)$ y $q_c(n_p)$ representan, respectivamente, las funciones de producción de maíz (en t/ha) y cerdos (en cabezas/ha); la variable n_p denota la cantidad de purín generado en la actividad ganadera (en kgN/ha)³ y la variable n es la cantidad de purín aplicado como fertilizante y disponible para ser tomado por el cultivo (en kgN/ha)⁴; p_m es el precio de mercado del maíz (en €/t) y p_c el precio pactado obtenido de cada cerdo por el ganadero (en €/cabeza); K representa la suma de los costes fijos derivados de la actividad agrícola, tales como semillas, fitosanitarios, riego, mecanización, secaje, canon básico y mantenimiento (en €/ha) y Z la suma de los costes fijos asociados a la producción porcina (costes de mantenimiento y amortización, en €/ha); c_{np} es el coste de gestión del purín (en €/kgN); p_s corresponde al precio de la tierra, que es el coste de arrendamiento que soporta el ganadero (en €/ha) y s la superficie total de tierra arrendada disponible para el cultivo de maíz (en ha). Finalmente, $D(E)$ representa la función de daño derivado de las emisiones contaminantes E de todos los ganaderos de la región como consecuencia de la aplicación del nitrógeno en forma de purín al cultivo de maíz, donde la primera derivada de la función respecto a las emisiones es $D' > 0$. Por su parte, las emisiones totales se calculan como $E = e \cdot s \cdot m$, donde e es la cantidad de emisiones por hectárea de un ganadero tipo (en kgN).

Las emisiones de nitrógeno por hectárea e generadas se calculan como una función de contaminación $e = \theta(n_p)$ que depende del nitrógeno purín aplicado n_p , asumiendo que es creciente $\theta' > 0$. Como se verá, la forma funcional de la función de contaminación tiene implicaciones relevantes en el análisis, por lo que se con-

3 La magnitud kgN se refiere específicamente al contenido de nitrógeno en el ión nitrato NO_3^- -N.

4 La cantidad de nitrógeno contenida en los purines puede ser muy variable en función de la alimentación que reciben los animales y del tipo de explotación (cebaderos, ciclos cerrados, hembras o machos reproductores, lechones). Para este trabajo se ha escogido el valor para cebo en integración indicado en Gobierno de Aragón (2005), que es el estudio técnico más reciente existente para este tipo de producción.

siderará la posibilidad de que ésta sea lineal ($\theta'' = 0$), estrictamente cóncava ($\theta'' < 0$) o bien estrictamente convexa ($\theta'' > 0$).

Dado que existe una relación fija entre la producción de cerdos y la cantidad total de purines generados, todos los costes de producción se pueden atribuir a la cantidad de purines en lugar de a las cabezas de cerdo producidas. Igualmente, la función de producción anual de cerdos por hectárea se puede relacionar con la

cantidad de purines generados a través de la función $q_c = \frac{n_p}{\gamma}$, donde el parámetro γ representa la cantidad de purines (en kgN) generada por un cerdo. Por tanto, la producción total de cerdos se calcula como $\bar{q}_c = q_c \cdot s \cdot m$.

Por su parte, la función de producción de maíz de cada agricultor q_m (t/ha) depende únicamente de la cantidad de nitrógeno n disponible para el cultivo, que es igual a $n = n_p - \theta(n_p)$ es decir, la cantidad de nitrógeno purín aplicado menos las emisiones. La producción de maíz total en la región se calcula como $\bar{q}_m = q_m \cdot s \cdot m$. Se asume también que la función de producción es estrictamente cóncava respecto de n , es decir $q_m'' < 0$.

La maximización del problema social respecto a n_p y s , conduce a las siguientes condiciones de primer orden:

$$\frac{\partial BS}{\partial n_p} = 0 \Leftrightarrow p_m \cdot q_m' \cdot (1 - \theta') + \frac{p_c}{\gamma} - c_{np} - D' \cdot \theta' = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial BS}{\partial s} = 0 \Leftrightarrow p_m \cdot q_m + p_c \cdot \frac{n_p}{\gamma} - K - Z - c_{np} \cdot n_p - p_s - D' \cdot \theta = 0 \quad (3)$$

Las condiciones (2) y (3) establecen que los factores de producción n_p y s deben emplearse hasta que el beneficio marginal social sea igual al coste marginal social. En el caso de la ecuación (2), el beneficio marginal social corresponde al valor de la producción marginal obtenida por cada unidad adicional de *input* n_p utilizada en las dos actividades (producción de cerdos y maíz), mientras que el coste marginal social incluye el coste unitario de gestión del purín y el daño marginal ambiental generado por una unidad adicional de purín. En la ecuación (3) el beneficio marginal social es igual al beneficio por hectárea de las dos actividades, mientras que el coste marginal social es el daño marginal de las emisiones totales por hectárea.

