

OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LA FERTILIZACIÓN EN EXPLOTACIONES DE UNA REGIÓN EUROPEA

Zulia Helena Caamal-Pat¹; Ruth Arely Casas-García¹;
Beatriz Urbano-López-de-Meneses^{2*}

¹Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México.
MÉXICO. C.P. 56230.

²Universidad de Valladolid, Área de Economía, Sociología y Política Agraria. Avenida de Madrid # 57.
Palencia, Castilla y León, ESPAÑA. C. P. 34004
correo-e: beaturb@iaf.uva.es (*Autor para Correspondencia)

RESUMEN

Se evaluó la posible optimización económica y ambiental de la fertilización en una muestra de explotaciones de remolacha azucarera en una región europea. En una primera etapa se obtuvo el posible ajuste de las dosis mediante la comparación de las dosis aplicadas con las recomendadas. Así, el 54.72 % aportó más nitrógeno; el 42.01 %, más fósforo, y el 14.65 %, más potasio del recomendado. En la segunda etapa, para los fertilizantes y precios disponibles, se obtuvo la combinación más económica de fertilizantes a emplear para la recomendación, mediante un modelo de programación lineal, que supuso un ahorro de hasta 22.23 €/ha⁻¹. Finalmente, se calcularon las emisiones de CO₂ equivalentes que se podrían haber evitado y los derechos de emisiones de CO₂ que se podrían haber negociado del exceso de N aplicado, con lo que se pudo haber evitado 25.545.65 kg de CO₂ y negociado unos derechos en toda la región de 6.812 €.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: Optimización de la fertilización, ahorro económico y ambiental, decisiones de abonado, emisiones evitadas.

ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL FERTILIZATION OPTIMIZATION ON SUGAR BEET FARMS IN A EUROPEAN REGION

ABSTRACT

The aim of the work was to economically and environmentally optimize fertilizer use on sugar beet farms in a European region. Firstly, the difference between the applied and recommended doses was calculated, revealing that 54.72 %, 42.01 % and 14.65 % of the surveyed farms used more nitrogen, phosphorous and potassium, respectively, than recommended. Secondly, for the economic optimization, a linear programming model considering available fertilizers and prices was developed to determine the most cost-effective mix of fertilizers to use to comply with the recommended dose. If applied, these fertilizer mixes would save producers up to 22.23 €/ha⁻¹. Finally, the CO₂ equivalent emissions that could have been avoided and the CO₂ emission rights that could have been negotiated if the excess N had not been applied were calculated. Specifically, 25.545.65 kg of CO₂ emissions could have been avoided and 6.812 € of CO₂ rights could have been traded by the whole region.

ADDITIONAL KEYWORDS: Fertilization optimization, economic and environmental savings, fertilizer decisions, emissions avoided.

INTRODUCCIÓN

Varios son los motivos que aconsejan la optimización de las dosis de fertilizantes, especialmente nitrogenados, en la actividad agraria. Por una parte, existe la necesidad de rentabilizar las explotaciones agrarias y con ello mejorar su competitividad y sostenibilidad, dado que el gasto en fertilizante representa un porcentaje muy alto, en algún caso cercano a 30 % de los costos que soporta la explotación, y por otra, la disminución de la contaminación procedente de la contaminación difusa que provoca la agricultura.

El exceso de fertilización puede originar contaminación por nitrógeno en la ecosfera. La atmósfera es contaminada por gases de N_2O y NO_x que originan directa o indirectamente el calentamiento de la atmósfera y el efecto invernadero. Además, cuando el abonado nitrogenado excede las necesidades del cultivo y la capacidad de nitrificación del suelo, el nitrógeno sobrante puede filtrarse, normalmente como nitratos (Meisinger y Randall, 1991) (Almasri y Kaluarachchi, 2004d) y contaminar los acuíferos y cursos fluviales.

En general, los principales aportes de nitrógeno agrario provienen del estiércol, vacuno y aviar, la fertilización nitrogenada, la fijación atmosférica abiótica, el riego con aguas contaminadas por nitratos y la fijación del nitrógeno por las leguminosas (Almasri y Kaluarachchi, 2004a-c). La optimización de las dosis aplicadas sería una manera eficaz de reducir la contaminación, teniendo en cuenta que en las zonas agrícolas ésta proviene principalmente de la fertilización nitrogenada, (Yadav y Wall, 1998). En este sentido la Política Agraria Comunitaria Europea hace eco de este objetivo al promover su consecución a través de la condicionalidad agraria, que fija los requisitos mínimos ambientales que se deben verificar en la explotación para la percepción de las ayudas europeas correspondientes.

Muchos estudios han analizado el impacto económico (Carr *et al.*, 1991; Wibawa *et al.*, 1993; Hayes *et al.*, 1994; Long *et al.*, 1995; Lowenberg-Deboer y Swinton, 1995), y ambiental (Rejesus y Hornbaker, 1999) que supondría ajustar las dosis de abonado y su efecto sobre el rendimiento del cultivo. Así, Good y Beauty (2011) indicaron que en países desarrollados, como Dinamarca, los cultivos han alcanzado su máximo rendimiento, por lo que incrementos en el uso de los fertilizantes no ocasionarían ganancias adicionales a la explotación. Yadav y Wall (1998) en Minnesota, Estados Unidos, demostraron que sucesivos aumentos en la dosis de N no suponían incrementos en el rendimiento del cultivo, y en consecuencia ajustar las dosis no comprometía el rendimiento del cultivo. Por lo tanto, un ajuste en la dosis puede suponer un aumento en la rentabilidad de las explotaciones y una mejora ambiental.

Existen múltiples trabajos que han analizado el exceso de fertilización en diferentes cultivos como el trigo, maíz o arroz y en diferentes condiciones, China, Dinamarca, EEUU

INTRODUCTION

There are several reasons to promote optimizing fertilizer doses, especially of nitrogen, in farming. On the one hand, it can help make farms more profitable and thereby improve their competitiveness and sustainability, given that fertilizer costs represent a very high percentage, somewhere close to 30 %, of total farming costs; on the other hand, there is a need to reduce the diffuse pollution caused by agriculture.

Over-fertilization can cause nitrogen pollution in the ecosystem. The atmosphere is polluted by N_2O and NO_x gases that directly or indirectly cause atmospheric warming and the greenhouse effect. Moreover, when the nitrogen fertilizer dose exceeds crop needs and soil nitrification capacity, the excess nitrogen can leach, usually as nitrates (Meisinger and Randall, 1991) (Almasri and Kaluarachchi, 2004d), and contaminate aquifers and river courses.

In general, the main contributions of agricultural nitrogen come from cattle and poultry manure, nitrogen fertilization, abiotic atmospheric fixation, irrigation with water contaminated by nitrates and nitrogen fixation by legumes (Almasri and Kaluarachchi, 2004a-c). Optimizing fertilizer doses would be an effective way of reducing pollution, considering that in agricultural areas such pollution is mainly derived from nitrogen fertilization (Yadav and Wall, 1998). In this regard, the European Community Agricultural Policy echoes this goal by promoting its achievement through agricultural conditionality, which sets minimum environmental requirements that must be verified on the farm in order for it to receive the corresponding European aid.

