

Artículo de investigación científica y tecnológica

Desarrollo de la mancha foliar por *Bipolaris maydis* (teleomorfo: *Cochliobolus heterostrophus* en maíz dulce, en función de nitrógeno, potasio y silicio en invernadero

 Leónides Castellanos González^{1*},  Renato de Mello Prado²,  Cid Naudi Silva Campos²,  Gabriel Barbosa da Silva Júnior Fiallos²

¹ Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia

² Universidad Estadual Paulista (Unesp). San Pablo, Brasil

* Autor de correspondencia: Universidad de Pamplona, Facultad de Ciencias Agrarias. Vía a Bucaramanga km 1. Norte de Santander, Colombia. lecastell@gmail.com.

Recibido: 07 de febrero de 2019

Aceptado: 22 de enero de 2020

Publicado: 26 de junio de 2020

Editor temático: John Fredy Hernández Nopsa (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA])

Para citar este artículo: Castellanos-González, L., De Mello-Prado, R., Silva-Campos, C.N., & Barbosa-da Silva Júnior, G. (2020). Desarrollo de la mancha foliar por *Bipolaris maydis* (teleomorfo: *Cochliobolus heterostrophus*) en maíz dulce en función de nitrógeno, potasio y silicio en invernadero. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(3), e1508. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1508

Resumen

El objetivo del trabajo fue evaluar el desarrollo de la mancha foliar causada por *Bipolaris maydis*, enfermedad común en maíz dulce, según la dosis y el acumulado de nitrógeno, potasio y silicio, en condiciones de invernadero. Los tratamientos consistieron en cinco dosis de nitrógeno (N) (0, 200, 400, 800 y 1.200 kg/ha), aplicación o no de potasio (K) (240 kg/ha) y aplicación o no de silicio (Si) (380 kg/ha). Se empleó un diseño experimental completamente aleatorizado con esquema factorial 5 x 2 x 2 y tres repeticiones. Se inocularon todos los tratamientos a los 30 días con una suspensión de 2×10^5 conidios por mL de *B. maydis*. A los 42 días se midió la acumulación de N, K y Si, así como el porcentaje de infección y el área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE). Los tratamientos que recibieron fertilización con Si y K presentaron mayores acumulados de N, K y Si, y niveles más bajos de intensidad de ataque y ABCPE. Los acumulados de N, K y Si presentaron variaciones frente a las interacciones de la fertilización de K con N, y de Si con N; sin embargo, los niveles de las variables de la enfermedad fueron menores en la fertilización con K o Si, combinadas con las dosis de 0, 200 y 400 kg/ha de N.

Palabras clave: absorción de sustancias nutritivas, aplicación de abonos, *Cochliobolus heterostrophus*, enfermedades fungosas, *Zea mays*

Development of the southern corn leaf blight caused by *Bipolaris maydis* (teleomorph: *Cochliobolus heterostrophus* in sweet corn as a function of nitrogen, potassium, and silicon under greenhouse conditions

Abstract

This work aimed to evaluate the development of the southern corn leaf blight caused by *Bipolaris maydis*, a common disease in sweet corn, depending on the dose and the accumulated nitrogen, potassium, and silicon, under greenhouse conditions. The treatments consisted of five doses of nitrogen (0, 200, 400, 800, and 1,200 kg/ha), application or not of potassium (240 kg/ha), and application or not of silicon (380 kg/ha). A completely randomized design with factorial arrangement 5 x 2 x 2 and three repetitions was used. All the treatments were inoculated on day 30 with a suspension of 2×10^5 conidia by mL of *B. maydis*. On day 42, the accumulated N, K, and Si were measured, as well as the infection percentage and the area under the disease progress curve (AUDPC). The treatments that received fertilization with Si and K showed higher accumulation of N, K and Si, and lower levels of disease intensity and AUDPC. The accumulated N, K, and Si exhibited variations compared to the fertilization interactions of K with N, and Si with N; however, the levels of the disease variables were lower in the fertilization with K or Si, combined with the doses of 0, 200 and 400 kg/ha of N.

Keywords: *Cochliobolus heterostrophus*, fertilizer application, fungal diseases, nutrient uptake, *Zea mays*

Introducción

El cultivo del maíz es el segundo rubro productor de granos en el mundo y, en el año 2017, los Estados Unidos, China y Brasil fueron los mayores productores (Agricultores, 2017). En los cinco continentes, el maíz dulce es parte importante de la dieta diaria y la tendencia de consumo es creciente tanto en producto fresco como procesado (Parera, 2017).