Por otro lado, se asumirá que el ganadero "tipo" elige los *inputs* productivos y la combinación de productos que maximizan su beneficio privado sin considerar el daño ambiental que causa su actividad. Por tanto, el regulador debe diseñar y calcular los impuestos que pueden incentivar al ganadero a escoger la combinación de *inputs* y *outputs* que corresponden al óptimo social. Con este objetivo se introducirá en el problema de maximización del ganadero un conjunto de impuestos sobre todos los *inputs* y *outputs* del modelo utilizando la notación t con el correspondiente subíndice

para cada uno. Es decir, t_{qm} será el impuesto sobre la producción de maíz, t_{qc} sobre la producción de cerdos, t_{np} sobre la cantidad de purines, t_s sobre el uso del suelo y t_e sobre las emisiones contaminantes. Como se verá más adelante, estos impuestos pueden ser positivos (impuesto) o negativos (subvención).

La función de beneficio privado del ganadero puede expresarse como sigue:

$$BP = [\rho_c \cdot q_c(n_p) - c_{np} \cdot n_p - Z + p_m \cdot q_m(n) - \rho_s - K - t_{qc} \cdot q_c - t_{np} \cdot n_p - t_{qm} \cdot q_m - t_s - t_e \cdot \theta] \cdot s \quad (4)$$

Donde BP corresponde al beneficio privado total, que es la suma del beneficio agrícola y el beneficio ganadero.

Las condiciones de primer orden de este problema de maximización son las siguientes:

$$\frac{\partial BP}{\partial n_p} = 0 \Leftrightarrow (\rho_m - t_{qm}) \cdot q'_m \cdot (1 - \theta') + (\rho_c - t_{qc}) \cdot \frac{1}{\gamma} - (c_{np} + t_{np}) - t_e \cdot \theta' = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial BP}{\partial s} = (\rho_m - t_{qm}) \cdot q_m + (\rho_c - t_{qc}) \cdot \frac{n_p}{\gamma} - K - Z - (c_{np} + t_{np}) \cdot n_p - (\rho_s + t_s) - t_e \cdot \theta = 0 \quad (6)$$

Estas condiciones indican que el ganadero maximiza su beneficio escogiendo la combinación de *inputs* y *outputs* tales que el ingreso marginal obtenido de cada input utilizado iguale a su coste marginal total, incluyendo todos los impuestos.

Si se quiere que los problemas social y privado conduzcan a una misma solución deben igualarse las condiciones dos a dos, es decir, (2) = (5) y (3) = (6):

$$(2)=(5) \quad -t_{qm} \cdot q'_m \cdot (1 - \theta') - t_{qc} \cdot \frac{1}{\gamma} - t_{np} - t_e \cdot \theta' = -D' \cdot \theta' \quad (7)$$

$$(3)=(6) \quad -t_{qm} \cdot q_m - t_{qc} \cdot \frac{n_p}{\gamma} - t_{np} \cdot n_p - t_s - t_e \cdot \theta = -D' \cdot \theta \quad (8)$$

A continuación, se distinguirán cuatro situaciones distintas, diferenciando el tipo de información disponible para el regulador.

SITUACIÓN I: El regulador tiene información perfecta sobre las emisiones de cada agente (impuesto pigouviano)

Esta primera situación exige que el regulador pueda medir y controlar el nivel de emisiones de cada agente, característica que no se cumple en un problema de contaminación difusa como el descrito. Sin embargo, se obtendrá el resultado de esta situación como punto de referencia en el análisis de las posteriores alternativas.

Suponiendo que los productores maximizan su beneficio privado y que el regulador es capaz de observar las emisiones generadas por dichos productores, entonces las ecuaciones (5) y (6) conducen al óptimo social definido en las ecuaciones (2) y (3) haciendo $t_{qm} = t_{qc} = t_{np} = 0$, lo cual implica que $t_e = D'$. Este impuesto óptimo, comúnmente denominado pigouviano, debe igualarse al daño ambiental ocasionado por una unidad adicional de emisiones contaminantes (daño marginal), alcanzando así el óptimo social.

Pero cuando el regulador no puede identificar a los agentes causantes de la contaminación o no puede medir las emisiones a un coste razonable, entonces debe buscar otras combinaciones de impuestos y/o subvenciones que le permitan alcanzar el óptimo social. Ello es posible utilizando las ecuaciones (7) y (8) para obtener las cuantías de dos impuestos, haciendo cero el resto.

