

Requerimientos y respuestas a la fertilización del maíz en suelos de Sabanas Ácidas de Colombia

Jaime H. Bernal¹, Gloria E. Navas y Ruby Stella Hernández S.

Introducción

Los suelos de sabanas ácidas de Colombia ocupan un área cercana a las 17 millones de hectáreas dedicadas en su gran mayoría a la ganadería extensiva con pastos nativos y algunas áreas con pasturas mejoradas. Gran parte de estos suelos se encuentran clasificados como Oxisoles por su pH muy ácido, baja fertilidad, altos contenidos de aluminio intercambiable y horizontes profundos (Vera, 1996). Se estima que cerca de 3 100 000 hectáreas de estos suelos, ubicadas en los Llanos Orientales de Colombia, pueden ingresar a la agricultura con el uso de enmiendas para corregir los problemas de acidez e incrementar la saturación de bases intercambiables, junto con la utilización de germoplasma adaptado a las condiciones de acidez (Valencia y Leal, 1996). Como resultado del trabajo cooperativo entre el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), fueron liberados en el año 2000 y 2001 dos híbridos de maíz amarillo, 'Corpoica H-108' y 'Corpoica Altillanura H-111' respectivamente, adaptados a las condiciones de suelos ácidos y con un buen potencial de producción. En el año 2013 fueron sembradas 6334 hectáreas de maíz en suelos de sabanas con dos años o más de rotación maíz-soya (FENALCE, 2013).

La aplicación de las cantidades adecuadas de nutrientes es un aspecto clave en el incremento de la producción del maíz, particularmente cuando los agricultores usan maíces híbridos de alto potencial de rendimiento (Attanandana y Yost, 2004). Numerosos estudios sobre fertilización en el cultivo de maíz fueron realizados en suelos de mediana a buena fertilidad (Entisoles e Inceptisoles) por instituciones de investigación estatales y universidades, dando lugar a una serie de recomendaciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) de acuerdo con el nivel de fertilidad del suelo (ICA, 1992). Sin embargo, existe muy poca información sobre el manejo de la fertilización del cultivo de maíz en suelos de sabanas ácidas. En la actualidad, las recomendaciones de fertilización utilizadas por los agricultores en los suelos de sabana son muy generales y en algunos casos no se relacionan con los requerimientos de nutrientes del cultivo y la disponibilidad en el suelo, dando lugar a un uso desequilibrado e ineficiente de los fertilizantes y a elevados costos de producción. En el año 2013, los productores de maíz en las sabanas invirtieron en el manejo de enmiendas y fertilización un 35.1% de los costos totales de producción (FENALCE, 2013).

En la producción agrícola moderna, los fertilizantes comerciales se utilizan para corregir las deficiencias

nutricionales de las plantas, mantener en los cultivos niveles nutricionales eficientes y balanceados, generar en las plantas resistencia a condiciones de estrés, mejorar la calidad de las cosechas y mantener en nivel óptimo las condiciones de fertilidad del suelo (Guerrero, 1994). Cuando se usa N y P en programas desbalanceados de fertilización, como cuando se aplican en exceso a la demanda, resultan pérdidas que contribuyen a la carga de nutrientes en arroyos, ríos y otros cuerpos de agua. El uso desbalanceado de fertilizantes también causa degradación del suelo, particularmente cuando se usan solamente fertilizantes nitrogenados que promueven la remoción de P y K del suelo que no son repuestos con la adición de fertilizantes portadores de estos nutrientes (Attanandana y Yost, 2004).

Para un buen diagnóstico que permita recomendar fertilizantes y/o enmiendas es preciso conocer cuales son los requerimientos del cultivo, los niveles de extracción de nutrientes, los niveles críticos del elemento en el suelo y tejidos del cultivo, la eficiencia en la extracción de los nutrientes, y trabajos de calibración y ajuste de la fertilización en condiciones de campo (Laegreid et al., 1999).

Por todas estas razones existe una urgente necesidad de generar recomendaciones de fertilización para los híbridos de maíz sembrados en condiciones de suelos de sabana, con el fin de mejorar la eficiencia en la utilización de los nutrientes y mantener la sostenibilidad del sistema productivo.