Many studies have analyzed the economic impact (Carr *et al.*, 1991; Wibawa *et al.*, 1993; Hayes *et al.*, 1994; Long *et al.*, 1995; Lowenberg-Deboer and Swinton, 1995) and environmental one (Rejesus and Hornbaker, 1999) that adjusting fertilizer doses would have and their effect on crop yield. In this regard, Good and Beauty (2011) stated that in developed countries, such as Denmark, crops have reached their maximum yield, so increases in fertilizer use would not result in additional farm profits. Yadav and Wall (1998) in Minnesota, United States, showed that successive N dose increases would not result in increased crop yields, and thus adjusting the doses would not compromise crop yield. Therefore, adjusting the dose can result in an increase in farm profitability and environmental improvement.

Many studies have analyzed over-fertilization in different crops such as wheat, maize and rice, as well as in different countries, and therefore conditions, such as China, Denmark and the United States (Li, 2011; Antoniadou and Wallach, 2002; Hergert, 2010; Carr *et al.*, 1991; Good and Beatty, 2011). These studies point out that over-fertilization is a global problem and that observing crop behavior is an effective means of adjusting fertilizer doses. In this regard, optimizing fertilization requires taking into account the

(Li, 2011; Antoniadou y Wallach, 2002; Hergert, 2010; Carr *et al.*, 1991; Good y Beatty, 2011) y que resaltan que el exceso de fertilización es una problemática global y que la observación del cultivo es un medio eficaz de ajustar las dosis. En este sentido, para la optimización de la fertilización se debe tener en cuenta la dosis, la forma y el momento adecuado de aplicación, intensificando acciones de ahorro y uso eficiente de los fertilizantes como indica el IDAE (Anónimo, 2007). Se debe aprovechar la fertilidad del suelo gracias a su materia orgánica (Urbano *et al.*, 2005) y a la contribución de los abonos orgánicos, los restos de las cosechas (Urbano *et al.*, 2002) y la utilización de abonos verdes. Es conveniente aprovechar la capacidad fijadora de nitrógeno mediante la introducción de leguminosas, bien sea en la rotación de cultivos, o como cultivo asociado (González-Andrés *et al.*, 2003).

El objetivo del trabajo fue evaluar la posible optimización económica y ambiental de la fertilización de la remolacha azucarera en una muestra de explotaciones de Castilla y León, España. En la primera parte del análisis se obtuvo el posible ajuste de las dosis al comparar las dosis aplicadas con las recomendadas, obtenidas en función de los contenidos del suelo de nitrógeno (materia orgánica y nítrico), fósforo y potasio, y un rendimiento esperado del cultivo entre 110 y 124 t·ha⁻¹. En la segunda parte del análisis, y al considerar la disponibilidad y precio de los fertilizantes de la campaña, se obtuvo la combinación más económica de fertilizantes al aplicar un modelo de programación lineal. En la tercera parte, para el exceso de N aplicado se estimaron las emisiones de CO₂ equivalente que se podrían haber evitado y los derechos de CO₂ que Castilla y León podrían haber negociado (Anónimo, 2011).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la evaluación, la optimización económica y ambiental de la fertilización, se analizó una muestra de explotaciones de remolacha azucarera en Castilla y León durante el año agrícola 2010-2011. Para una población total en la comunidad de 5,757 explotaciones de este cultivo, con un nivel de confianza de 95.5 % y margen de error de 5.5 %, se obtuvo una muestra de 307 explotaciones que fueron seleccionadas mediante un muestreo aleatorio. La superficie total de las explotaciones de la muestra fue de 1,018.47 ha, de las 33,156 ha del cultivo existentes en la comunidad, con un tamaño medio de 3.23 ha, y parcelas comprendidas entre 0.32 y 45.05 ha. La producción bruta media de las 307 parcelas de remolacha en el año agrícola de análisis fue de 104.7 t·ha⁻¹, y el rendimiento neto, de 91.28 t·ha⁻¹, con una polarización de 17.17, el rendimiento medio de la muestra en remolacha 16° fue 99.46 t·ha⁻¹. Las explotaciones analizadas pertenecían a cinco regiones de regadío de la comunidad incluidas en el Plan 2014 que promueve la Asociación para la Investigación y Mejora del Cultivo de la Remolacha Azucarera (Anónimo, 2014), de apoyo a la mejora y la tecnificación de la remolacha en las localidades de Sondeos, Canales, Páramo, Vegas y Miranda.

dose, the form of application and its appropriate timing, in order to increase savings and fertilizer use efficiency as indicated by the IDEA (Anónimo, 2007). Soil fertility resulting from its organic matter should be taken advantage of (Urbano *et al.*, 2005), as should the contribution of organic fertilizers, crop residues (Urbano *et al.*, 2002) and green manure. Nitrogen fixing ability should also be taken advantage of by introducing legumes, either through crop rotation or intercropping (González-Andrés *et al.*, 2003).

The aim of this study was to assess the potential for economically and environmentally optimizing fertilization on sugar beet farms in Castilla y León, Spain. In the first part of the analysis, possible dosage adjustments were obtained by comparing applied with recommended doses, derived from the nitrogen (organic matter and nitric), phosphorus and potassium contents of the soil, and an expected crop yield of between 110 and 124 t·ha⁻¹. In the second part of the analysis, and by considering the availability and price of fertilizers, the most cost-effective combination of fertilizers was obtained by applying a linear programming model. In the third part, for the excess N applied, CO₂ equivalent emissions that could have been avoided and the CO₂ rights that Castilla y León could have been traded were estimated (Anónimo, 2011).

MATERIALS AND METHODS

To assess the potential for economically and environmentally optimizing fertilizer use, a sample of sugar beet farms in Castilla y León was analyzed during the 2010-2011 agricultural year. There are a total of 5,757 sugar beet farms in the region. Of these, 307 were randomly selected, providing a confidence level of 95.5 % and a margin of error of 5.5 %. Of the 33,156 ha used for growing sugar beet in the region, the surveyed farms accounted for 1,018.47 ha, averaging 3.23 ha in size with plots ranging from 0.32 to 45.05 ha. The average gross production of the 307 sugar beet farms in the agricultural year analyzed was 104.7 t·ha⁻¹, net yield was 91.28 t·ha⁻¹, and average yield was 99.46 t·ha⁻¹. The analyzed farms belong to five irrigated regions within the overall area included in the 2014 Plan promoted by the Asociación para la Investigación y Mejora del Cultivo de la Remolacha Azucarera (Anónimo, 2014); the plan's goal is to support the improvement and modernization of sugar beet farms in the towns of Sondeos, Canales, Páramo, Vegas and Miranda.

From the soil contents of the sampled plots and for an expected sugar beet crop yield of between 110 and 124 t·ha⁻¹, the recommended N, P and K Fertilizer Units were obtained with the criteria used by the agricultural laboratories and services in the area.

For the recommended nitrogen, the following formula was used:

$$NFU_{\text{recommended}} = 310 - 6 \text{ N (Nitric) ppm} - 70 \text{ OM \%}$$

A partir de los contenidos del suelo de las parcelas de la muestra y para un rendimiento esperado del cultivo de remolacha entre 110 y 124 t·ha⁻¹, se obtuvieron las Unidades Fertilizantes (N, P, K) recomendadas (UF recomendadas) con los criterios utilizados por los laboratorios y servicios agronómicos de la zona.