SITUACIÓN II: el regulador puede observar las producciones

Una alternativa para eludir el problema de información descrito en la situación I es introducir impuestos sobre las dos actividades productivas: cerdos y maíz, anulando el resto de impuestos. Esto significa que $t_e = t_s = t_{np} = 0$. Sustituyendo en (7) y (8) se obtiene:

$$-t_{qm} \cdot q'_m \cdot (1 - \theta') - t_{qc} \cdot \frac{1}{\gamma} = -D' \cdot \theta' \quad (9)$$

$$-t_{qm} \cdot q_m - t_{qc} \cdot \frac{n_p}{\gamma} = -D' \cdot \theta \quad (10)$$

Despejando t_{qc} de (9) y sustituyendo en (10) la expresión de la función q_c obtenemos:

$$t_{qc} = [D' \cdot \theta' - t_{qm} \cdot q'_m \cdot (1 - \theta')] \cdot \gamma \quad (11)$$

$$t_{qm} = \frac{D' \cdot (\theta - \theta' \cdot n_p)}{q_m - q'_m \cdot (1 - \theta') \cdot n_p} \quad (12)$$

Nótese que si la función de contaminación θ escogida en este caso fuera lineal entonces tenemos que $\theta' \cdot n_p = \theta(n_p)$, y en consecuencia el numerador de la ecuación (12) se anula y t_{qm} se hace cero. Esto significa que únicamente es necesario poner un impuesto sobre la producción de cerdos, que se calculará obteniendo los valores numéricos de los restantes parámetros de la expresión (11). De manera similar, si la función θ fuera estrictamente convexa, entonces $\theta' \cdot n_p > \theta(n_p)$ y por tanto el valor del numerador de la expresión (12) t_{qm} sería negativo, mientras que si la función fuera estrictamente cóncava $\theta' \cdot n_p < \theta(n_p)$ y el numerador de t_{qm} tendría valor positivo. El

valor final de t_{qm} en los casos de función no lineal dependerá por tanto de los valores de los parámetros del denominador. El resultado de este problema es el mismo que en el óptimo social, si bien los requerimientos de información son distintos cuando la función de emisiones es lineal, pues para determinar el impuesto en esta situación es necesario disponer únicamente de la información sobre el daño marginal de las emisiones, sobre la primera derivada de la función de contaminación, y sobre el valor del parámetro γ .

SITUACIÓN III: el regulador observa la producción agrícola

En este escenario se introducen impuestos sobre la producción y el *input* productivo no contaminantes, y por tanto $t_e = t_{np} = t_{qc} = 0$, de modo que se obtiene:

$$-t_{qm} \cdot q'_m \cdot (1 - \theta') = -D' \cdot \theta' \quad (13)$$

$$-t_{qm} \cdot q_m - t_s = -D' \cdot \theta \quad (14)$$

de donde se obtiene que $t_{qm} = \frac{D' \cdot \theta'}{q'_m \cdot (1 - \theta')}$, y por tanto t_s quedará:

$$t_s = D' \cdot \theta - \frac{D' \cdot \theta'}{q'_m \cdot (1 - \theta')} \cdot q_m \quad (15)$$

En este caso los signos de los impuestos dependen de los valores concretos de los distintos parámetros en las ecuaciones. Con respecto a la información requerida, el regulador debe tener acceso al nivel de producción de maíz y a la productividad marginal del nitrógeno (q'_m) para poder calcular el tipo impositivo sobre dicha producción.

SITUACIÓN IV: el regulador observa la producción ganadera

En este escenario el regulador puede controlar la producción porcina y uno de los *inputs* productivos y por tanto $t_e = t_{np} = t_{qm} = 0$.

$$-t_{qc} \cdot \frac{1}{\gamma} = -D' \cdot \theta' \quad (16)$$

$$-t_{qc} \cdot \frac{n_p}{\gamma} - t_s = -D' \cdot \theta \quad (17)$$

Por tanto, despejando en la ecuación (16) y sustituyéndola después en (17) se tiene:

$$t_{qc} = D' \cdot \theta' \cdot \gamma > 0 \quad (18)$$

$$t_s = D' \cdot (\theta - \theta' \cdot n_p) \quad (19)$$

De la ecuación (18) puede deducirse que el valor de t_{qc} es positivo siempre, por lo que habría que gravar con un impuesto la producción porcina. De nuevo el valor de t_s se anula en el caso particular de una función de contaminación lineal. Si la función es estrictamente cóncava, entonces el uso de la tierra sería gravado también con un impuesto, mientras que si la función es estrictamente convexa el ganadero percibiría una subvención por el uso de la tierra. La información requerida para la obtención del valor óptimo de t_{qc} cuando la función de emisiones es lineal es idéntica a la de la situación II, y en ese caso específico el control de las emisiones equivale al control de la actividad que genera el subproducto contaminante (n_p), que es utilizado como *input* productivo en la otra actividad. Es decir, el impuesto sobre la producción de cerdos puede sustituir al impuesto sobre las emisiones.