Los elementos nutricionales de mayor demanda para el maíz son el nitrógeno (N) y el potasio (K) (Sousa et al., 2010). Tanto el nitrógeno como el potasio son elementos esenciales para la vida de las plantas. El primero es indispensable para el normal desarrollo del maíz, pues interviene en la formación de la clorofila, en las proteínas, vitaminas y fuentes de energía (Prado, 2008). Por su parte, el potasio interviene en los procesos respiratorios y de la fotosíntesis; en el mantenimiento del estado de hidratación necesario para el funcionamiento más activo de las microestructuras de los coloides celulares; en la economía del gasto de agua por transpiración, al activar el cierre de las estomas cuando falta la humedad; y como activador de enzimas y transporte de sustancias dentro de la planta (Malavolta, 2006).

El rendimiento del maíz responde a las aplicaciones crecientes de nitrógeno, la mayoría del cual se acumula por la planta antes de producir la mazorca, para el caso del maíz dulce en dosis óptimas de 240 kg/ha (Opazo et al., 2008). El potasio presenta una absorción creciente también en la primera etapa del cultivo, y se reportan los más altos rendimientos con dosis entre 150 y 200 kg/ha en maíz dulce sobre suelos ricos en este mineral (Meneses et al., 2017).

Por otro lado, el silicio (Si) no es considerado elemento esencial para las plantas; sin embargo, su absorción puede ocasionar efectos beneficiosos en varios cultivos pues atenúa el estrés abiótico (Mahdieh et al., 2015; Olivera et al., 2019; Silva et al., 2016) e induce resistencia a plagas y enfermedades (Castellanos et al., 2015b). Entre los cultivos acumuladores de Si, están principalmente las gramíneas como la caña de azúcar *Saccharum* spp., el arroz *Oryza sativa* L., y el maíz *Zea mays* L. (Poaceae) (Raya & Aguirre, 2012).

Entre las enfermedades fúngicas más importantes del cultivo del maíz a nivel mundial se encuentra el tizón foliar o helmintosporiosis, causada por *Bipolaris maydis* (Y. Nisik & C. Miyake) Shoemaker (teleomorfo: *Cochliobolus heterostrophus* Drechsler). La enfermedad ha sido motivo de varios estudios debido a la existencia de la raza O y la raza T (asociada a los híbridos que llevan incorporado la fuente Texas de androesterilidad en Estados Unidos), y a las posibilidades de diferencias en las características morfológicas y patogénicas del hongo. Sin embargo, para la mayoría de los autores, la raza O es la más generalizada y puede causar epidemias en determinadas condiciones (Pal et al., 2015). El tizón foliar ataca comúnmente el maíz dulce cuando se desarrolla en condiciones húmedas y con temperaturas entre 20 °C y 32 °C, lo

que puede ocasionar daños importantes cuando la planta se infecta joven y las variedades son susceptibles (Seminis, 2015).

Informes sobre la disminución de la incidencia y severidad de enfermedades fúngicas por la aplicación de Si en el cultivo del arroz han sido reportados por varios investigadores (Santos et al., 2011; Santos et al., 2003; Zañão et al., 2009). Sin embargo, en la literatura no se ha hallado información sobre los beneficios del Si en la reducción de la severidad de las enfermedades foliares del maíz, ni de la interacción de las dosis de N, K y Si sobre el desarrollo de las enfermedades en este cultivo.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el desarrollo de la mancha foliar causada por *B. maydis*, enfermedad común en el maíz dulce, según la dosis y el acumulado de nitrógeno, potasio y silicio en condiciones de invernadero.

Contribución científica

El trabajo hace una contribución al conocimiento del efecto del Si sobre el desarrollo de mancha foliar del maíz dulce causada por *B. maydis*, dependiendo de diferentes dosis y acumulados de N y K, y demuestra que la enfermedad es menos severa frente a la presencia de silicio cuando no hay un exceso de N en la planta o cualquier dosis de K.

Materiales y métodos

El experimento se llevó a cabo en un invernadero no climatizado en la Facultad de Ciencias Agrarias y Veterinarias de la Universidad Estadual Paulista (Unesp-FCAV), ubicada en Jaboticabal, São Paulo (Brasil), entre mayo y junio de 2014. Para evaluar el efecto de la interacción de N, K y Si sobre el desarrollo de la enfermedad, se empleó como cultivo indicador el maíz *Zea mays* L. tipo dulce, variedad Syngenta 41.234 y el hongo patógeno *B. maydis*. Esta variedad fue obtenida de la colección del Departamento de Horticultura (Unesp-FCAV) en Jaboticabal, caracterizada por ser superdulce, tener buen potencial de rendimiento, ciclo de 90 días y recomendada para verano en las condiciones de São Paulo.