Para el nitrógeno recomendado se utilizó la fórmula:

$$UFN_{recomendadas} = 310 - 6 N (\text{Nítrico}) \text{ ppm} - 70 MO \%$$

donde $UFN_{recomendadas}$ es el valor de unidades fertilizante de nitrógeno recomendadas; 310 es la extracción de N del cultivo para un rendimiento esperado aproximado de 120 t·ha⁻¹ y una extracción por tonelada de 2.5 kg N (Urbano, 2002).

En el Cuadro 1 se detallan las recomendaciones de UFP y de UFK en funciones de los contenidos del suelo y otras pérdidas.

Una vez finalizado el año agrícola, se obtuvo la posible optimización de la dosis de fertilización de N, P y K (%), a partir de la fórmula siguiente:

$$\text{Optimización Fertilización} = \frac{UF_{aportadas} - UF_{recomendadas}}{UF_{aportadas}} \times 100$$

Las $UF_{aportadas}$ por cada explotación durante la campaña se obtuvieron mediante entrevistas personales y cuadernos de campo de las 307 explotaciones de la muestra.

where $NFU_{recommended}$ is the value of recommended nitrogen fertilizer units; 310 is the N removal from the crop for an expected yield of approximately 120 t·ha⁻¹ and a removal per ton of 2.5 kg N (Urbano, 2002).

Table 1 details the PFU and KFU recommendations based on soil contents and other losses.

Once the agricultural year ended, the possible optimization of N, P and K fertilization (%) was obtained from the following formula:

$$\text{Fertilization Optimization} = \frac{FU_{applied} - FU_{recomasmeded}}{FU_{applied}} \times 100$$

The $FU_{applied}$ by each farm during the field phase was obtained through personal interviews and field reports concerning the 307 farms in the sample.

To analyze the potential for economically optimizing fertilization, available commercial fertilizers and their prices during the cycle were considered. The best combination of fertilizers which minimizes farm operating costs was obtained using a linear programming model, in which the objective was to minimize the expense for this input. The commercial fertilizers, which were obtained from area stores, are the six best-selling fertilizers used for sugar beet farming in Castilla y León. The prices used were market prices. The six types of fertilizers used in the optimization model were a) 19-10-5, with a market price of 272 €·t⁻¹; b) 7-10-6, costing 280 €·t⁻¹; c)

CUADRO 1. Unidades Fertilizantes recomendadas ($UF_{recomendadas}$) de fósforo y potasio en función de los contenidos y tipo de suelo empleados en Castilla y León.

TABLE 1. Recommended phosphorous and potassium Fertilizer Units ($FU_{recommended}$) based on soil contents and type used in Castilla y León.

Fósforo recomendado / Recommended Phosphorous		Potasio recomendado / Recommended Potassium	
Contenido P / P Content (mg·kg ⁻¹)	UFP _{recomendadas} / PFU _{recommended}	Contenido K / K Content K(mg·kg ⁻¹)	UFK _{recomendadas} / KFU _{recommended}
<10	100	Tipo de suelo ligero / Light soil type	
		K<60	100
		60< K<100	50
10-30	50	K>100	0
		Tipo de suelo medio / Medium soil type	
		K<80	100
>30	0	80< K<160	50
		K>160	0
		Tipo de suelo fuerte / Heavy soil type	
		K<100	100
		100< K<200	50
		K>200	0

Fuente: AIMCRA (Asociación para la Investigación y Mejora de la Remolacha Azucarera).

Source: AIMCRA (Asociación para la Investigación y Mejora de la Remolacha Azucarera).

Para realizar el análisis de la potencial optimización económica de la fertilización, se consideraron los fertilizantes comerciales disponibles y su precio durante el ciclo, con lo que se obtuvo la combinación de éstos, que minimiza los costos en la explotación mediante un modelo de programación lineal, en el cual la función objetivo fue minimizar el gasto por este concepto, y las variables de decisión, los seis fertilizantes comerciales disponibles, mismos que se obtuvieron de casas comerciales, entre los seis más vendidos para el cultivo de remolacha azucarera en Castilla y León. Los precios utilizados correspondieron con los precios de mercado. Los seis tipos de fertilizantes empleados en el modelo de optimización fueron a) 19-10-5, con precio de mercado de 272 €·t⁻¹; b) 7-10-6, con costo de 280 €·t⁻¹; c) 5-10-20, con costo de 232 €·t⁻¹; d) DAP binario (18-46-0) con un costo de 147 €·t⁻¹; e) NAC 27 % granulado, con un costo de 130.50 €·t⁻¹, y f) Fertiyc (22-0-0), con un costo de 116 €·t⁻¹. Para simplificar los consejos económicos y el modelo, las 307 explotaciones de la muestra se agruparon en siete categorías con similares recomendaciones de abonado (Cuadro 2). El 9.67 % de las explotaciones fueron descartadas por tratarse de casos particulares.

5-10-20, costing 232 €·t⁻¹; d) binary DAP (18-46-0), costing 147 €·t⁻¹; e) NAC 27 % granular, costing 130.50 €·t⁻¹, and f) Fertiyc (22-0-0), costing 116 €·t⁻¹. To simplify the economic advice and the model, the 307 farms in the sample were grouped into seven categories with similar fertilizer recommendations (Table 2). Moreover, 9.67 % of the farms were discarded because they are special cases.

The economic optimization of fertilization was obtained by adjusting the fertilizer dose using both the recommendations and the best combination of available fertilizers. Once the best combination of available fertilizers that minimizes the cost function for the recommended doses for each group of farms was obtained, the potential savings were calculated as the difference between the optimal combination of applications made and those recommended by the linear programming model.

For the calculation of CO₂ emissions that could have been avoided if the excess N had not been applied, it was considered that, according to the Intergovernmental Panel on Climate Change (Anónimo, 2006), 1 % of the nitrogen used

CUADRO 2. Agrupación de las explotaciones analizadas en función de los fertilizantes compuestos recomendados y distribución en porcentajes.

TABLE 2. Grouping of the farms analyzed according to the recommended compound fertilizers and percentage of the total number of farms surveyed.

Grupo / Group 1		Grupo / Group 2		Grupo / Group 3		Grupo / Group 4	
Recomendado / Recommended	Frec. / Freq.	Recomendado / Recommended	Frec. / Freq.	Recomendado / Recommended	Frec. / Freq.	Recomendado / Recommended	Frec. / Freq.
180-125-67	1	180-75-100	6	180-125-0	61	140-88-0	1
180-150-100	7	180-50-100	3	140-150-0	10	180-50-0	16
180-125-100	12	140-50-100	2	140-125-0	20	140-75-0	23
140-125-100	5	140-75-100	6	180-150-0	35	140-50-0	13
		180-75-140	29				
Total	25	Total	46	Total	126	Total	53
%	8.17	%	14.98	%	41.18	%	17.32
Grupo / Group 5		Grupo / Group 6		Grupo / Group 7		Sin grupo / Without group	
Recomendado / Recommended	Frec. / Freq.	Recomendado / Recommended	Frec. / Freq.	Recomendado / Recommended	Frec. / Freq.	Recomendado / Recommended	Frec. / Freq.
100-75-100	1	100-75-0	4	140-0-0	5	Otras	10
100-125-100	2	100-125-0	6	180-0-0	26		
				100-0-0	3		
Total	3	Total	10	Total	34	Total	10
%	0.98	%	3.27	%	11.07	%	3.27

La optimización económica de la fertilización se obtuvo tanto por el ajuste de la dosis de abonado a partir de las recomendaciones como por la mejor combinación de los fertilizantes disponibles. Una vez obtenida la combinación entre los fertilizantes disponibles que minimiza la función de costos para las recomendaciones de cada grupo de explotaciones, el potencial ahorro se calculó como la diferencia entre la combinación óptima de las aportaciones realizadas y las recomendadas por el modelo de programación lineal.