SITUACIÓN V: el regulador observa los inputs productivos

Finalmente se considera la introducción de impuestos sobre los dos *inputs* productivos n_p y s . Por tanto, $t_e = t_{qc} = t_{qm} = 0$, y se calculan:

$$-t_{n_p} = -D' \cdot \theta' \quad (20)$$

$$-t_{n_p} \cdot n_p - t_s = -D' \cdot \theta \quad (21)$$

Sustituyendo la ecuación (20) en (21) se obtiene:

$$t_s = D' \cdot (\theta - \theta' \cdot n_p) \quad (22)$$

De la ecuación (20) puede deducirse que el impuesto sobre el *input* nitrógeno es positivo, en tanto que de nuevo en esta situación el valor del impuesto sobre el uso de la tierra es cero cuando la función de contaminación es lineal, al igual que en el caso de la situación IV. Recuérdense que este valor es positivo o negativo si esta función tuviera una especificación cóncava o convexa, respectivamente. También en el supuesto de función de emisiones lineal el único instrumento necesario para alcanzar el óptimo sería un impuesto sobre el nitrógeno purín, que es el único *input* contaminante en el modelo que se ha definido. Es decir, para el regulador esto significa que controlar el nivel de purines utilizados equivale a controlar las emisiones. La información requerida para la fijación de t_{np} incluye el daño marginal y la primera derivada de la función de emisiones.

A modo de resumen, el Cuadro 1 recoge las expresiones de los instrumentos económicos obtenidos según el tipo de información disponible por parte del regulador.

CUADRO 1
RESUMEN DE LAS SITUACIONES CONSIDERADAS EN FUNCIÓN DE LA
INFORMACIÓN DISPONIBLE

Situación I: El regulador observa las emisiones de cada agente (información perfecta) $t_e = D'$;
Situación II: El regulador observa las producciones q_c y q_m $t_{qc} = [D' \cdot \theta' - t_{qm} \cdot q'_m \cdot (1 - \theta')] \cdot \gamma ; \quad t_{qm} = \frac{D' \cdot (\theta - \theta' \cdot n_p)}{q_m - q'_m \cdot (1 - \theta') \cdot n_p} ;$
Situación III: El regulador observa la producción agrícola q_m y s $t_{qm} = \frac{D' \cdot \theta'}{q'_m \cdot (1 - \theta')} ; \quad t_s = D' \cdot \theta - \frac{D' \cdot \theta'}{q'_m \cdot (1 - \theta')} \cdot q_m ;$
Situación IV: El regulador observa la producción ganadera q_c y s $t_{qc} = D' \cdot \theta' \cdot \gamma ; \quad t_s = D' \cdot (\theta - \theta' \cdot n_p) ;$
Situación V: El regulador observa los inputs productivos n_p y s $t_{np} = D' \cdot \theta' ; \quad t_s = D' \cdot (\theta - \theta' \cdot n_p) ;$

3. APLICACIÓN NUMÉRICA

En este apartado se ilustrará el planteamiento teórico llevado a cabo en la sección anterior aplicándolo a una explotación de ganado porcino de Aragón. En primer lugar se presentarán las fuentes de datos empleadas, describiendo las características típicas de una granja de cerdos en la zona de estudio. También se incluirán los parámetros numéricos y las funciones de producción utilizados en el modelo económico descrito. Finalmente, se presentarán y discutirán los resultados de la aplicación numérica.

3.1. Área de estudio y fuentes de datos

El análisis numérico de este estudio se basa en una explotación de ganado porcino típica de Aragón. Se considerará que esta explotación reproduce las condiciones típicas de la zona respecto al tamaño y gestión general de la explotación de la granja de producción de cerdos y de la producción de maíz.

La solución numérica del modelo definido en la ecuación (1) requiere la especificación de los parámetros y coeficientes de las funciones. En concreto, los datos de precios y costes de producción del maíz se han obtenido de la Asociación General de Productores de Maíz de España (AGPME, 2012), mientras que los referidos a los costes y precios percibidos por la producción de cerdo se basan en las Informaciones Técnicas publicadas por el Servicio de Extensión Agraria del Gobierno de Aragón (Gobierno de Aragón 2007, 2011). El coste de aplicación de los purines se ha tomado de Iguácel y Yagüe (2007) y los valores de los parámetros que relacionan el número de cabezas de ganado con la producción de purines y con su contenido en nitrógeno se han obtenido del Gobierno de Aragón (2005, 2008, 2011).⁵ La tabla 2 recoge los valores de los precios, costes y parámetros utilizados para los cálculos numéricos, así como las magnitudes en que se expresan en el modelo.

CUADRO 2
VALORES DE LOS PRECIOS Y PARÁMETROS DEL MODELO

Parámetros	
p_m (en €/t)	190
p_c (en €/cerdo)	9,24
p_s (en €/ha ⁻¹)	152,60
Z (en €/ha)	440
K (en €/ha)	914,81
c_{np} (en €/kgN)	0,41
γ (en kgN/cerdo)	3,454

Fuente: AGPME (2012), Gobierno de Aragón (2005, 2007, 2011), Iguácel y Yagüe (2007).

