

EVALUACIÓN DE DOS MODELOS DE CURVAS DE RESPUESTA A DOSIS CRECIENTES DE N EN CULTIVOS DE IMPORTANCIA ECONÓMICA.

Gloria M. Martín¹, Alberto Pérez², Ramón Rivera³, Carlos Bustamante⁴, Mario Varela¹.

1. Investigadores auxiliares. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. Gaveta Postal 1, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, CP 32700. gloriam@inca.edu.cu; varela@inca.edu.cu
2. Investigador auxiliar, Facultad Agroforestal de Montaña, Universidad de Guantánamo, Carretera a Santiago de Cuba, Km 2 ½ Guantánamo, Cuba. aperez@fam.cug.co.cu
3. Investigador titular. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. Gaveta Postal 1, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, CP 32700. rivera@inca.edu.cu
4. Investigador titular. Estación Central de Investigaciones de Café y Cacao, Cruce de los Baños, Tercer Frente, CP 92700, Santiago de Cuba, Cuba. Email: bustamante@ecicc.ciges.inf.cu

Introducción

Dentro de la agricultura sostenible, el empleo de diversas alternativas nutricionales agroecológicas, como los abonos verdes y los biofertilizantes a base de microorganismos benéficos, se hacen cada día más necesarios, debido al aporte de N, reciclaje de otros elementos esenciales para las plantas y la promoción de la simbiosis efectiva con hongos micorrízicos arbusculares, que proporcionan una mayor eficiencia de la absorción de agua y nutrientes dentro de los sistemas agrícolas, entre otras ventajas (1).

Dentro de este contexto del manejo integrado de nutrimentos, se hacen necesarios los trabajos encaminados a la evaluación de la respuesta de los cultivos a dosis crecientes de N, ya sean aplicados en forma de fertilizantes minerales o su combinación con diversas alternativas nutricionales, como los abonos verdes, y/o en presencia de hongos micorrízicos arbusculares, para recomendar las dosis óptimas complementarias de fertilización con las que se obtendrán los mayores rendimientos económicos.

El método común para generar recomendaciones de fertilización es ajustar a los datos, en forma independiente para cada cultivo, a través de modelos matemáticos. Usualmente se propone el modelo cuadrático con interacciones de segundo orden. Sin embargo, debido a que las dosis óptimas dependen del modelo ajustado y porque algunos modelos sobrestiman las dosis óptimas, es aconsejable el ajuste y comparación de varios modelos antes de efectuar recomendaciones de fertilización (2).

El siguiente trabajo se realizó con el objetivo de comparar la respuesta a dosis crecientes de N, añadidos en forma de fertilizante mineral, abonos verdes, o su combinación, en presencia o no de la inoculación con HMA, en dos cultivos de importancia económica: maíz y café.

Materiales y métodos

Maíz¹

En este experimento se evaluó la influencia de *Canavalia ensiformis*, empleada como abono verde en sucesión y de la inoculación micorrízica del maíz (*Zea mays*) con una cepa eficiente de HMA sobre los requerimientos de fertilizante nitrogenado de este cultivo en suelo Nitisol Ródico Éutrico.

Se realizó un experimento en parcelas experimentales ubicadas en el Departamento de Servicios Agrícolas del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), a 23°01' Lat N y 82°08' Long O, a 138 msnm., municipio San José de las Lajas, Mayabeque, en el occidente de Cuba.

¹ Parte de la tesis de Doctorado de G. Martín

El experimento se ejecutó durante el período mayo – octubre (estación de lluvias) en los años 2003 y 2006.

Durante el primer año (2003) en el experimento se establecieron las secuencias siguientes: 1) barbecho por dos meses y siembra posterior de maíz, 2) canavalia como abono verde precedente al cultivo de maíz y 3) canavalia como precedente y el maíz se inoculó con la cepa de HMA *Glomus cubense*, cepa INCAM 4 procedente del cepario del INCA por la técnica de recubrimiento de semillas.