Para el cálculo de las emisiones de CO₂ que se podrían haber evitado por el exceso de N aplicado, se ha considerado que, según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (Anónimo, 2006), el 1 % del Nitrógeno utilizado en la actividad agraria se pierde en forma de N₂O-N, que expresado en CO₂ equivalente se obtendría (Good y Beatty, 2011):

$$\text{Emisiones de CO}_2 \text{ equivalente evitadas} = \text{UFN}_{\text{exceso}} \times 0.01 \times (44 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} / 28 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}) \times 296$$

Estas emisiones evitadas podrían haberse negociado como derechos de emisión de CO₂ en el Sistema de Negociación de Derechos de Emisión de Dióxido de Carbono. Los derechos fueron estimados para el total de productores de remolacha azucarera de Castilla y León a precios de enero de 2011 (14.22 €·t⁻¹ CO₂) y de diciembre de 2011 (7.54 €·t⁻¹) (Anónimo, 2011), ya que durante 2011 el precio descendió notablemente por la disminución de la demanda de derechos por la reducción de las emisiones de la industria.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La mayoría de las explotaciones consultadas, el 51.14 %, aportaron más nitrógeno del recomendado, mientras que el 24.75 % aportaron menos de la recomendación, y sólo el 23.45 % seguía la recomendación basada en los contenidos del suelo y las extracciones del cultivo. La fertilización en exceso de N era entre 5 y 15 % para el 35 % de las explotaciones, y entre 15 y 30 % para el 14.65 % de ellas. En el caso del fósforo, se observa una menor dispersión. El 13.35 % de las explotaciones consultadas aportaba menos del recomendado, el 39.49 % de las explotaciones seguía la recomendación y el 36.48 % de ellas fertilizaba en exceso con fósforo (Cuadro 3).

En cuanto a potasio, el 14.65 % de las explotaciones analizadas fertilizaba en exceso con respecto a la recomendación (de éstos el 4.56 % aportaron más fertilizante del recomendado y el 10.09 % aporta potasio sin estar recomendado), el 74.59 % no aportaba este elemento ni debía hacerlo, sólo el 6.51 % aportaba exactamente la cantidad recomendada, y el 4.23 % aporta menos de la recomendación (Cuadro 3).

De la potencial optimización de la fertilización aportada según los contenidos del suelo y las extracciones se observa que, a pesar de las recomendaciones realizadas no se respetan las dosis y se podría optimizar el uso de los fertilizantes y que

in farming is lost as N₂O-N, expressed in CO₂ equivalents that would be obtained (Good and Beatty, 2011):

$$\text{Avoided CO}_2 \text{ equivalent emissions} = \text{NFU}_{\text{excess}} \times 0.01 \times (44 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} / 28 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}) \times 296$$

These avoided emissions could have been traded as CO₂ emission rights in the Carbon Dioxide Emission Rights Trading System. The rights were estimated for the total number of sugar beet farms in Castilla y León at prices in effect in January 2011 (14.22 €·t⁻¹ CO₂) and December 2011 (7.54 €·t⁻¹) (Anónimo, 2011), since in 2011 the price fell significantly due to the decrease in demand for rights resulting from reduced industry emissions.

RESULTS AND DISCUSSION

Most of the surveyed farms, 51.14 %, applied more nitrogen than recommended, while 24.75 % applied less than recommended and only 23.45 % used the recommended level based on soil contents and crop removals. Excess N fertilization was between 5 and 15 % for 35 % of the farms, and between 15 and 30 % for 14.65 % of them. In the case of phosphorus, less dispersion is observed. Specifically, 13.35 % of the surveyed farms applied less than recommended, 39.49 % followed the recommendation and 36.48 % excessively fertilized with phosphorus (Table 3).

As for potassium, 14.65 % of the analyzed farms fertilized in excess of the recommendation (of these, 4.56 % applied more fertilizer than recommended and 10.09 % applied potassium without being recommended), 74.59 % did not provide this element and nor should they do so, only 6.51 % applied exactly the recommended amount, and 4.23 % applied less than the recommended level (Table 3).

As for the potential optimization of fertilization applied on the basis of soil contents and removals, it can be seen that, despite the recommendations made, doses are not respected and fertilizer use could be optimized, and that the lower the dose recommended, the greater the excess and therefore the greater the potential optimization.

Some of the reasons given by technicians as possible causes of this over-fertilization are traditionalism, ignorance of the consequences of over-fertilization that does not contribute to improved yields (Yadav and Wall, 1998), and the commercial pressure applied to buy the available fertilizers, among others.

Economic optimization

Once the potential optimization of the Fertilizer Unit doses applied to the sugar beet crop in the 2010-2011 cycle was valued, the most economical combination was obtained by taking into account the fertilizers available in the market and the prices thereof.

CUADRO 3. Explotaciones y porcentaje de fertilización en exceso o defecto de N-P-K comparado con las recomendaciones. Optimización de la fertilización N-P-K.**TABLE 3. Farms and fertilization percentage in excess or below recommended N-P-K levels. Optimization of N-P-K fertilization.**

UF / FU		0 %	0.5-15 %	15-30 %	30-50 %	50-75 %	75-100 %	Total
Exceso N/ Excess N	Frec. /	0	107	45	5	0	0	157
	Freq. %	0	34.85	14.66	1.63	0	0	51.14
Defecto N / Deficit N	Frec. /	0	52	20	3	1	0	76
	Freq. %	0	16.94	6.51	0.98	0.36	0	24.76
Equilibrio / Balance	Frec. /	72	0	0	0	0	0	72
	Freq. %	23.45	0	0	0	0	0	23.45
No aporta / Not applied	Frec. /	2	0	0	0	0	0	2
	Freq. %	2	0	0	0	0	0	2
TOTAL		72	159	65	8	1	0	307
Exceso P / Excess P	Frec. /	0	49	33	18	2	10	112
	Freq. %	0	15.96	10.75	5.86	0.65	3.26	36.48
Defecto P / Defecto P	Frec. /	0	24	4	2	7	5	42
	Freq. %	0	7.82	1.30	0.65	2.28	1.63	13.68
Equilibrio / Balance	Frec. /	121	0	0	0	0	0	121
	Freq. %	39.41	0	0	0	0	0	39.41
No aporta / Not applied	Frec. /	32	0	0	0	0	0	32
	Freq. %	32	0	0	0	0	0	32
TOTAL		153	73	37	20	9	15	307
Exceso K / Excess K	Frec. /	0	11	2	0	1	31	45
	Freq. %	0	3.58	0.65	0	0.33	10.10	14.65
Defecto K / Deficit K	Frec. /	0	5	0	0	0	8	13
	Freq. %	0	1.63	0	0	0	2.61	4.23
Equilibrio / Balance	Frec. /	20	0	0	0	0	0	20
	Freq. %	6.51	0	0	0	0	0	6.51
No aporta / Not applied	Frec. /	229	0	0	0	0	0	229
	Freq. %	229	0	0	0	0	0	229
TOTAL		249	16	2	-	1	39	307

cuanto menor es la dosis que se recomienda, mayores son los excesos y por lo tanto, mayor la potencial optimización.