Materiales y métodos

Para determinar las necesidades de fertilización con N, P y K en el híbrido de maíz 'Corpoica H-108' se siguieron las siguientes etapas:

- **Determinación de las curvas de respuesta a N, P y K en suelos de sabana nativa y sabana mejorada (con dos rotaciones de maíz-soya).** Experimentos con diferentes dosis de N, P y K fueron establecidos en dos suelos de sabana: sabana nativa (suelos iniciando la producción de cultivos) y sabana mejorada (suelo con dos años de rotación maíz-soya). Fueron evaluadas 5 dosis de N: 0, 50, 100, 150, y 200 kg ha⁻¹. Para P se evaluaron 5 dosis de P₂O₅: 0, 30, 60, 90, y 120 kg ha⁻¹. E igualmente con K, 5 dosis de K₂O; 0, 30, 60, 90 y 120 kg ha⁻¹. En cada uno de los experimentos se adicionaron los nutrientes que no eran objeto del tratamiento para cubrir las necesidades del cultivo. Los tres experimentos fueron establecidos en un diseño de bloques al azar con 4 repeticiones.

¹ Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-CORPOICA. Villavicencio-Meta. Correo electrónico: jhbernal@corpoica.org.co

- **Evaluación de la respuesta en producción del cultivo de maíz con diferentes dosis de N-P-K.** La respuesta del híbrido de maíz a tres dosis de N (100, 150 y 200 kg ha⁻¹), dos de P (60 y 90 kg de P₂O₅ ha⁻¹) y tres de K (30, 60 y 90 kg de K₂O) se estudió en un diseño de bloques al azar con arreglo factorial de tratamientos (3 N x 2 P₂O₅ x 3 K₂O) y 4 repeticiones. Las dosis utilizadas para cada elemento fueron seleccionadas de acuerdo con los resultados de las curvas de respuesta. El experimento fue evaluado en dos suelos de sabana: sabana nativa y sabana mejorada.
- **Establecimiento de los niveles de extracción de N, P y K.** Se tomaron muestras de tres plantas por cada tratamiento del ensayo de curvas de respuesta para raíz, tallo, hojas, espigas y mazorcas. Las cuales fueron llevadas al horno a una temperatura de 60°C por un periodo de 72 horas, para luego ser molidas y determinar los contenidos de nutrientes extraídos por el cultivo al momento de la floración.
- **Relación entre la concentración de nutrientes en la hoja y la producción de grano.** En la época de floración se realizó un muestreo de 10 hojas que subtienden la mazorca en cada uno de los tratamientos del ensayo de curvas de respuesta, para realizar un análisis de concentración de nutrientes (Jones et al., 1991).

Para el análisis de los datos se utilizó el programa estadístico SAS® (Statistical Analysis System, versión 8.0), realizándose análisis de variancia y correlaciones y regresiones entre las variables de importancia.

Condiciones químicas de los suelos

En cada una de las repeticiones fueron tomadas muestras de suelo a una profundidad de 20 cm para su análisis químico. Los análisis fueron realizados siguiendo la metodología propuesta por el IGAC (2006). Los suelos en donde fueron realizados los experimentos de fertilización presentaron contenidos medios de materia orgánica y pH muy ácidos. El suelo de sabana nativa presentó un contenido de saturación de aluminio del 64% y muy bajos contenidos de P y bases intercambiables (Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺), por lo que se tomó la decisión de aplicar 2.5 t ha⁻¹ de cal dolomítica para reducir la toxicidad de aluminio e incrementar la saturación de bases. Por otra parte, el suelo de sabana mejorada (2 años de rotación maíz-soya), presentó una saturación de aluminio del 18%, y mayores contenidos de P y bases intercambiables (**Tabla 1**). Este suelo

había recibido como enmienda inicial 2.5 t ha⁻¹ de cal dolomítica dos años atrás.