En las secuencias 1 y 2 el maíz se sembró sin inoculación con HMA. En cada secuencia se evaluaron 5 dosis crecientes de fertilizante mineral nitrogenado (0; 50; 100; 150 y 200 kg N.ha⁻¹). Se empleó la variedad de maíz Francisco mejorado, y el diseño experimental empleado fue de parcelas divididas, con cuatro repeticiones. Durante el segundo año (2006) se estudiaron las mismas secuencias descritas y se añadió una secuencia más consistente en barbecho por dos meses y siembra posterior de maíz inoculado con la misma cepa de HMA.

La canavalia precedente al maíz se sembró en el mes de mayo de los años estudiados; se empleó como marco de plantación la distancia de 0.45 m por 0.30 m y dos semillas por nido. El abono verde se cortó e incorporó a los 60 días de germinado. Se utilizó nitrato de amonio (NH₄NO₃) como portador, fraccionado al 50 % de la dosis en el momento de la siembra y 50 % a los 30 días después de la germinación del maíz (Tabla I).

Tabla I. Tratamientos estudiados en el experimento de maíz.

	Secuencias			
	Barbecho maíz	Canavalia maíz	Canavalia maíz + HMA	Barbecho maíz + HMA ¹
Dosis de fertilizant e mineral	0 kg N . ha ⁻¹	0 kg N . ha ⁻¹	0 kg N . ha ⁻¹	0 kg N . ha ⁻¹
	50 kg N . ha ⁻¹	50 kg N . ha ⁻¹	50 kg N . ha ⁻¹	50 kg N . ha ⁻¹
	100 kg N . ha ⁻¹ ₁	100 kg N . ha ⁻¹	100 kg N . ha ⁻¹	100 kg N . ha ⁻¹ ₁
	150 kg N . ha ⁻¹ ₁	150 kg N . ha ⁻¹	150 kg N . ha ⁻¹	150 kg N . ha ⁻¹ ₁
	200 kg N . ha ⁻¹ ₁	200 kg N . ha ⁻¹	200 kg N . ha ⁻¹	200 kg N . ha ⁻¹ ₁

Barbecho: suelo en descanso por dos meses. Abono verde: *Canavalia ensiformis*. Fertilizante mineral: NH₄NO₃. Inoculación con HMA: EcoMic® a base de *Glomus cubense*.

¹ Este tratamiento sólo se ejecutó en el 2006.

La siembra del maíz se realizó de forma manual 20 días después de la incorporación del abono verde, en el mes de agosto. Se empleó como marco de plantación la distancia de 0.90 m x 0.30 m. En el momento de la cosecha de maíz verde, se determinó el rendimiento (t.ha⁻¹). Las características del suelo y clima, así como los resultados agronómicos de este experimento se detallan en el volumen 43, número 2, de la revista Cuban Journal of Agricultural Science (4).

Cafeto²

Con el propósito de determinar el efecto de la fertilización N sobre el rendimiento del *Coffea canephora*, se realizó este experimento en la localidad Tercer Frente, municipio del mismo nombre, macizo montañoso Sierra Maestra, a los 20°09'lat N y 76°16'long O, a 35 km ONO de

² Parte de la tesis de Doctorado de A. Pérez

la ciudad de Santiago de Cuba, a 150 m.s.n.m. y en La Alcarraza, situada en el municipio Sagua de Tánamo, macizo montañoso Nipe – Sagua – Baracoa, a los 20°35' lat N y 75°15' long O, a 118 km ESE de la ciudad de Holguín, con una altura de 300 m.s.n.m., en la región oriental de Cuba.

Las posturas fueron plantadas en mayo de 1996 a una distancia de 3 x 1.5 m entre plantas, para una densidad de plantación de 2 222 plantas.ha⁻¹. En un diseño experimental de bloques al azar, se estudió la respuesta de cinco sistemas de fertilización nitrogenada (Tabla II), con cuatro réplicas, durante dos ciclos productivos. Las parcelas experimentales estuvieron compuestas por tres hileras de siete plantas cada una, de ellas las cinco centrales de cada surco se consideraron como de cálculo.