Algunas de las razones señaladas por los técnicos como posibles causas de ésta sobre fertilización, se deben al tradicionalismo, al desconocimiento del destino del exceso de fertilización que no contribuye a la mejora de los rendimientos (Yadav y Wall, 1998), o a la presión comercial por los fertilizantes disponibles, entre otras.

For Group 1 (Table 2), comprising 8.17 % of the surveyed farms, for which 140-180 NFU, 125-150 PFU and 50-100 KFU are recommended, an optimal fertilization cost of 132.67 €·ha⁻¹ was obtained for a mixture of 250 kg of 5-10-20, 217 kg of 18-46-0 (binary DAP) and 327 kg of NAC 27 % (Table 4).

The amount of N and P applied was 15 % greater than the recommended dose on 40.74 % and 23.9 % of the farms, res-

CUADRO 4. Diferencia entre las aportaciones y recomendaciones del blending óptimo en función de los precios y los abonos disponibles en el mercado en 2010, según el modelo de programación lineal.

TABLE 4. Difference between the applications and optimal blending recommendations based on prices and fertilizers available in the market in 2010, according to the linear programming model.

Grupo / Group	Fertilizante / Fertilizer	19-10-5 (kg·ha ⁻¹)	7-10-6 (kg·ha ⁻¹)	5-10-20 (kg·ha ⁻¹)	18-46-0 (kg·ha ⁻¹)	NAC27 (kg·ha ⁻¹)	22-0-0 (kg·ha ⁻¹)	Costo Total / Cost Total (€·ha ⁻¹)
1	Aportación / Application	0	0	250	258	378	0	145.25
	Recomendación / Recommendation	0	0	250	217.39	327.29	0	132.67
	Ahorro / Savings	0	0	0	40.61	50.71	0	12.58
2	Aportación / Application	0	0	575	0	532.5	0	191.82
	Recomendación / Recommendation	0	0	500	0	425.93	0	171.58
	Ahorro / Savings	0	0	75	0	106.57	0	20.24
3	Aportación / Application	0	0	0	312.5	387.96	0	96.57
	Recomendación / Recommendation	0	0	0	271.74	337.36	0	74.6
	Ahorro / Savings	0	0	0	40.76	50.6	0	21.97
4	Aportación / Application	0	0	0	141	580	0	96.42
	Recomendación / Recommendation	0	0	0	108.70	446.05	0	74.19
	Ahorro / Savings	0	0	0	32.3	133.95	0	22.23
5	Aportación / Application	0	0	500	78.8	336.35	0	171.48
	Recomendación / Recommendation	0	0	500	54.35	241.55	0	155.51
	Ahorro / Savings	0	0	0	24.45	95.8	0	15.97
6	Aportación / Application	0	0	0	187.5	300.1	0	66.72
	Recomendación / Recommendation	0	0	0	163.04	261.67	0	58.11
	Ahorro / Savings	0	0	0	24.46	38.43	0	8.61
7	Aportación / Application	0	0	0	0	425	0	55.58
	Recomendación / Recommendation	0	0	0	0	370.37	0	48.33
	Ahorro	0	0	0	0	54.63	0	7.25

Optimización económica

Una vez valorada la potencial optimización de las dosis de Unidades Fertilizantes aportadas en el cultivo de la remolacha en el ciclo 2010-2011, se obtuvo la combinación más económica teniendo en cuenta los fertilizantes disponibles en el mercado y los precios de los mismos.

pectively (Table 5). For available fertilizers, a recommendation of 250 kg of 5-10-20, 258 kg of 18-46-0 (binary DAP) and 378 kg of NAC 27 % was obtained. Therefore, for this group adjusting fertilizer doses could save 12.58 €·ha⁻¹.

For Group 2, accounting for 15.03 % of the surveyed farms, for which 140-180 NFU, 50-75 PFU and 100-150 KFU are

Para el Grupo 1 (Cuadro 2), el 8.17 % de las explotaciones, con recomendaciones de abonado [140-180 UFN; 125-150 UFP; 50-100 UFK], se obtuvo un costo óptimo en fertilizantes de 132.67 €·ha⁻¹ para una mezcla de 250 kg de 5-10-20, 217 kg de 18-46-0 (DAP binario) y 327 kg de NAC 27 % (Cuadro 4).

Las aportaciones excedieron en un 15 % el aporte de N y P; 40.74 % y 23.9 % de las explotaciones (Cuadro 5). Para los abonos disponibles se obtiene una recomendación de 250 kg de 5-10-20, 258 kg de 18-46-0 (DAP binario) y 378 kg de NAC 27 %. Por lo que para este grupo el ajuste de las dosis de fertilizantes podría suponer un ahorro de 12.58 €·ha⁻¹.

Para el Grupo 2, el 15.03 % de las explotaciones consultadas, con recomendación [140-180 UFN; 50-75 UFP; 100-150 UFK], se obtuvo una combinación óptima de fertilizantes para los compuestos disponibles de 500 kg de 5-10-20 y 425 kg de NAC 27 %, obteniendo un costo total de 171.58 €·ha⁻¹ (Cuadro 4). En este grupo el 32.22 % de las explotaciones aplicó hasta un 30 % de exceso de N y el 32.61 % de P. Las aportaciones realizadas para los fertilizantes disponibles serían 500 kg de 5-10-20 y 581 kg de NAC 27 %, suponiendo un costo en abonado de 191.82 €·ha⁻¹. El potencial ahorro económico sería de 20.24 €·ha⁻¹.

El Grupo 3, que constituye el 41.18 % de las explotaciones muestreadas que requieren [140-180 UFN; 125-150 UFP], obtuvo un costo óptimo en la fertilización de 74.6 €·ha⁻¹, aportando 271 kg·ha⁻¹ de 18-46-0 y 337 kg·ha⁻¹ de NAC 27 %. Para este grupo, en cerca del 40 % de las explotaciones se aplicó hasta un 15 % de exceso de N y 36.51 % de P. Las aplicaciones supusieron 312.5 kg·ha⁻¹ de 18-46-0 y 387.96 kg·ha⁻¹ de NAC 27 %, con un precio de 96.57 €·ha⁻¹. El ajuste de las dosis según las recomendaciones supondría un ahorro de 21.97 €·ha⁻¹. Esta cifra es llamativa, pues supone un encarecimiento del precio del abonado en un 29.45 %. Una sobre fertilización del 15 % supone económicamente a la explotación un encarecimiento del abonado del 29.45 % del precio de la dosis recomendada.

El Grupo 4, 17.32 % de la muestra, corresponde a explotaciones con necesidades [140-180 UFN; 50-80 UFP; 50-100 UFK] debería haber utilizado 1.08 unidades de 18-46-0 con un costo de 159.78 €·ha⁻¹ y 4.46 unidades de NAC 27 % con un costo de 582.10 €·ha⁻¹, lo que resulta en un costo óptimo en fertilización de 741.88 €·ha⁻¹.