Resultados y discusión

Se encontraron diferencias significativas en la producción del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' entre las localidades y dosis de N aplicadas. En el suelo de sabana nativa se observaron incrementos significativos en producción de grano con aplicaciones de N hasta de 100 kg ha⁻¹ (**Figura 1**), mientras que en suelos de sabana mejorada se encontró una respuesta lineal en la producción al incrementar las dosis de N. La baja respuesta en producción de grano del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' a dosis superiores a 100 kg ha⁻¹, en la localidad de sabana nativa se debió probablemente a que la fuerte acidez del suelo estaría afectando el normal crecimiento del híbrido a pesar de haberse aplicado la enmienda un mes antes de la siembra. En términos generales, no existe un método de análisis para medir la disponibilidad de N en el suelo que pueda ser utilizado rutinariamente por los laboratorios. La dificultad de no contar con un método adecuado radica en gran parte a las transformaciones del N en el suelo, las que son influenciadas por las condiciones ambientales. Por lo tanto, las recomendaciones sobre las necesidades de N en el cultivo de maíz son basadas en las curvas de respuesta obtenidas en diferentes condiciones edafoclimáticas (EMBRAPA, 1997). Los resultados obtenidos indican la necesidad de realizar los ajustes sobre los requerimientos de N en los nuevos híbridos liberados para las condiciones de suelos ácidos ya que las recomendaciones existentes para el cultivo de maíz están por debajo de la demanda de estos híbridos.

Respuestas significativamente diferentes en rendimiento de grano del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' fueron encontradas entre las localidades y entre las dosis de P. En la localidad de sabana nativa (P = 2 mg kg⁻¹), se observó un incremento lineal en la producción del híbrido al pasar de 0 a 60 kg de P₂O₅ ha⁻¹, y alcanzó la máxima respuesta en producción, 3118 kg ha⁻¹, con la dosis de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (**Figura 2**). En suelos de sabana mejorada (P = 14 mg kg⁻¹), se encontraron incrementos significativos en producción en el híbrido hasta la dosis de 60 kg P₂O₅ ha⁻¹, 3786 kg grano ha⁻¹, superando en 1222 kg grano ha⁻¹ a los encontrados con la misma dosis en suelos de sabana nativa. La respuesta del híbrido 'Corpoica H-108' hasta 60 kg de P₂O₅ en el suelo con contenidos de P menores a 15 mg kg⁻¹, se encuentra

Tabla 1. Valores promedio de propiedades de los suelos de las localidades de la Altillanura plana colombiana.

Localidad	pH	M.O.	P	Al	Ca	Mg	K	Sat. Al.	Sat. Bases
		%	mg kg ⁻¹	----- cmol kg ⁻¹ -----			%	%	
Sabana nativa	4.3	3.2	2	2.2	0.44	0.23	0.05	64*	21
Sabana mejorada	4.9	3.5	14	0.6	1.76	0.63	0.06	18	71

* El porcentaje correspondiente a los contenidos de H⁺ de la acidez intercambiable no están referenciados en la tabla.

dentro del rango de respuesta de 50 kg a 75 kg de P_2O_5 reportadas para el cultivo de maíz por Sánchez y Owen (2001) en Inceptisoles de los Llanos Orientales.

En suelos de sabana nativa, el híbrido de maíz 'Corpoica H-108' respondió significativamente en producción de grano al incremento en la dosis de K_2O por ha, alcanzando el pico máximo de producción, 3378 kg ha^{-1} , con la dosis de 120 kg ha^{-1} , mientras que en suelos de sabana mejorada no se encontraron respuestas en producción de grano a dosis superiores a los 30 kg ha^{-1} de K_2O (Figura 3). La baja respuesta a K encontrada en suelos de sabana mejorada indica probablemente que la planta de maíz obtiene una buena parte de este elemento de la fracción no disponible del suelo. Krishnakumari and Khera (1983) estudiaron el comportamiento de la disponibilidad de potasio de un Inceptisol con contenidos muy bajos de K disponible y no encontraron respuestas a la aplicaciones de K, aun cuando el suelo fue fertilizado de forma intensa con N y P sin la adición de K por un periodo de 10 años.

Respuesta del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' a diferentes dosis de N-P-K. Se encontraron diferencias altamente significativas entre las respuestas en producción de grano en las localidades, entre dosis de N, dosis de K, con interacciones Localidad x N y Localidad x K significativas. No se encontraron interacciones significativas entre los tres elementos en ninguna de las localidades. El promedio de producción del híbrido de maíz en el suelo de sabana mejorada fue 5165 kg ha^{-1} , y superó en 1267 kg ha^{-1} al rendimiento logrado en la localidad de sabana nativa, demostrando con esto la capacidad del híbrido a incrementar la producción de grano a medida que las condiciones del suelo se mejoran. Los mayores incrementos en producción de grano del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' se encontraron en su orden con el incremento en las dosis de $N > K > P$ en suelos de sabana mejorada, mientras que en suelos de sabana nativa el orden de respuesta fue de $K > N = P$.