La dosis de N de 1996 se fraccionó al 50 %, con dos aplicaciones anuales (abril e inicio de octubre). En 1997, 1998 y 1999 se fraccionó en tres momentos a partes iguales (abril, julio y octubre), en ambas localidades. El resto de los años se aplicó en dos momentos, al 50 %, en abril e inicios de octubre, para cada sitio experimental.

En el segundo ciclo, la dosis de nitrógeno se fraccionó al 33 % y se aplicó todos los años en tres oportunidades (abril, junio e inicios de octubre). Como portador se utilizó urea. Los fertilizantes se incorporaron a la zona de fertilización, en forma de media luna, alrededor del tallo.

Tabla II. Dosis de nitrógeno (kg.ha⁻¹) empleadas en los diferentes esquemas de fertilización estudiados en el cultivo de caféto.

Tratamientos	Primer ciclo productivo			Segundo ciclo productivo		
	1996	1997	1998 - 2002	2003	2004	2005 - 2007
N ₀	0	0	0	0	0	0
N ₁	30	45	50	50	75	100
N ₂	60	90	100	100	150	200
N ₃	90	135	150	150	225	300
N ₄	120	180	200	200	300	400

Todos los años se cosecharon los frutos maduros de cada parcela, se pesaron (kg) y se extrapolaron a t.ha⁻¹ de café cereza y posteriormente a tonelada de café oro por hectárea (t.ha⁻¹ de café oro). Las características del suelo y clima, así como los efectos agronómicos de este experimento se detallan, en el volumen 38, número 4 de la revista Centro Agrícola, los resultados del primer ciclo productivo (5) y los resultados del segundo ciclo, en el volumen 46, número 8, de la revista Pesquisa Agropecuaria Brasileira (6).

Análisis estadístico.

Para la interpretación de los datos de la respuesta al fertilizante de cada uno de los experimentos, se realizó el ajuste de datos según el modelo discontinuo rectilíneo (6). Para esto se tomaron los resultados de los rendimientos agrícolas y se ordenaron en función de las dosis crecientes de nutrientes, se estableció la significación estadística del rendimiento entre los niveles de los tratamientos, mediante un ANOVA y comparación de las medias mediante la prueba de rangos múltiples de Duncan ($p < 0.05$), se estableció el rendimiento máximo estable, la pendiente de la respuesta y el punto de inflexión del rendimiento. Al final se realizó la interpretación matemática de respuesta al nutriente empleando el modelo discontinuo rectilíneo: $y = \{a x + b, 0 \leq x \leq \text{rec } x; y_{\text{max}}, x \geq \text{rec } x$. Como modelo tradicional de ajuste se empleó el

curvilíneo, empleando ecuaciones cuadráticas de segundo grado, y se determinó el punto crítico [dosis de N (x) con el cual el rendimiento (y) se hace máximo] mediante la primera derivada de la ecuación.

Resultados

Maíz

En todos los casos se observó un fuerte ajuste de la predicción de la respuesta, sin embargo, el modelo curvilíneo sobreestimó los valores de la dosis óptima recomendada, lo cual trajo por consecuencia que al calcular el factor parcial de productividad, los valores obtenidos por este modelo fueron menos favorables que al hacer el mismo análisis empleando los datos del ajuste por el modelo discontinuo, según se puede observar en la Tabla III.

Tabla III. Resumen de la dosis óptima recomendada, el rendimiento máximo y el factor parcial de productividad, empleando los datos obtenidos en los dos modelos de ajuste de respuesta al fertilizante por el cultivo del maíz.