Por otro lado, las funciones del modelo son tres: la función de producción de cerdos, la función de producción del maíz y la función de contaminación. La primera de ellas se ha especificado siguiendo las informaciones del Gobierno de Aragón (2005, 2007) tal como se ha explicado ya en la sección anterior. La función de producción o función de rendimiento del maíz depende únicamente del *input* productivo n que es el nitrógeno contenido en los purines que está disponible para ser utilizado por la planta. Esta función sigue una especificación cuadrática, que es

5 Aunque en el caso de algunos parámetros económicos existen datos más recientes a los empleados en la aplicación numérica, se ha optado por utilizar datos temporalmente más vinculados a los estudios técnicos de los parámetros biológicos (relación de purines con número de cabezas, contenido de N en purines, costes de gestión de purines, costes fijos).

la comúnmente utilizada en la literatura. La expresión utilizada aquí se ha adaptado a partir de la que utilizan Goetz et al. (2007), que se obtuvieron con datos del simulador agronómico EPIC (Mitchell et al., 1998). La expresión general de la función de rendimiento del cultivo es la siguiente:

$$q_m(n) = a_0 + a_1 \cdot n + a_2 \cdot n^2 \quad (23)$$

donde a_0 , a_1 y a_2 corresponden a los coeficientes constante, lineal y cuadrático respectivamente y la n denota el nitrógeno total utilizado, que es el único *input* productivo en este caso. El Cuadro 3 recoge los valores de los coeficientes utilizados.

CUADRO 3
COEFICIENTES ESTIMADOS DE LA FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN DE MAÍZ

Coeficiente constante (a_0)	4,8273 (6,15)
Coeficiente lineal (a_1)	0,04697 (15,3)
Coeficiente cuadrático (a_2)	-0,6363·10 ⁻⁴ (-5,5)

Fuente: Goetz et al. (2007)

$R^2_{\text{ajustado}} = 0,85$. Entre paréntesis los valores t-ratio.

Por su parte, la función de contaminación se asume lineal y sigue la especificación $\theta(n) = \delta \cdot n_p$, siendo el parámetro δ la parte del nitrógeno en forma de purín que se lixivia (en tanto por uno). El valor de este parámetro se ha fijado en 0,62 a partir de la información del Gobierno de Aragón (2008) y de Goetz et al. (2007), que calculan en su trabajo unas emisiones entre el 40 y el 62 por ciento del fertilizante orgánico en forma de purín para las explotaciones medias en Aragón, dependiendo de la tecnología de aplicación del mismo. Se ha escogido por tanto el porcentaje más alto. Con respecto al valor del daño marginal de la contaminación, se ha optado por tomar el coste de depurar el contenido de nitrógeno en el agua, tal como consta en Martínez y Albiac (2004). Este valor es 1,3€/kgN para una concentración menor de 25 mg de nitrato por litro de agua. Por último se considerará que la variable s es igual o menor que 10 ha.

3.2. Resultados

La resolución del modelo teórico definido en la ecuación (1) requiere la especificación de las funciones de producción de maíz y cerdos. Sin embargo, también es posible resolver el problema utilizando las condiciones de primer orden definidas en las ecuaciones (2) y (3), para lo cual es preciso disponer de la información sobre

los precios de equilibrio y de los *inputs* de las dos actividades productivas, de la expresión de la primera derivada de las funciones de producción respecto del nitrógeno y de la primera derivada de la función de contaminación (valor del parámetro δ). Tanto los modelos social y privado como todas las situaciones descritas en el apartado anterior, han sido resueltas utilizando el solver CONOPT del paquete de optimización matemática GAMS (Brooke *et al.*, 1998).

Además, con el objeto de considerar la legislación vigente respecto a las limitaciones existentes en el uso de fertilizantes nitrogenados, se ha tenido en cuenta la Directiva de Nitratos, 91/676/CEE, que establece un límite máximo permitido de 210 kgN/ha de fertilizante en las explotaciones agrícolas y de 170 kgN/ha para el caso de las zonas vulnerables.⁶

El Cuadro 4 recoge los resultados de las variables de los problemas privado y social cuando no se imponen límites al uso de nitrógeno. Las diferencias entre las soluciones privada y social están relacionadas con la producción de cerdos y en consecuencia, con la cantidad de nitrógeno purín utilizada y el nivel de emisiones generado, ya que en el óptimo debe reducirse respecto del nivel que maximiza el problema privado. La consecución del óptimo exige una reducción de un 7,5 por ciento de las emisiones contaminantes por hectárea (unos 217 kg de N totales al año por explotación), lo cual implica una reducción en el número de cabezas de porcino de unas 102 cabezas al año por explotación. En términos económicos, el problema social implica una pérdida de 489 €/ha de beneficio (un 29,5%) respecto al problema privado. La superficie total empleada en los dos casos alcanza el límite superior de 10 ha.