En el suelo de sabana mejorada, el incremento en la dosis de N de 100 kg ha^{-1} a 150 kg ha^{-1} , ocasionó un incremento significativo en la producción de grano de 848 kg ha^{-1} (Figura 4), mientras que con la aplicación de 60 kg ha^{-1} de K_2O se aumentó en 349 kg la producción de grano, comparada con la obtenida con la dosis de 30 kg K_2O . En el suelo de sabana nativa no se encontró respuesta en el rendimiento de grano del híbrido de maíz cuando la dosis de N se incrementó de 100 kg ha^{-1} a 150 y 200 kg ha^{-1} . Mientras que con la aplicación de 90 kg ha^{-1} de K_2O se obtuvo un incremento 1108 kg de grano con respecto a la dosis de 30 kg de K_2O (Figura 5).

En cuanto al P no se presentaron diferencias significativas en la producción de grano con el aumento en la dosis de P_2O_5 de 60 kg ha^{-1} a 90 kg ha^{-1} , a pesar de los bajos contenidos de P presentes en el suelo de sabana nativa.

Los resultados encontrados en producción de grano del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' indican que este material

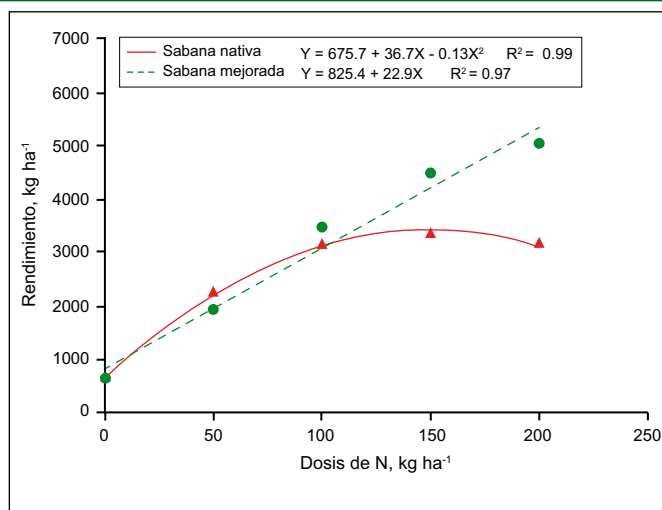


Figura 1. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de grano del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' en suelos de sabana. Villavicencio-Meta, Colombia 2002, cultivo del primer semestre.

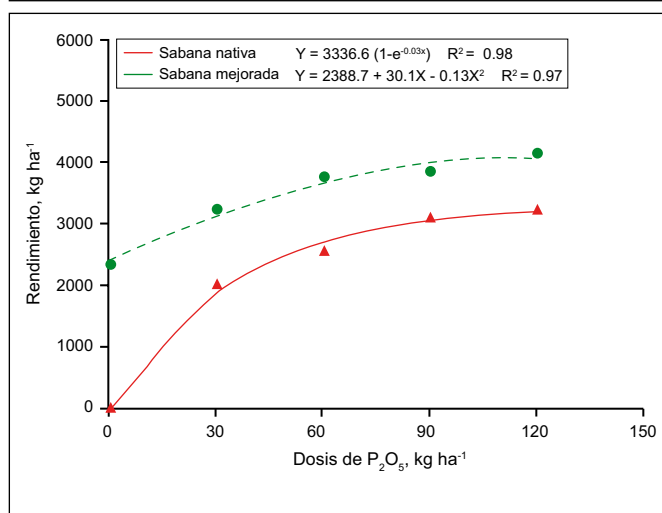


Figura 2. Efecto de la fertilización fosfórica sobre el rendimiento de grano del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' en suelos de sabana. Villavicencio-Meta, Colombia 2002, cultivo del primer semestre.

