

# Utilización racional de los fertilizantes

por J.B. Bole y S.K.A. Danso\*

Los fertilizantes inorgánicos se han convertido en los pilares que sustentan una población mundial en eclosión. Con una población que se duplica en el curso de nuestras vidas, las posibilidades de la agricultura para alimentar a la humanidad se ven sometidas a tensiones abrumadoras. La agricultura ha respondido magníficamente, habiéndose más que duplicado el rendimiento de la mayor parte de los cultivos de los últimos 15 años. La producción de cereales aumentó en un 150% (Cuadro 1). Pero, por desgracia, más de la mitad de este aumento puede atribuirse a un aporte para su fabricación que depende de un recurso no renovable: los fertilizantes inorgánicos [1].

La producción mundial de fertilizantes aumentó de 8 millones de toneladas a finales de la segunda guerra mundial a 113 millones de toneladas en 1978. Antes del aumento del precio de la energía, la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial predijo que la producción se elevaría a 300 millones de toneladas hacia el año 2000. La triste realidad de la decuplicación del precio de la energía, y el haberse comprendido que las reservas energéticas pueden no estar siempre disponibles para la producción de fertilizantes, nos obligan hoy a modificar esas previsiones.

Los países en desarrollo son los que más necesitan un aumento de la producción alimentaria. Aunque poseen el 60% de las tierras dedicadas al cultivo de cereales en todo el mundo, necesitan alimentar el 73% de los 4400 millones de personas del planeta. Desde principios de la década de 1960 hasta 1978, la producción y el empleo de fertilizantes aumentó mucho más rápidamente en los países en desarrollo que en los desarrollados (Cuadro 1). Como consecuencia, las cosechas de cereales se elevaron a más del doble, pero el aumento de población corrió parejo y la producción de cereales per cápita solo creció ligeramente. La auténtica preocupación de los países en desarrollo es el futuro inmediato. En los lugares en que más urgente es la necesidad de alimentos, esa diferencia va en aumento.

Los fertilizantes inorgánicos constituyen un recurso caro para un país en desarrollo. Por lo general han de ser importados, empobreciéndose así las escasas reservas de divisas de esos países. Es posible que sean los únicos insumos que el campesino necesita pagar en moneda fuerte. Por ello, es esencial que el fertilizante se emplee de la manera más eficaz, de modo que se obtenga mayor cantidad de alimentos por unidad de producto. En tal caso, su uso se verá fomentado y se producirán más alimentos allí donde más urgentemente se necesitan. Los esfuerzos de la División Mixta FAO/OIEA en esta esfera están dirigidos a las naciones en desarrollo.

Los agrónomos han de poder recomendar los mejores ritmos, modos, ubicaciones y momentos de aplicación de los nutrientes para cada cultivo y en función de las

condiciones climáticas y edafológicas en las que aquél se desarrolla. Esta información no puede obtenerse si no se dispone de un vigoroso programa de investigación. Las experiencias de la División Mixta FAO/OIEA han revelado que una medición directa de la eficacia de asimilación de fertilizantes es el medio más efectivo de obtener tal información. Esto solo puede llevarse a cabo marcando el factor nutriente del fertilizante con un isótopo. Por fortuna, existen radisótopos del fósforo, azufre, calcio, zinc, hierro, manganeso y otros elementos nutrientes. El precio del isótopo estable N-15 y del equipo necesario para su análisis ha ido descendiendo en los últimos años, con lo que la investigación en parcelas experimentales con fertilizantes marcados con isótopos del nitrógeno (N) se practica hoy en día extensamente.

**Cuadro 1 Empleo de fertilizantes (N + P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + K<sub>2</sub>O) y producción cereal anuales [2]**

	Países en desarrollo 1961-65 1978		Países desarrollados 1961-65 1978	
Producción de fertilizantes (en millones de toneladas)	2,7	19,7	37,9	93,0
Consumo de fertilizantes (kg/Ha arables)	7,6	39,4	50,6	115,1
(kg/persona)	2,3	9,4	33,1	67,5
Producción de cereales (en millones de toneladas)	289	745	344	851
(kg/Ha arables)	464	1100	542	1310
(kg/persona/día)	0,53	0,64	1,36	2,02

## Empleo eficaz de los fertilizantes

El primero de los programas internacionales coordinados de investigación sirve aún hoy de ejemplo del buen empleo de los isótopos marcadores en fertilizantes para la resolución de problemas prácticos. Numerosos estudios realizados revelan que cuando el fertilizante se hallaba cerca de la semilla en el momento de la siembra los cereales asimilaron mejor los fertilizantes de fósforo (P) que cuando habían sido esparcidos y absorbidos uniformemente por todo el terreno. Sin embargo, los esfuerzos realizados por la International Rice Commission para determinar la ubicación más eficaz de los fertilizantes fosfóricos en los terrenos inundados en que se cultiva el arroz no habían resultado concluyentes. La dependencia de Agricultura del OIEA, que posteriormente se convertiría en la División Mixta FAO/OIEA, inició un estudio coordinado utilizando fertilizantes fosfatados marcados con P-32.