CUADRO 4
RESULTADOS DEL PROBLEMA SOCIAL Y PRIVADO SIN LIMITACIONES DE NITRÓGENO

Variables	Problema privado	Problema social
Producción de cerdos q_c por ha	134,22	124,06
Nitrógeno en forma mineral n_p (kgN/ha)	463,59	428,50
Producción de maíz q_m (t/ha)	11,13	10,78
Emisiones (e) (kgN/ha)	287,42	265,67
Superficie total (s) (ha)	10,00	10,00
Beneficio de la explotación BP (€/ha) (sin impuestos ni subvenciones)	1655,51	1165,95

Fuente: Elaboración propia.

6 En el Anexo 2 se han incluido los cálculos de las variables para estos casos. En el modelo teórico se ha optado por no incluir estos límites directos para mostrar de forma más clara al lector cómo se diseñan los incentivos económicos y qué implicaciones tiene su aplicación práctica, sin la interferencia de un control directo adicional.

Seguidamente se han calculado los valores de los instrumentos económicos diseñados para obtener el óptimo social en las distintas situaciones descritas en la sección anterior. En el Cuadro 5 se presentan los resultados de los impuestos en las alternativas planteadas.

CUADRO 5
RESULTADOS NUMÉRICOS DE LA COMBINACIÓN DE INSTRUMENTOS

Impuestos	Situación I	Situación II	Situación III	Situación IV	Situación V
t_{qc} (€/cabeza)	-	2,78	-	2,78	-
t_{qm} (€/t)	-	0	86,39	-	-
t_{cnp} (€/kgN)	-	-	-	-	0,81
t_s (€/ha)	-	-	-587	0	0
t_e (€/kgN)	1,30	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Dado que en la situación I se asume que el regulador puede observar las emisiones producidas por cada agricultor, el impuesto resultante sobre las emisiones es igual al daño marginal de la contaminación (coste de depuración del agua). En las situaciones II y IV el regulador introduce un impuesto sobre la actividad ganadera de idéntico valor, mientras que el valor de los impuestos sobre la producción de maíz y sobre el uso de la tierra respectivamente, se anulan debido a la especificación lineal de la función de contaminación. La situación III corresponde a la situación en que se gravan tanto la producción de maíz como el uso de la tierra. El regulador controla la producción agraria a través de un impuesto sobre la producción de maíz que es compensado a través de una subvención sobre el uso de la tierra. Por último, en la situación V se controla el *input* nitrógeno mediante un impuesto, en tanto que de nuevo la tierra no precisa ser gravada.

Estos resultados indican que, bajo el supuesto de linealidad de la función de contaminación, el impuesto sobre las emisiones puede sustituirse por un impuesto sobre la producción de cerdos o bien sobre el nivel de purines aplicado en la producción de maíz. Si dicha función siguiera una especificación distinta de la lineal (estrictamente cóncava o convexa), entonces las situaciones II, IV y V darían lugar a una combinación de impuestos y subvenciones. En concreto, si la función fuera estrictamente convexa (cóncava), entonces las situaciones IV y V llevarían a fijar una subvención (impuesto) sobre el uso de la tierra, y un impuesto sobre la producción de cerdos o el uso de nitrógeno respectivamente. En el caso de las situaciones II y III, el signo de los instrumentos no puede determinarse a priori.

Así pues, todo ello indica la importancia que tiene para el regulador una correcta especificación de la función de contaminación considerada, así como disponer de

datos adecuados sobre la valoración económica de los daños ambientales provocados por la actividad. Para ello, resulta imprescindible avanzar en el estudio de los procesos biofísicos implicados en la contaminación difusa a través de la inversión en investigación y generando relación directa con el sector.

4. CONCLUSIONES

La contaminación por nitratos derivada de la actividad ganadera es un problema de gran relevancia social en muchas zonas de Aragón, donde la elevada concentración de explotaciones porcinas en algunas zonas de la región supone una amenaza para la calidad de los cursos de agua.

El adecuado diseño de medidas de control para este tipo de contaminación es una cuestión relevante también desde del punto de vista del análisis económico, que tradicionalmente ha tratado de buscar instrumentos que sean a la vez eficientes, flexibles, sencillos de implantar y que provean incentivos adecuados.

Los resultados de este trabajo muestran que la solución eficiente socialmente puede alcanzarse a través de distintas combinaciones de impuestos y subvenciones. En concreto se han considerado cinco situaciones distintas para el regulador, obteniendo que el impuesto sobre las emisiones puede sustituirse por un impuesto sobre ambas actividades productivas (producción de cerdos y maíz), sobre una sola de las actividades y un *input* productivo (nitrógeno o suelo), o bien sobre los dos *inputs* productivos.