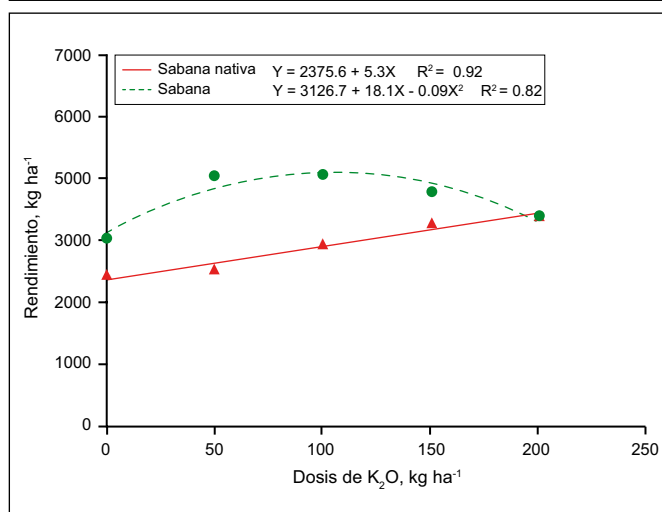


Figura 3. Efecto de la fertilización con K sobre el rendimiento de grano del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' en suelos de sabana. Villavicencio-Meta, Colombia, 2003 cultivo de primer semestre.

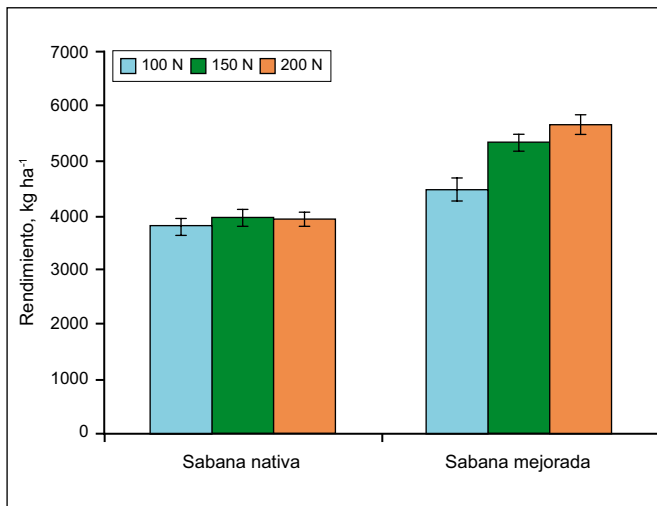


Figura 4. Respuesta en rendimiento de grano del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' a varias dosis de N en suelos de sabana nativa y mejorada. Villavicencio-Meta, Colombia 2003 cultivo de primer semestre.

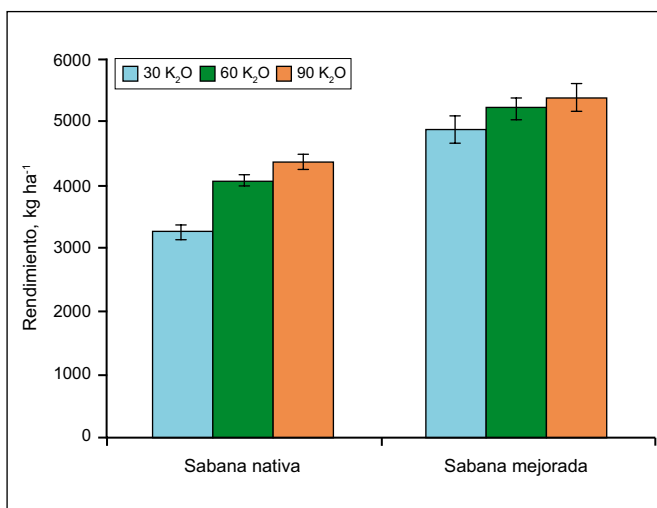


Figura 5. Respuesta en rendimiento de grano del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' a varias dosis de K₂O en suelos de sabana nativa y mejorada. Villavicencio-Meta, Colombia 2003, cultivo de primer semestre.

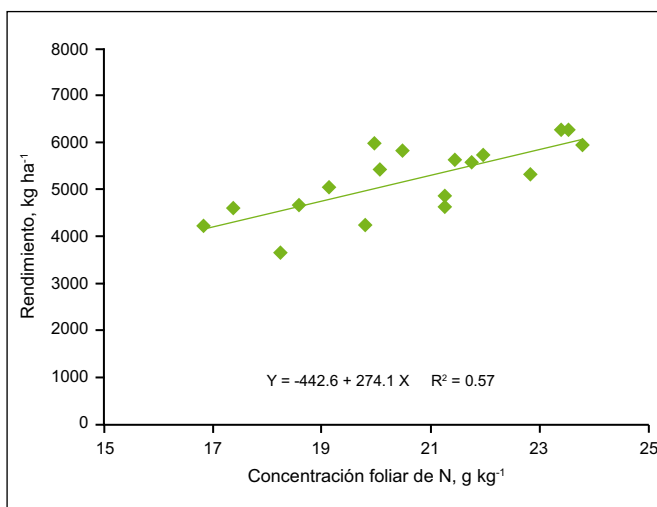


Figura 6. Relación entre la concentración de N en la hoja y el rendimiento de grano del híbrido 'Corpoica H-108' en un suelo de sabana. Villavicencio-Meta, Colombia 2003, cultivo de primer semestre.