El Grupo 5, 0.98 % de las explotaciones de la muestra, requerían [100 UFN; 75-125 UFP; 100 UFK]. La combinación óptima tiene un costo de 155.51 €·ha⁻¹, utilizando 500 kg·ha⁻¹ de 5-10-20, 54.35 kg·ha⁻¹ de 18-46-0 y 241 kg·ha⁻¹ de NAC 27 %. Las aportaciones supusieron del orden de [130 UFN; 86.25 UFP; 100 UFK] que en los fertilizantes disponibles equivalieron a 500 kg·ha⁻¹ de 5-10-20, 78.8 kg·ha⁻¹ de 18-46-0 y 336.35 kg·ha⁻¹ de NAC 27 %, con un costo total 171.48 €·ha⁻¹.

recommended, an optimal combination of available fertilizers of 500 kg of 5-10-20 and 425 kg of NAC 27 % was obtained, giving a total cost of 171.58 €·ha⁻¹ (Table 4). In this group, 32.22 % of the farms applied up to 30 % excess N and 32.61 % excess P. The applications made using available fertilizers involved 500 kg of 5-10-20 and 581 kg of NAC 27 %, resulting in a fertilization cost of 191.82 €·ha⁻¹. The potential cost savings would be 20.24 €·ha⁻¹.

Group 3, comprising 41.18 % of the surveyed farms, for which 140-180 NFU and 125-150 PFU are recommended, an optimal fertilization cost of 74.6 €·ha⁻¹ would be obtained by applying 271 kg·ha⁻¹ of 18-46-0 and 337 kg·ha⁻¹ of NAC 27 %. For this group, about 40 % and 36.51 % of the farms applied up to 15 % excess N and P, respectively. The applications provided 312.5 kg·ha⁻¹ of 18-46-0 and 387.96 kg·ha⁻¹ of NAC 27 %, costing 96.57 €·ha⁻¹. Adjusting the dose based on the recommendations would result in a savings of 21.97 €·ha⁻¹. This figure is striking, since it implies a 29.45 % increase in fertilization costs. Over-fertilizing by 15 %, then, means a 29.45 % increase in a farm's fertilization expenditures over the cost of the recommended dose.

Group 4, accounting for 17.32 % of the surveyed farms, for which 140-180 NFU, 50-80 PFU and 50-100 KFU are recommended, should have used 1.08 units of 18-46-0 costing 159.78 €·ha⁻¹ and 4.46 units of NAC 27 % costing 582.10 €·ha⁻¹, resulting in an optimal fertilization cost of 741.88 €·ha⁻¹.

Group 5, comprising 0.98 % of the surveyed farms, for which 100 NFU, 75-125 PFU and 100 KFU are recommended, the optimal combination consists of 500 kg·ha⁻¹ of 5-10-20, 54.35 kg·ha⁻¹ of 18-46-0 and 241 kg·ha⁻¹ of NAC 27 %, resulting in a cost of 155.51 €·ha⁻¹. The applications provided 130 NFU, 86.25 PFU and 100 KFU through the use of 500 kg·ha⁻¹ of 5-10-20, 78.8 kg·ha⁻¹ of 18-46-0 and 336.35 kg·ha⁻¹ of NAC 27 %, resulting in a total cost of 171.48 €·ha⁻¹.

For Group 6, accounting for 3.27 % of the farms, for which 100 NFU and 75-125 PFU are recommended, an economically optimal mixture of 163.04 kg·ha⁻¹ of 18-46-0 and 261.67 kg·ha⁻¹ of NAC 27 %, costing 58.11 €·ha⁻¹, is recommended. In this group, most of the farms over-fertilized N and P by 15 %, which accounts for the fertilizers proposed by the linear model. Applications of 187.5 kg·ha⁻¹ of 18-46-0 and 300.1 kg·ha⁻¹ of NCA 27 % were made, costing 66.72 €·ha⁻¹.

In Group 7, comprising 11.11 % of the farms, for which 100 to 180 units of nitrogen are required, a fertilization recommendation of 370.37 kg·ha⁻¹ of NAC 27 %, costing 48.33 €·ha⁻¹, was obtained by the linear programming model. With 15 % over-fertilization by these farms, 425 kg·ha⁻¹ of NAC 27 % was applied at a cost of 55.58 €·ha⁻¹, which im-

CUADRO 5. Número de explotaciones y porcentaje de fertilización en exceso de N-P-K sobre la mejor combinación económica.
TABLE 5. Number of farms and excess N-P-K fertilization rate above the best economic combination.

Fertilizante / Fertilizer	Potencial optimización / Potential optimization				TOTAL GRUPO / TOTAL GROUP
	0.5 - 15 %	15 - 30 %	30 - 50 %	50 - 100 %	
N	121	45	10	1	177
	40.74 %	15.15 %	3.37 %	0.00336 %	59.59 %
P	71	38	25	22	156
	23.9 %	12.79 %	8.41 %	7.4 %	52.52 %
K	4	4	0	0	8
	1.35 %	1.35 %	0 %	0 %	2.7 %

Para el Grupo 6, el 3.27 % de explotaciones, que tenían una recomendación de [100 UFN; 75-125 UFP], se recomienda una mezcla económicamente óptima de 163.04 kg·ha⁻¹ de 18-46-0 y 261.67 kg·ha⁻¹ de NAC 27 % con un costo de 58.11 €·ha⁻¹. En este grupo la mayoría de las explotaciones sobre fertilizaron un 15 % de N y P, lo que supuso para los fertilizantes propuestos por el modelo lineal, unas aportaciones de 187.5 kg·ha⁻¹ de 18-46-0 y 300.1 kg·ha⁻¹ de NAC 27 % con un costo de 66.72 €·ha⁻¹.

En el Grupo 7, el 11.11 % de las explotaciones, con recomendación de 100 a 180 unidades de nitrógeno, se obtuvo una recomendación de fertilización por programación lineal de 370.37 kg·ha⁻¹ de NAC 27 %, con un costo de 48.33 €·ha⁻¹. Con una sobre fertilización del 15 % de estas explotaciones se aplicaron 425 kg·ha⁻¹ de NAC 27 % con un costo de 55.58 €·ha⁻¹, lo que implica un sobrecosto de 7.25 €·ha⁻¹ sobre la recomendación.

El análisis de los grupos creados con similar recomendación reveló que en el Grupo 1, el 64 % de las explotaciones podría optimizar la compra de fertilizantes nitrogenados; un 48 %, en fertilizantes fosfatados, y un 16 %, en potásicos. Para el Grupo 2, un 21.17 %, un 54.35 % y un 4.17 % de explotaciones pueden optimizar la compra de fertilizante nitrogenado, fosfatado y potásico, respectivamente. En cuanto al Grupo 3, un 52.69 % de las explotaciones podrían optimizar en el consumo de fertilizantes nitrogenados, y un 46.82 %, de fosfatados (Cuadro 5).

Para los Grupos 4, 5 y 6, se observa que el 90 % de las explotaciones tienen gastos en exceso en el uso de fertilizantes. Por ejemplo, en el Grupo 4 el 92.28 y 94.34 % de explotaciones pueden optimizar siguiendo las recomendaciones de nitrógeno y fósforo, respectivamente. El 100 % del Grupo 5 está sobre-fertilizando y no está usando la combinación más económica. En cambio, en el Grupo 6 solo 10 % de explotaciones siguen las recomendaciones.

plies an over-expenditure of 7.25 €·ha⁻¹ above the cost of the recommended dose.

The analysis of the groups created with a similar recommendation revealed that in Group 1, 64 % of the farms could optimize the purchase of nitrogen fertilizers, 48 per cent of phosphate fertilizers, and 16 % of potassium ones. For Group 2, 21.17 %, 54.35 % and 4.17 % of farms could optimize the purchase of nitrogen, phosphate and potassium fertilizers, respectively. As for Group 3, 52.69 % of the farms could optimize the use of nitrogen fertilizers, and 46.82 % of phosphate ones (Table 5).