	Modelo curvilíneo			Modelo discontinuo		
	Dosis óptima recomendada (kg.ha ⁻¹)	Rendimiento máximo (t.ha ⁻¹)	FPP	Dosis óptima recomendada (kg.ha ⁻¹)	Rendimiento máximo estable (t.ha ⁻¹)	FPP
2003						
Barbecho – maíz	213,33	4,54	21,29	129,08	4,47	34,59
Canavalia – maíz	157,50	4,82	30,59	0	4,59	ND
Canavalia – maíz + HMA	86,67	4,60	53,12	0	4,53	ND
2006						
Barbecho – maíz	147,50	4,20	28,48	69,08	4,02	58,15
Barbecho – maíz + HMA	127,22	4,81	37,81	50	4,67	93,33
Canavalia – maíz	137,50	4,85	35,27	69,82	4,61	66,03
Canavalia – maíz + HMA	108,57	5,13	47,21	50,35	4,85	96,23

FPP: Factor Parcial de Productividad (kg de rendimiento por cada kg de N aplicado)

ND: no determinado debido a que en este modelo no es necesario realizar aportes de fertilizante mineral nitrogenado.

Este resultado básicamente se debe a que el factor parcial de productividad se calcula teniendo en cuenta no solo el rendimiento, sino también la dosis de fertilizante mineral aplicada y en todos los casos, como por el modelo discontinuo, la dosis recomendada fue menor, entonces eso provoca mayores valores de esta variable.

Cafeto

Al igual que en el cultivo anterior, se presentaron altos ajustes de los modelos de predicción de los rendimientos, sin embargo, es de notar como el modelo curvilíneo, en todos los casos,

sobreestimó la dosis óptima recomendada, en comparación al modelo discontinuo, lo cual trajo por consecuencia que en la predicción del modelo curvilíneo, el factor parcial de productividad fuera muy inferior al obtenido con el ajuste de los resultados por el modelo discontinuo (Tabla IV).

Tabla IV. Resumen de la dosis óptima recomendada, el rendimiento máximo y el factor parcial de productividad, empleando los datos obtenidos en los dos modelos de ajuste de respuesta al fertilizante por el cultivo del café.

Año	Modelo curvilíneo			Modelo discontinuo		
	Dosis óptima recomendada (kg.ha ⁻¹)	Rendimiento máximo (t.ha ⁻¹)	FPP	Dosis óptima recomendada (kg.ha ⁻¹)	Rendimiento máximo estable (t.ha ⁻¹)	FPP
Tercer Frente						
1999	170,00	0,24	1,40	100	0,24	2,40
2000	120,00	1,26	10,48	100	1,25	12,50
2001	215,00	1,43	6,65	100	1,3	13,00
2002	106,25	1,37	12,86	100	1,36	13,60
2004	250,00	0,54	2,15	75	0,5	6,67
2005	480,00	2,93	6,11	200	2,18	10,90
2006	283,33	1,38	4,88	100	1,25	12,50
2007	400,00	2,41	6,02	153,85	1,8	11,70
La Alcarraza						
1999	228,57	0,88	3,84	100	0,82	8,20
2000	180,00	1,41	7,84	112,59	1,34	11,90
2001	217,50	1,74	8,01	150	1,88	12,53
2002	197,50	1,56	7,90	121,91	1,47	12,06
2004	260,00	0,91	3,50	75	0,84	11,20
2005	275,00	1,26	4,58	100	1,22	12,20
2006	400,00	2,41	6,01	200	2,02	10,10
2007	390,00	2,38	6,11	200	2,01	10,05

FPP: Factor Parcial de Productividad (kg de rendimiento por cada kg de N aplicado)

En el caso de este cultivo es de notar no solo que el FPP fue mayor si se calcula a partir del ajuste por el modelo discontinuo sino que además, en algunas campañas y años, incluso llegó a tener el doble del valor, al ser comparada esta variable con la obtenida al emplear los datos del ajuste por el modelo curvilíneo.

Numerosos investigadores en diferentes épocas del desarrollo de las ciencias agrícolas, se han dedicado a estudiar diversos modelos curvilíneos con el objetivo de lograr una dosis óptima del nutriente, sin embargo en su gran mayoría coinciden en reconocer las ventajas del modelo rectilíneo discontinuo, frente a las funciones asintóticas al momento de definir cantidades óptimas económicas, evitando así el sesgo a la derecha de los modelos curvilíneos. El uso del concepto del modelo discontinuo rectilíneo permite una estimación tentativa del requerimiento del nutriente, aun para datos de respuesta basados solamente en 3 niveles del nutriente (12).