tiene la capacidad de producir adecuadamente en suelos ácidos de sabanas, recién ingresadas a la producción de cultivos, e incrementar significativamente la producción de grano cuando los niveles de acidez del suelo se reducen y se incrementan los niveles de fertilidad.

Extracción de nutrientes por el cultivo. Bajo las condiciones de suelo de sabana, el híbrido de maíz presentó una extracción de: 25.5 kg N, 1.7 kg P, y 29.2 kg K t⁻¹ grano producida. Los valores de extracción de N y K por tonelada de grano (15% humedad) producida con el híbrido de maíz 'Corpoica H-108' son muy similares a los reportados por Fageria et al. (1991). Al mismo tiempo, la recuperación aparente de los nutrientes aplicados al suelo fue de 77.4% para N, 14.8% para P y de 135% para K (**Tabla 2**). Valores de recuperación aparente de N por el cultivo de maíz fluctúan entre 31% a 60% en suelos del Brasil (EMBRAPA, 1997).

Relación entre producción de grano y concentración de N-P-K en la hoja. En el suelo de sabana mejorado se encontraron correlaciones positivas entre el rendimiento de grano del híbrido 'Corpoica H-108' y la concentración de N en la hoja, $r=0.43^{**}$, la concentración de P, $r=0.44^{**}$ y la concentración de K, $r=0.36^*$. El incremento en la concentración de N en la hoja del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' estuvo asociado con aumentos lineales en la producción de grano hasta la concentración de 23.8 g de N kg⁻¹ (**Figura 6**). Mientras que en el suelo de sabana nativa solo se presentó una correlación significativa entre el rendimiento y la concentración de K en la hoja, 0.34*. Como se puede ver en la **Figura 7**, el rendimiento de grano presentó un incremento lineal con el incremento en la concentración de K desde 9.0 g kg⁻¹ hasta 14.3 g kg⁻¹.

En el rango de rendimientos y concentraciones foliares de N y K registrados en el híbrido 'Corpoica H-108', el nivel de suficiencia de N estaría alrededor de 24 g kg⁻¹, mientras que el nivel óptimo para el caso de K se estaría cercano a los 15 g kg⁻¹. Jones et al. (1991) reportan valores de suficiencia en la concentración de N de la hoja que subtiende la mazorca entre 27 a 40 g kg⁻¹, P entre 2.5 a 5.0 g kg⁻¹ y K entre 17 a 30 g kg⁻¹.

Tabla 2. Extracción de N, P y K por el híbrido de maíz 'Corpoica H-108' y tasa de recuperación aparente de los elementos aplicados en suelos de sabana. Villavicencio-Meta, Colombia 2003A.

Nutriente	Tasa recuperación aparente % ¹	Cantidad extraída kg t ⁻¹	
		Sabana	Literatura ²
N	77.4	25.5	21.3
P	14.8	1.7	4.2
K	135	29.2	25.4

¹Fageria y Baligar (2008); ²Fageria et al. (1991)

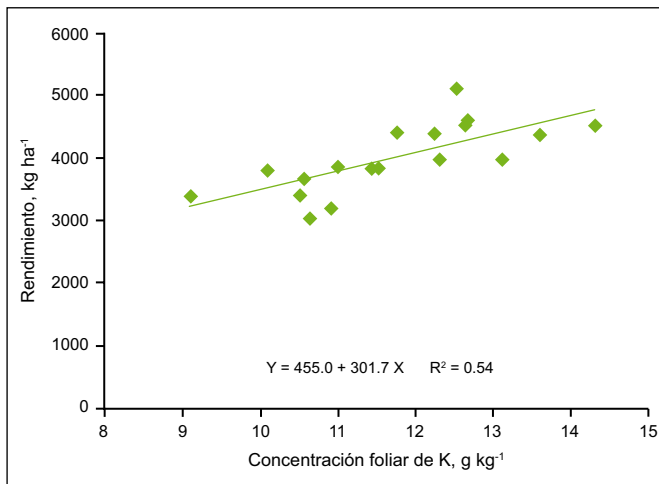


Figura 7. Relación entre la concentración de K en la hoja y el rendimiento de grano del híbrido 'Corpoica H-108' en un suelo de sabana mejorada. Villavicencio-Meta, Colombia 2003, cultivo de primer semestre.