For Groups 4, 5 and 6, it was found that 90 % of the farms are overspending on fertilizers. In Group 4, for example, 92.28 % and 94.34 % of the farms could optimize fertilizer use by following the nitrogen and phosphorus recommendations, respectively. In Group 5, 100 % of the farms are over-fertilizing and are not using the most economical combination. By contrast, in Group 6 only 10 % of the farms follow the recommendations.

In Group 7, 64.71 % and 17.5 % of the farms could optimize fertilizer use if they chose the best combination of N and P, respectively, and followed the recommendations.

It was found that the greater the excess fertilization, the lower the recommendation. This may be because they do not follow the recommendations, or because they tend to use ternary fertilizers balanced in N, P and K. It is also because there is some degree of routine fertilization, which leads farmers to continue applying certain formulas even when soils are saturated with certain elements (Urbano *et al.*, 2005) (Table 5).

Environmental optimization

The optimization of analyzed nitrogen fertilization would reduce inputs by 5,492 NFU, thus avoiding emissions of 25,545.65 kg of CO₂ equivalent into the atmosphere.

CUADRO 6. Valoración ambiental de las emisiones evitadas con la optimización de la fertilización nitrogenada.
TABLE 6. Environmental valuation of emissions avoided by optimizing nitrogen fertilization.

Emisiones de N ₂ O-N / N ₂ O-N emissions	Emisiones CO ₂ / CO ₂ emissions (kg CO ₂)	Derechos de emisión de CO ₂ / CO ₂ emission rights (€)	
		Enero / January 2011	Diciembre / December 2011
Muestra / Sample	25,545.65	363.26	192.62
Castilla y León	479,043.34	6,812.00	3,612.00

En el Grupo 7, el 64.71 % y 17.5 % de las explotaciones podrían optimizar, si hubieran elegido la combinación más adecuada, de N y P, y siguieran las recomendaciones.

Se observa que mayor es la fertilización excedida cuanto menor es la recomendación. Ello se puede deber a que desoigan las recomendaciones, o bien tiendan a utilizar abonos ternarios equilibrados en N, P y K. También se debe a que existe cierta rutina fertilización, lo que lleva a seguir aplicando determinadas fórmulas cuando los suelos presentan saturación de ciertos elementos (Urbano *et al.*, 2005) (Cuadro 5).

Optimización ambiental

La optimización de la fertilización nitrogenada analizada supondría reducir 5,492 UFN las aportaciones, con lo que se evitarían emisiones de 25,545.65 kg de CO₂ equivalente a la atmósfera.

Estas emisiones podrían suponer la posibilidad de negociar derechos de emisiones de CO₂ por valor de 363.26 € en enero de 2011 y de 192.62 € para el precio de los derechos en diciembre de 2011 (Anónimo, 2011). Por extrapolación y para el total de productores de remolacha azucarera, Castilla y León hubiera podido negociar entre 6,812 € y 3,612 € de derechos de emisiones de CO₂ entre enero y diciembre de 2011, debido a la volatilidad del precio de los derechos de emisión de CO₂ por la disminución de la demanda en este período (Cuadro 6).

Pero además, de las emisiones evitadas, el ajuste de las dosis de fertilizantes nitrogenados evitaría la posible contaminación por volatilización, denitrificación y lixiviación que contamina la atmósfera y aguas superficiales y subterráneas que puede ser de gran importancia (Almasri y Kaluarachchi, 2004d). Estos contaminantes dependerán del momento y forma de aplicación, tipo de fertilizante y riego, entre otras. En este sentido, se recomienda ajustar las dosis de presembrado y adaptar la cobertura a la evolución del cultivo (Antoniadou y Wallach, 2002) que marcará las necesidades. Por ello, trabajos futuros deberán tener en cuenta el análisis de la forma de aplicación, momento, así como condiciones climáticas y el riego que pueden aumentar considerablemente estos contaminantes.

These emissions could have led to the possibility of trading CO₂ emission rights worth € 363.26 in January 2011 and € 192.62 in December 2011 (Anónimo, 2011). By extrapolation and for the total number of sugar beet producers, Castilla y León could have traded between € 6,812 and € 3,612 worth of CO₂ emission rights between January and December 2011, due to the volatility in the price of CO₂ emission rights resulting from decreasing demand in this period (Table 6).

But in addition to the avoided emissions, adjusting the nitrogen fertilizer doses would avoid possible contamination by volatilization, denitrification and leaching that pollute the atmosphere and surface water and groundwater, resulting in significant consequences (Almasri and Kaluarachchi, 2004d). These contaminants depend on the timing and form of application, type of fertilizer and irrigation, among other factors. In this regard, adjusting the pre-sowing dose and adapting doses to plant measurements as the crop evolves (Antoniadou and Wallach, 2002), which will mark its needs, is recommended. Therefore, future work should take into account the form of application and timing, as well as climatic conditions and irrigation which can considerably increase these contaminants.

Taking into account previous studies and by observing farms in Castilla y León, it seems necessary to conduct an in-depth analysis of the economic and environmental criteria influencing fertilization decisions taken by producers in Castilla y León. A fertilization optimization model that includes environmental and economic criteria, without compromising crop yield, and that allows the farms to be profitable in a sustainable manner, also needs to be developed.

The economic and environmental criteria for fertilization optimization require, on the one hand, a review of the current fertilization model used by Castilla y León farms, and, on the other hand, the development of a multi-objective management model that takes these criteria into account.

CONCLUSIONS

In total, 54.72 % of the surveyed farms applied more nitrogen than recommended, while only 19.54 % applied the recommended amount. The difference between the recommended and applied dose is less in the case of phosphorus;

Teniendo en cuenta los estudios previos y la observación de las explotaciones de Castilla y León, parece necesario analizar en profundidad los criterios económicos y ambientales que inciden en las decisiones de fertilización de las explotaciones castellanas y leonesas. También se requiere establecer un modelo de optimización de la fertilización que incluya criterios ambientales y económicos, sin comprometer el rendimiento del cultivo, y que permita rentabilizar las explotaciones de manera sostenible.

Los criterios de optimización económica y ambiental en la fertilización obligan por un lado, a revisar el actual modelo de fertilización en las explotaciones castellanas y leonesas y por otro, plantear un modelo de gestión multiobjetivo que tenga muy presente la consideración de estos criterios.

CONCLUSIONES

El 54.72 % de las explotaciones consultadas, aportaban más nitrógeno del recomendado, mientras que sólo el 19.54 % sigue la recomendación. La diferencia entre la dosis recomendada y la aportada es menor en el caso del fósforo, a pesar de ello el 42.01 % de éstas aplica exceso de fósforo. El 14.65 % de las explotaciones fertilizaba en exceso de potasio, el 4.56 % aportan más fertilizante del recomendado y el 10.09 % aporta potasio sin necesidad.

Cuanto menor es la dosis que se recomienda, mayores son los excesos y por lo tanto, mayor la potencial optimización.

La optimización económica de la fertilización supondría para las explotaciones de la muestra un ahorro de hasta 22.23 €·ha⁻¹. Una sobre fertilización del 15 % puede incrementar hasta el 29.45 % del costo de la fertilización con respecto a la dosis recomendada.