Además se ha discutido la importancia del tipo de función de contaminación especificada en el tipo de instrumentos que debe introducirse, verificando que si la función considerada es lineal, un impuesto sobre la actividad que ocasiona la contaminación o un impuesto sobre el *input* contaminante son equivalentes al impuesto sobre las emisiones. Si la función considerada es convexa, estos impuestos se combinan con una subvención sobre el uso de la tierra, mientras que si la función es cóncava, entonces el uso de la tierra es gravado también con un impuesto. Se ha obtenido también que si el regulador controla la actividad no contaminante, entonces puede introducir un impuesto sobre la producción y una subvención sobre el *input* suelo.

Este trabajo pretende contribuir a la literatura mediante el diseño de una combinación de instrumentos económicos que son eficientes y que pueden reducir las exigencias de información y control respecto al control basado en un impuesto pigouviano sobre las emisiones contaminantes. El análisis teórico se completa con una aplicación numérica, para la cual se han recopilado datos de producción de una explotación típica de la región de estudio.

A pesar de las limitaciones inherentes a la construcción del modelo (consideración de relaciones lineales entre emisiones y purines o de un único *input* relevante en el proceso de contaminación) y a las fuentes de datos utilizadas, los resultados

pueden ser útiles para los agentes del sector y para los organismos reguladores, pues el control de la contaminación difusa plantea retos para la sostenibilidad de esta actividad que pueden ser abordados a través de medidas distintas como las propuestas en función del tipo de información disponible. El presente análisis podría completarse en futuros trabajos que abordaran la evaluación del coste-eficiencia de las medidas disponibles en este tipo de contaminación o el cálculo de los instrumentos económicos que conduzcan a un uso de nitrógeno idéntico a los límites establecidos en la legislación.

BIBLIOGRAFÍA

- ABDALLA C, BORISOVA T, PARKER D, SAACKE BLUNCK K (2007): "Water quality credit trading and agriculture: recognizing the challenges and policy issues ahead". *Choices* 22(2):117–124.
- AGENCIA EUROPEA DEL MEDIO AMBIENTE (2015): "The European Environment-state and outlook 2015". European Environmental Agency, disponible en <http://eea.europa.eu/soer>.
- AGPME (2012): "Estudio de costes globales del cultivo del maíz en Aragón para variedades transgénicas y convencionales". *Asociación General de Productores de Maíz de España*.
- BROOKE A, KENDRICK D, MEERAUS A, RAMAN R (1998): GAMS tutorial by R. Rosenthal. GAMS Development Corporation, Washington
- FULLERTON D, WOLVERTON A (2000): "Two generalizations of a deposit–refund system". *American Economic Review* 90(2):238–242.
- GOBIERNO DE ARAGÓN (2005): "Resultados económicos del ganadero de porcino de cebo integrado". *Información Técnica* Nº 155. Dirección General de Desarrollo Rural. Servicio de Programas Rurales. Gobierno de Aragón.
- GOBIERNO DE ARAGÓN (2007): "Evaluación de costes de sistemas y equipos de aplicación de purín". *Información Técnica* Nº 178. Dirección General de Desarrollo Rural. Servicio de Programas Rurales. Gobierno de Aragón.
- GOBIERNO DE ARAGÓN (2008): "Métodos rápidos de análisis como herramienta de gestión en la fertilización con purín porcino: conductimetría". *Información Técnica* Nº 195. Dirección General de Desarrollo Rural. Servicio de Programas Rurales. Gobierno de Aragón.
- GOBIERNO DE ARAGÓN (2011): "Resultados de la red de ensayos de variedades de maíz y girasol en Aragón". *Información Técnica* Nº 227. Dirección General de Desarrollo Rural. Servicio de Programas Rurales. Gobierno de Aragón.
- GOETZ, R., MARTÍNEZ, Y. Y XABADÍA A. (2007): "Regulation of non-point source pollution and incentives for good environmental practices—the case of agriculture". In Pertsova C. (ed.) *Ecological Economics Research Trends*, capítulo 14.
- IGUÁCEL F, YAGÜE MR (2007): "Evaluación de costes de sistemas y equipos de aplicación de purín". *Informaciones técnicas* nº 178. Departamento de Agricultura y Alimentación, Gobierno de Aragón
- MAGRAMA (2015): "Resultados e informes de ganadería, año 2015". Subdirección General de Estadística. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio ambiente, Gobierno de España.
- MARTÍNEZ, Y. Y ALBIAC, J. (2004): "Agricultural pollution control under Spanish and European environmental policies". *Water Resources Research* 40 (10).
- MITCHELL G, GRIGGS R, BENSON V, WILLIAMS J (1998): *The EPIC model: environmental policy integrated climate*. Texas Agricultural Experiment Station, Temple.
- PANAGOPOULOS Y, MAKROPOULOS C, MIMIKOU M (2011): "Reducing surface water pollution through the assessment of the cost-effectiveness of BMPs at different spatial scales". *Journal of Environmental Management* 92:2823–2835.
- PERMAN, R., MA, Y., MCGILVRAY, J. Y COMMON, M. (2003): *Natural Resource and Environmental Economics*. Pearson Education Limited. Third Edition. Edinburgh Gate.
- SRIVASTAVA, D.K. Y KAVI KUMAR K.S. (2014): *Environment and fiscal reforms in India*. Sage Publications Pvt Ltd, Nueva Delhi.
- WALLS M, PALMER K (2001): "Upstream pollution, downstream waste disposal, and the design of comprehensive environmental policies". *Journal of Environmental Economics and Management* 41:94–108.