Los resultados obtenidos fueron claros, decisivos e inesperados. En los nueve lugares en que se llevó a cabo el experimento, la aplicación del fosfato en la superficie o bien a escasa profundidad en la tierra cavada resultó igualar y multiplicar por dos, respectivamente, la eficacia con respecto a los casos en que el fertilizante se aplicaba

\*El Sr. Bole es Jefe de la Sección de Fertilidad de Suelos, Riegos y Producción Agrícola de la División Mixta FAO/OIEA. El Sr. Danso es funcionario en la misma Sección.



Estudio de la asimilación de nitrógeno por las plantas mediante el uso de técnicas nucleares: resultados de la aplicación del isótopo marcado N-15.

bajo la simiente en terrenos secos o entre las hileras de arroz [3]. Solo el empleo de un fertilizante marcado ha podido permitir obtener resultados espectaculares.

Otras investigaciones efectuadas sobre el terreno con arroz de regadío incluídas en el mismo programa coordinado — empleando esta vez fertilizantes marcados con N-15 —, arrojó resultados casi igual de decisivos (véase la figura). Los nitratos, que son corrientemente muy eficaces como fuentes de nitrógeno para los cereales, resultaron ser prácticamente ineficaces en 14 de los 15 lugares en que se aplicaron bajo la planta de arroz al transplantar ésta. El sulfato amónico y la urea, que contienen nitrógeno en forma de radical amonio, mostraron igual eficacia, gran superioridad sobre el nitrato de sodio. El nitrato amónico presentó una eficacia intermedia, debido a que la mitad del nitrógeno estaba en forma de nitrato.

Cuando se aplicó el nitrógeno con el agua de riego dos semanas antes de comenzar la gemación se observó la misma evolución, y la proporción de nitrógeno derivado del fertilizante en la planta resultó ser mayor que cuando el fertilizante se había aplicado en el momento de plantar.

La mayor eficacia de asimilación del fertilizante nitrogenado cuando éste se aplica en un momento más avanzado de la temporada que en el caso de su aplicación en el momento del trasplante o poco después de éste, se confirmó en estudios sobre el arroz llevados a cabo en siete lugares distintos, en el marco de otro programa internacional coordinado [4]. A lo largo de la temporada se aplicó fertilizante nitrogenado en cuatro ocasiones: en el momento del trasplante; tres semanas después de éste; una semana antes de la gemación; y en la fase de expansión de las hojas. En los cuatro casos el tratamiento con fertilizantes fue el mismo, pero en cada

aplicación uno de los cuatro tratamientos contenía fertilizante marcado con N-15 mientras que los tres restantes contenían fertilizantes sin marcar. De este modo, fue posible medir la eficacia de asimilación en cada aplicación de fertilizantes. El arroz se cosechó y se analizó su contenido de N-15 en cada una de las ocho fases de maduración marcadas para determinar en cuál de ellas se asimiló el fertilizante aplicado.

La asimilación del nitrógeno se produjo muy rápidamente. El aplicado antes de la gemación había sido aprovechado al máximo ya en la fase de expansión de las hojas, mucho antes de la formación de panojas. El nitrógeno aplicado en la fase de expansión de las hojas se asimiló con toda evidencia inmediatamente, puesto que su aprovechamiento ya había alcanzado el máximo al efectuar la primera toma de muestras posterior, es decir, en la fase de formación de panojas.

Sin embargo, el dato apasionante obtenido durante el estudio de la eficacia del empleo de fertilizantes fue que el fertilizante nitrogenado aplicado en la fase de expansión de las hojas se asimiló en la planta de arroz con una eficacia doble que en el caso de su aplicación durante el trasplante o tres semanas después.

La deficiencia de cinc (Zn) es considerada por el Instituto Internacional de Investigaciones sobre el Arroz (IRRI) como la alteración nutricional más extendida en Filipinas por lo que respecta al arroz de regadío, y se considera un problema en la mayoría de los demás países productores de arroz. Recientemente, la División Mixta FAO/OIEA ha llevado a cabo un programa de investigaciones de micronutrientes con ayuda de isótopos en los cultivos de arroz, programa centrado en la asimilación del Zn. Los experimentos realizados sobre el terreno en nueve países productores de arroz revelaron que con solo 5 kg de Zn/Ha en forma de  $SO_4Zn$  se eliminaba

completamente la carencia de Zn y se aportaba al grano de arroz hasta el 89% de este elemento. Estos resultados no mejoraron al elevar la dosis a 10 kg/Ha, es decir, el doble. Allí donde fue posible proseguir los estudios en el mismo suelo durante varios años sucesivos, esta reducida dosis de cinc mantuvo su eficacia durante la segunda y tercera temporadas de cultivo, aportando aproximadamente el 30% del cinc en el segundo año y entre el 15 y el 20% en el tercero [5]. Otros estudios incluidos en este programa indicaron que el fertilizante de Zn podía aplicarse de muchas maneras distintas manteniéndose la misma eficacia, y que las ventajas que ofrecía el empleo de quelatos de Zn más caros en el arroz de terrenos inundados eran escasas o nulas.