Conclusiones

- La respuesta en rendimiento del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' a las aplicaciones de N, P y K variaron según el grado de fertilidad del suelo.
- En el suelo de sabana nativa las mayores respuestas en rendimiento de grano fueron encontradas con las dosis de 100 kg de N ha⁻¹, 90 kg de P₂O₅ ha⁻¹ y 90 kg de K₂O ha⁻¹.
- En la sabana mejorada el híbrido tuvo mayor rendimiento y se logró una respuesta en producción con dosis de N entre 150 y 200 kg ha⁻¹, 60 kg de P₂O₅ ha⁻¹, y 60 kg de K₂O ha⁻¹.
- El incremento en las dosis de N y K ocasionó un incremento en la concentración de N y K en la hoja que subtiende la mazorca logrando valores de 23.8 g de N kg⁻¹, y 14.3 g de K kg⁻¹.
- La concentración de N y K en la hoja presentó una correlación positiva y altamente significativa con el rendimiento de grano con valores de 0.43**, y 0.36** para N y K, respectivamente.
- En promedio, una tonelada de grano cosechada del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' extrae del suelo 25.5 kg de N, 1.7 kg de P y 29.2 kg de K.

Bibliografía

- Attanandana, T., y R.S. Yost. 2004. Estrategias de manejo de nutrientes por sitio específico. Informaciones Agronómicas, INPOFOS, No. 53. Quito, Ecuador.
- Barber, S.A. 1984. Nutrient uptake by plant roots growing in soil. In: Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach. John Wiley & Sons (eds.), New York. pp. 90-113.
- EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria. 1997. Manejo da fertilidad do solo. En: Recomendações Técnicas para o Cultivo do Milho. 2ª edição, Serviço de produção de Informação, Brasília, DF.

Fageria, N.K., Baligar, V.C. y Jones, C.A. 1991. Corn. In: Growth and mineral nutrition of field crops. Marcel Dekker (eds), New York. pp. 205-227.

Fageria, N.K., V.C. Baligar, Li, Y.C. . (2008). The Role of Nutrient Efficient Plants in Improving Crop Yields in the Twenty First Century. Journal of Plant Nutrition 31:1121-1157.

FENALCE. 2013. <http://www.fenalce.org/nueva/pg.php?pa=19&d=Estadisticas%20Fenalce>.

Guerrero, R.R. 1994. Propiedades generales de los fertilizantes químicos. En: Memorias seminario "Fertilidad de suelos, diagnóstico y control". Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá, D.C. Colombia.

ICA Instituto Colombiano Agropecuario. 1992. Fertilización en diversos cultivos. Quinta aproximación. Edit. Produmedios, Bogotá.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2006. Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos, Sexta Edición. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá. ISBN 978-958-9067-98-7. 674 p.

Jones, J.B., B. Wole, y H.A. Mills. 1991. Plant analysis handbook, a practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide. Micro-Macro Publishing, Inc., Athens, Georgia. 98 p.

Laegreid, W.H., C. Suwannarat, y T. Vearasilp. 1999. NPK fertilizer management for maize: decision aids and test kits. Thai Journal of Soil and Fertilizer. 22:174-186.

Sánchez, L.F, Owen. E J. 2001. Fertilidad de los suelos y fertilización de cultivos en los llanos orientales. De fertilidad de suelos diagnóstico y control. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, segunda edición. Bogota, D.C., Colombia pp 350-361.

Vera, R. 1996. Actividades de Investigación del CIAT del Programa de Tierras Bajas Tropicales en las Sabanas Neotropicales. En: Biodiversidad y funcionamiento de Pastizales y Sabanas en América Latina. CYTED-CIELAD (Ed), Producciones Karol. Venezuela.

Valencia, R.A., y D.M. Leal. 1996. Alternativas genéticas para sistemas de producción en sabanas ácidas de la Orinoquia colombiana. Suelos Ecuatoriales. 26(1):35-43. ❖



Maíz con 150 kg ha⁻¹ de N (izquierda), sin N (derecha). Sabana mejorada.