La optimización de la fertilización nitrogenada supondría, para las explotaciones analizadas, evitar emisiones de 25,545.65 kg de CO₂ equivalente. Castilla y León hubiera podido negociar entre enero y diciembre de 2011, de 6,812 € a 3,612 € en derechos de emisiones de CO₂, por la volatilidad del precio y la disminución de la demanda en este periodo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por la convocatoria de apoyo a la investigación de la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León, España.

LITERATURA CITADA

ALMASRI M.N.; KALUARACHCHI J.J. 2004a. Implications of on-ground nitrogen loading and soil transformations on ground water quality management. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 40(1): 165-186. doi: 10.1111/j.1752-1688.2004.tb01017.x

nevertheless, 42.01 % of these farms applied excess phosphorus. Moreover, 14.65 % of the farms excessively fertilized with potassium; specifically, 4.56 % applied more fertilizer than recommended and 10.09 % applied potassium without needing to apply any.

The lower the recommended dose is, the greater the excess and therefore the greater the potential optimization.

Economic optimization of fertilization would provide the surveyed farms with a savings of up to 22.23 €·ha⁻¹. Over-fertilization by 15 % can increase the cost of fertilization by up to 29.45 % compared to the recommended dose.

The optimization of nitrogen fertilization would, for the farms analyzed, avoid emissions of 25,545.65 kg of CO₂ equivalent. Castilla y León could have traded, between January and December 2011, from € 6,812 to € 3,612 in CO₂ emission rights, due to price volatility and declining demand in this period.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was financially supported by the call for research support from the Ministry of Education of the Junta de Castilla y León, Spain.

End of English Version

- ALMASRI M.N.; KALUARACHCHI J.J. 2004b. Assessment and management of long-term nitrate pollution of ground water in agriculture-dominated watersheds. *Journal of Hydrology* 295: 225-245. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.03.013
- ALMASRI M.N.; KALUARACHCHI J.J. 2004c. Modular neural networks to predict the nitrate distribution in ground water using the on-ground nitrogen loading and recharge data. *Environmental Modelling and Software* 20(7) 851-871. doi: 10.1016/j.envsoft.2004.05.001
- ALMASRI M.N.; KALUARACHCHI J.J. 2004d. Multi-criteria decision analysis for the optimal management of nitrate contamination of aquifers. *Journal of Environmental management* 74(4): 365-381. doi: 10.1016/j.jenvman.2004.10.006
- ANÓNIMO. 2006. N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application. In: Intergovernmental Panel of Climate Change guidelines for greenhouse gas inventories. Volume 4: Agriculture, forestry and other land use. 54 p. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_11_Ch11_N2O&CO2.pdf
- ANÓNIMO. 2007. Ahorro, Eficiencia energética y Fertilización nitrogenada. Instituto para la Diversificación y el Ahorro Energética (IDEA). Madrid. 44 p.
- ANÓNIMO. 2011. La Bolsa del SENDECO₂. Sistema Electrónico de Negociación de Derechos de Carbono. <http://www.sendeco2.com/>.

- ANÓNIMO. 2014. Plan 2014. Asociación para la Investigación de la Mejora del Cultivo de la Remolacha Azucarera (AIMCRA). <http://www.aimcra.com/Plan2014/inicio.php?seccion=1>
- ANTONIADOU, T.; WALLACH D. 2002. Evaluating optimal fertilizer rates using plant measurements. *Journal of Applied Statistics* 29(7): 120-132.
- CARR P.M.; CARLSON G.R.; JACOBSEN J.S.; NIELSEN G.A.; SKOGLEY E.O. 1991. Farming soils not field: a strategy for increasing fertilizer profitability. *Journal of Production Agriculture* 4(1): 57-61. doi: 10.2134/jpa1991.0057
- GONZÁLEZ, F.; REDONDO, P.; PESCADOR, R.; URBANO, B. 2003. Galega officinalis for increasing milk production. *NZ Journal of Agricultural Research*, 47: 233-245.
- GOOD A.G.; BEATTY P.H. 2011. Fertilizing Nature: A tragedy of Excess in the Commons. *PLoS Biol* 9(8): e1001124. doi:10.1371/journal.pbio.1001124.
- HAYES J.C.; OVERTON A.; PRICE J.W. 1994. Feasibility of site-specific nutrient and pesticide applications. In: Campbell, K.L., W.D. Graham, and A.B. Bottcher, (eds.). *Environmentally Sound Agriculture. Proceedings of the 2nd Conference, April 20-22, 1994, Orlando, FL*. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers.
- HERGERT G.W. 2010. Sugar beet fertilization. *Sugar Tech* (September and December 2010) 12(3-4): 256-266. doi: 10.1007/s12355-010-0037-1
- LI, H.; HUANG G.; MENG, Q.; MA, L.; YUAN, L.; WANG, F.; ZHANG, W.; CUI, Z.; SHEN, J.; CHEN, X.; JIANG, R.; ZHANG, F. 2011. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review. *Plant Soil* 349: 157-167. doi: 10.1007/s11104-011-0909-5
- LONG, D.S.; CARLSON, G.R.; NIELSEN G.A.; LACHAPPELLE G. 1995. Increasing profitability with variable rate fertilization. *Montana Agresearch* 12 (1): 77-90. <http://www.montana.edu/cpa/news/wwwpb-archives/ag/long.html>
- LOWENBERG-DEBOER, J.; SWINTON, S.M. 1995. Economics of site-specific management in agronomic crops. Staff Paper 95-14, Department of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, IN. 551-555. doi: 10.2134/1997.stateofsitespecific.c16
- MEISINGER, J.J.; RANDALL, G.W. 1991. Estimating N budgets for soil-crop systems. In: FOLLET. R.F.; KEENEDY D.R.; CRUSE R.M. (Eds.). *Managing N for Groundwater Quality and Farm Profitability*. Soil Science Society of America, Madison WI. <https://dl.sciencesocieties.org/publications/books/articles/acsesspublicati/managingnitroge/85>
- REJESUS, R.M.; HORNBAKER, R.H. 1999. Economic and environmental evaluation of alternative pollution-reducing nitrogen management practices in central Illinois. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 75: 41-53. doi: 10.1016/S0167-8809(99)00058-4
- URBANO, B.; BALLESTERO, S.A.; GONZÁLEZ, F. 2002. El Control de Malas Hierbas en Sistemas Agrarios Ecompatibles. Excma Diputación de Valladolid. Valladolid. 43p.
- URBANO, B.; GARCÍA, V.M.; GONZÁLEZ, F.; GARZÓN, E. 2005. El alto contenido en fósforo de muchos regadíos leoneses aconseja reducir su aportación. *Tierras de Castilla y León* 119: 70-79.
- URBANO, P. 2002. *Fitotecnia: Ingeniería de la Producción Vegetal*. Editorial MundiPrensa. Madrid. 528p.
- WIBAWA, W.N.; DLUDLU, D.L.; SWENSON, L.J.; HOPKINS, D.G.; DAHNKE, W.C. 1993. Variable fertilizer application based on yield goal, soil fertility, and soil map unit. *Journal of Production Agriculture*, 6. 255-261. doi: 10.2134/jpa1993.0255
- YADAV, S.N.; WALL, D.B. 1998. Benefit-cost analysis of best management practices implemented to control nitrate contamination of groundwater. *Water Resources Research* 34 (3): 497-504. doi: 10.1029/97WR01981