Los temas relacionados con el uso eficiente de los nutrimentos ha ganado más atención con el incremento en los costos de los fertilizantes y la continua preocupación por el impacto ambiental, particularmente la calidad del agua, asociada al uso inapropiado de los nutrimentos, fundamentalmente el N (13). Uno de los índices agronómicos de eficiencia del uso de los

nutrimentos lo constituye el factor parcial de productividad y se utiliza en la investigación de la eficiencia del N y otros nutrimentos (14).

De ese modo es recomendable no solo basarse en un modelo u otro de respuesta de las plantas a la adición de una fuente de nutrimentos, sino que además, la selección de las dosis óptimas se haga teniendo en cuenta otros índices, como la eficiencia en la conversión de las cantidades de nutrimento aplicadas en cantidades de rendimiento obtenido, de ese modo se valora además el impacto económico y medioambiental de las prácticas agronómicas a recomendar.

Referencias

1. Rivera, R.; Sánchez, C.; Caballero, D.; Cupull, R.; González, C.; Urquiaga, S. Abonos verdes e inoculación micorrízica de posturas de cafeto sobre suelos Fersialíticos Rojos Lixiviados. *Cultivos Tropicales*. 2010, vol. 31, no. 3, p. 75 – 81.
2. Cruz, I.R.; Moreno, O.H. Modelos de respuesta modificados para fertilizantes en rotaciones de cultivos y su aplicación a trigo (*Triticum aestivum* L.) *Agrociencia*, 2006, vol. 40, no. 6, p. 721-730.
3. Waugh, D.L.; Cate, Jr, R.B. y Nelson, L.A. 1972. Modelos discontinuos para una rápida correlación, interpretación y utilización de los datos de análisis de suelo y las respuestas a los fertilizantes. *Boletín Técnico no.7. Proyecto Internacional de Evaluación y Mejoramiento de la Fertilidad del Suelo*. North Carolina State University. 106 p.
4. Martín, G.M.; Rivera, R.; Arias, L.; Rentería, M. Effect of *Canavalia ensiformis* and arbuscular mycorrhizae on corn crops. *Cuban Journal of Agricultural Science*. 2009, vol. 43, no. 2, p. 185 – 192.
5. Pérez, A.; Bustamante, C.; Rivera, R.; Martín, G. M. Efecto del nitrógeno sobre los rendimientos y contenido foliar de *Coffea canephora* en un suelo Pardo ócrico sin carbonatos. *Centro Agrícola*. 2011. vol. 38, no.4, p. 37 – 44; CE: 03,11 CF: cag074111818.
6. Pérez, A.; Bustamante, C.A.; Martín, G. M.; Rivera, R. A.; Viñals, R.; Rodríguez, M. Fertilización nitrogenada después de la poda del cafeto robusta en Cambisoles. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 2011. vol.46, no.8, p.935 – 943.
7. Rodríguez E. Bases de conocimientos para generar modelos predictivos de respuesta a los fertilizantes nitrogenados en agroecosistemas cañeros. [Tesis presentada en opción al título académico de Maestro en Ciencias del Suelo]. Universidad Agraria de la Habana (UNAH) La Habana. 2002. 86p. [en línea]. [Consultado: 26 de junio de 2014]. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf/conocimientos-modelos-fertilizantes-nitrogenados-agroecosistemas/conocimientos-modelos-fertilizantes-nitrogenados-agroecosistemas.pdf>
8. Stewart, W.M. Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes. *Informaciones Agronómicas*. 2007, no.67, p. 1 – 7.
9. Yadav, R. L.; Dwivedi, B. S.; Pandey, P. S. Rice – wheat cropping system: assessment of sustainability under green manuring and chemical fertilizer inputs. *Field Crops Research*. 2000. vol.65, no.1, p. 15 – 30.