ANEXO 1: HETEROGENEIDAD DE LOS AGENTES

En el apartado 2 se ha asumido la existencia de un número fijo m de ganaderos en la región. En este apéndice se expone una versión extendida del modelo teórico para la situación en que los agentes son heterogéneos, para lo que se supondrá que existen distintos grupos de ganaderos o grupos de explotaciones diferentes. Supongamos que existen $j=1, \dots, k$ grupos de explotaciones y que aquellos que pertenecen al grupo j tienen idénticas características entre sí respecto a las funciones de producción q_{mj} y q_{cj} , de contaminación θ_j y de costes de aplicación de los purines c_{npj} .

Las variables de elección de cada ganadero en el grupo j siguen por tanto la notación n_{pj} y s_j y el problema de decisión del regulador que se expuso en la ecuación (1) puede redefinirse como sigue:

$$\sum_{j=1}^k \left[p_c \cdot q_{c_j} (n_{p_j}) - c_{npj} \cdot n_{p_j} - Z_j + p_m \cdot q_{m_j} (n_j) - p_s - K \right] \cdot s_j \cdot m_j - D \left(\sum_{j=1}^k (m_j \cdot s_j \cdot e_j) \right) \quad (24)$$

Igualmente, adaptando la notación de la ecuación (4), se obtiene la expresión del beneficio privado del ganadero y las consiguientes condiciones de primer orden de ambos problemas. Tal como se procedió en la sección 2, la comparación de dichas condiciones de primer orden permite obtener los impuestos específicos para cada grupo de ganaderos denotadas como t_{qm_j} , t_{qc_j} , t_{cg_j} , t_{s_j} , t_{e_j} . Los impuestos conducirán al óptimo social, tal y como ha quedado explicado.

Suponiendo que el daño marginal provocado por todas las explotaciones es idéntico⁷ para todos los agentes, el cálculo de los tipos impositivos óptimos diseñados en el apartado 2 exige que el regulador conozca las funciones de producción y la primera derivada de la función de contaminación de cada grupo j de explotaciones. Por tanto, la consideración de agentes heterogéneos no modifica esencialmente el tipo de información necesaria, aunque sí la identificación de los agentes según sus características productivas.

7 Esta hipótesis es admisible únicamente en el caso de que los daños ambientales no sean dependientes de la localización de las explotaciones ganaderas respecto de los cursos de agua.

ANEXO 2: CONSIDERACIÓN DE LA LEGISLACIÓN VIGENTE

El Cuadro 6 recoge los cálculos numéricos obtenidos cuando se introducen los límites cuantitativos sobre el aporte de nitrógeno fijados en la legislación actual. En estos casos, los problemas privado y social conducen a idéntica solución, puesto que la producción de cerdos se ajusta al nitrógeno máximo permitido. Ello supone un ajuste muy importante en la capacidad de producción de cerdos y también en la producción de maíz. Las emisiones contaminantes se reducen más de un 54 por ciento a costa de una pérdida de más de un 68 por ciento en el beneficio privado por hectárea cuando se limita a 210 kgN/ha la aplicación de fertilizante. Cuando se introduce la limitación a 170 kgN/ha, las emisiones se reducen un 63 por ciento y conduce a una pérdida del 88 por ciento del beneficio por hectárea.

CUADRO 6
RESULTADOS DEL MODELO CON LÍMITES EN EL USO DE NITRÓGENO

Variables	Con limitación ($n_p=210$)		Con limitación ($n_p=170$)	
	Problema privado	Problema social	Problema privado	Problema social
Producción de cerdos q_c por ha	60,79	60,79	49,21	49,21
Nitrógeno en forma mineral n_p (kgN/ha)	210	210	170	170
Producción de maíz q_m (t/ha)	8,17	8,17	7,59	7,59
Emisiones (e) (kgN/ha)	130,2	130,2	105,4	105,4
Superficie total (s) (ha)	10,00	10,00	10,00	10,00
Beneficio de la explotación BP (€/ha) (sin impuestos ni subvenciones)	522,43	351,23	319,69	182,67

Fuente: Elaboración propia.