Estos cuatro estudios se presentan como ejemplos de programas sobre el terreno que han transformado los métodos seguidos en la aplicación de fertilizantes en gran parte del mundo. Estos resultados no hubieran podido obtenerse o no hubieran sido tan concluyentes sin la medición directa de la eficacia con que las plantas aprovechan el fertilizante. Los isótopos proporcionan el único método directo para evaluar la asimilación de fertilizantes.

Los resultados de muchos de estos estudios isotópicos han sido resumidos recientemente por la División Mixta FAO/OIEA y publicados por la FAO para su empleo por los especialistas de la industria agrícola [6]. En la actualidad grupos internacionales de científicos están empleando técnicas análogas en estudios coordinados por la División Mixta FAO/OIEA para desarrollar métodos de aplicación de fertilizantes para obtener cosechas múltiples de intercultivos leguminosa-cereal, y para determinar la incidencia de los productos agroquímicos en la eficacia de aprovechamiento de los fertilizantes.

Las ventajas económicas derivadas de la explotación de estos resultados son inmensas. Un país que participó en un programa de investigación sobre fertilización nitrogenada del maíz calculó haber obtenido una ganancia nada menos que de 36 millones de dólares anuales después de que sus agricultores adoptasen las técnicas de aplicación de fertilizante que el programa había determinado como las más eficaces. En Sri Lanka, la producción de cocoteros aumentó con *menor* uso de fertilizantes. Son posibles todavía mayores economías, ya que se ha calculado que podría ahorrarse el 50% del fertilizante utilizado en la actualidad en todos los países empleando métodos más perfeccionados que se basen en resultados de certeras investigaciones.

#### Otras fuentes de nutrientes

En último extremo, la solución a la creciente necesidad de fertilizantes inorgánicos para la producción alimentaria consiste en sustituir los fertilizantes por otras fuentes de nutrientes menos caras o más fácilmente asequibles en el propio país. La naturaleza ha producido ciertos tipos de asociaciones por los que determinadas plantas pueden aprovechar para su crecimiento, en combinación con algunos micro-organismos, parte del 80% de la atmósfera constituido por nitrógeno gaseoso ( $N_2$ ). Esta utilización del gas  $N_2$  por las plantas se denomina fijación biológica del nitrógeno (FBN). Numerosos países disponen de fuentes de fosfatos naturales que en determinados suelos

o en condiciones apropiadas pueden sustituir a los fertilizantes fosfatados. Una simbiosis específica de un microbio con una raíz vegetal, la micorriza, puede permitir a una planta aprovechar los fosfatos naturales o determinadas formas de fósforo o de otros nutrientes presentes en el suelo que no son asimilables por las plantas en las que no se da esta asociación. Es posible que esta asociación, la micorriza, pueda desarrollarse y alcanzar la importancia actual de la FBN. Las técnicas isotópicas pueden ser útiles en todos estos tipos de investigación, pero emplearemos aquí como ejemplo la fijación del nitrógeno.

La fijación biológica del nitrógeno resulta difícil de medir, dado que una vez que este elemento forma parte de la planta es por lo general imposible determinar si proviene del fertilizante, del suelo o de la atmósfera. La comparación entre el nitrógeno absorbido por una planta fijadora y el asimilado por una no fijadora proporciona una valoración inexacta de la FBN, ya que las plantas, y especialmente las que pertenecen a grupos distintos, asimilan con frecuencia cantidades distintas de nitrógeno del suelo. Los intentos de marcar el  $N_2$  gaseoso con N-15 no han permitido obtener resultados concluyentes, ya que la cámara que contiene el  $N_2$  afecta por lo general al crecimiento de la planta.

La reducción del acetileno a etileno por los micro-organismos asociados con las raíces vegetales puede medirse con gran precisión. Dado que el mismo sistema enzimático que reduce el  $N_2$  a  $NH_4^+$  reduce también el acetileno para dar etileno, esta técnica se ha empleado para evaluar la FBN. Por desgracia este método presenta muchas limitaciones, siendo la principal de ellas que el cálculo solo tiene validez durante el breve período y para las condiciones en que se ha efectuado la medición. Aun efectuando gran número de mediciones, la FBN no puede extrapolarse sin error a toda la temporada de cultivo.

Por ello, el personal de la División Mixta FAO/OIEA y la dependencia de Agricultura del Laboratorio de Seibersdorf del OIEA ha desarrollado en parcelas experimentales métodos mediante los que es posible obtener valores cuantitativos de la FBN a lo largo de toda la temporada mediante el empleo de técnicas isotópicas [7].

Esta técnica ha sido aplicada con éxito por la División Mixta FAO/OIEA en investigaciones coordinadas destinadas a determinar cuantitativamente el aumento de la FBN correspondiente a diversos métodos de cultivo empleados. En Hungría, los fertilizantes fosfatados (105 kg de P/Ha) hicieron aumentar la fijación de nitrógeno en plantas de soja de 7 a 71 kg de N/Ha. En India, la fijación de nitrógeno en plantas de soja aumentó, mediante el empleo de cepas mejoradas de *Rhizobium*, de 79 a 102 kg de N/Ha; en Ghana, mediante técnicas de inoculación perfeccionadas, la fijación de nitrógeno en el cacahuete aumentó de 82 a 106 kg de N/Ha. El nitrógeno de los fertilizantes hace disminuir por lo general la FBN, aunque la absorción total de nitrógeno puede llegar a aumentar, especialmente cuando la FBN no alcanza su valor máximo. Sorprendentemente, sin embargo, la fijación de nitrógeno en matas de habas aumentó con el empleo de fertilizantes nitrogenados en Egipto y (si bien la FBN en plantas de soja disminuyó

**Cuadro 2. Empleo del  $SO_4(NH_4)_2$  marcado con N-15 para medir la fijación de nitrógeno en un cultivo de leguminosas**

Tipo y ubicación	N marcado aplicado inicialmente (kg/Ha)	Otros tratamientos	N fijado (kg/Ha)
Soja	40	0 kg P/ha al plantar	7
Hungría	40	35 kg P/ha al plantar	42
	40	70 kg P/ha al plantar	62
	40	105 kg P/ha al plantar	71
Soja India	20	sin inocular	79
	20	inoculado	102
Cacahuete Ghana	15	sin inocular	82
	15	inoculado en semillas	94
	15	inoculado en suelos	100
	15	inoculado en suelos + B + Mo	106
Haba	17,5	—	20
Egipto	35	—	26
	70	—	34
	140	—	33
Soja Rumania	20	Cepa $SO_4$ de <i>Rhizobium</i>	78
	20	Cepa $SO_{146}$ de <i>Rhizobium</i>	71
	20	inoculante de cepa múltiple	107
	100	Cepa $SO_{146}$ de <i>Rhizobium</i>	64
	100	inoculante de cepa múltiple	41
Soja Senegal	20	Variedad 44A73	33
	100	Variedad 44A73	19
	100	Variedad 4173	2
	100	Variedad Júpiter	34

en Rumania y Senegal) los resultados sugieren que es posible que determinadas variedades de soja y ciertas cepas de *Rhizobium* respondan en menor medida que otras a elevados niveles de fertilizante nitrogenado (Cuadro 2). Sería, pues, posible encontrar asociaciones de micro-organismos y leguminosas que hagan máxima la FBN y que no interfieran con el nitrógeno del fertilizante cuando se sometan a cultivos intercalados con un cereal.

En todos los medios científicos se espera un progreso radical que conduzca al desarrollo de variedades no leguminosas que puedan obtener el nitrógeno mediante FBN. Los últimos progresos de la investigación sobre transferencia de ADN recombinante son prometedores en el sentido de que podrá crearse ese tipo de plantas. Las División Mixta FAO/OIEA prevé el empleo de técnicas isotópicas que han demostrado ser instrumentos eficaces de investigación de las leguminosas, con el fin de hacer máxima la FBN en estas nuevas variedades si llegan a obtenerse.

### Referencias

- [1] von Peter *Fertilizer requirements in developing countries* The Fertilizer Society, Acta N° 188, Londres (1980).
- [2] *FAO 1979 production yearbook* FAO, Roma (1980).
- [3] *FAO 1978 fertilizer yearbook* FAO, Roma (1979).
- [4] *Rice fertilization* Colección Informes Técnicos N° 108, OIEA, Viena (1970).
- [5] *Isotope studies on rice fertilization* Colección Informes Técnicos N° 181, OIEA, Viena (1978).
- [6] *Zinc fertilization of flooded rice* TECDOC-242, OIEA, Viena (1981).
- [7] *Maximizing the efficiency of fertilizer use by grain crops* Fertilizer Bulletin N° 3, FAO, Roma (1980).
- [8] M. Fried and H. Broeshart *An independent measure of the amount of nitrogen fixed by a legume crop* Plant and Soil 43, págs. 707 a 711 (1974).

Otro experimento basado en la aplicación de fertilizante marcado con N-15 para comprobar la más eficaz utilización de abono en el arroz.