Las plantas se desarrollaron sobre un suelo Typic Hapludox, que, de acuerdo con los análisis realizados por la metodología de Raij (1990), presentaba las siguientes características: pH en $\text{CaCl}_2 = 5,5$; M.O. (g/dm^3) = 8; P resina (mg/dm^3) = 6; K ($\text{mmol}_c/\text{dm}^3$) = 1,4; Ca ($\text{mmol}_c/\text{dm}^3$) = 16; Mg ($\text{mmol}_c/\text{dm}^3$) = 9; H + Al ($\text{mmol}_c/\text{dm}^3$) = 15; suma de bases (SB) ($\text{mmol}_c/\text{dm}^3$) = 26,4; capacidad de cambio catiónico (CTC) ($\text{mmol}_c/\text{dm}^3$) = 41,4; saturación por bases (V) (%) = 63,5; B (mg/dm^3) = 0,20; Cu (mg/dm^3) = 0,2; Fe (mg/dm^3) = 4,0; Mn (mg/dm^3) = 4,2; Zn (mg/dm^3) = 0,3; y Si 10,2 mg/dm^3 .

Los tratamientos consistieron en cinco dosis de N, aplicación o no de K y aplicación o no de Si. Las dosis de N fueron de 0, 100, 200, 400 y 800 mg/dm^3 (0, 200, 400, 800 y 1.200 kg/ha de N —en forma de urea, 45 % de N—). Las dos dosis de K fueron 0 y 120 mg/dm^3 de K_2O en la forma de CLK (60 % de K) (0 y 240 kg/ha). En los tratamientos con Si se aplicó 190 mg/dm^3 de Agrosilicio Plus (10,25 % de Si; 25 % de Ca, y 6 % de Mg, PN 81 %), a razón de 380 kg/ha del fertilizante.

Los tratamientos que no recibieron Si fueron encalados para balancear la saturación de bases (%/V) al 8 % empleando calcáreo a 190 mg/dm^3 (380 kg/ha de calcáreo —24 % de CaO, 17 % de MgO, PN 81 %—). En todos los tratamientos fue aplicado de forma uniforme, fósforo (150 mg/dm^3 de P_2O_5), en forma de superfostato triple (P_2O_5 soluble= 41 %) (300 kg/ha de P_2O_5).

Se empleó un diseño experimental completamente aleatorizado con esquema factorial $5 \times 2 \times 2$ (20 tratamientos) con tres repeticiones. La unidad experimental estuvo compuesta de una maceta de polipropileno de 5 dm^3 , donde se sembraron cinco granos de maíz, y se dejaron finalmente cuatro plantas. Se realizaron riegos diarios con regadera, manteniendo la humedad del suelo entre 60 % y 70 % de capacidad de campo.

A los 30 días después de la germinación (al atardecer), fueron inoculadas todas las plantas del experimento con una suspensión de $1,2 \times 10^5$ conidios por mL de *B. maydis*, utilizando un aspersor manual de 2 L. El hongo fue obtenido del cepario del Laboratorio de Fitopatología de la Unesp Jaboticabal y desarrollado en placas de Petri en papa dextrosa agar (PDA) durante siete días.

Desde el momento de la inoculación y hasta el final del experimento fueron colocadas, dentro de las macetas, hileras de bandejas de 8 L de capacidad con agua para aumentar la humedad relativa, las cuales fueron mantenidas llenas durante el resto del tiempo del experimento. Además, fueron realizados riegos diarios al piso del invernadero a las 10 a.m., 12 m., 2 p.m. y 4 p.m. durante 12 días a partir de la inoculación.

Se observaron las plantas diariamente hasta la aparición de los síntomas y se evaluó el porcentaje de infestación a los 6, 9 y 12 días después de la inoculación. A cada planta se le otorgó un grado de severidad de ataque a partir de la escala de 6 grados (Püntener & Zahner, 1981) (0 sin síntomas y 5 más de 50 % de área foliar con síntomas). Se determinó el porcentaje de infección por unidad experimental por medio de la fórmula de Townsend y Heuberger (Püntener & Zahner, 1981). A los 42 días se estimó el área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE) según el método de Campbell y Madden (1990).

A los 42 días de la germinación (12 días de la inoculación) se desmontó el ensayo, previsto para 45 días, ya que en ese momento se observaban diferencias notables entre los tratamientos.

Al final del experimento se determinó la materia seca a partir de la colecta de las cuatro plantas de cada maceta (hojas y tallos). Para esto, el material vegetal se colocó en bolsas de papel y se secó en una estufa con circulación de aire forzado a $65 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 96 horas hasta tener peso constante. Después del secado, se pesaron las muestras y se obtuvo el peso seco por maceta. A continuación, las muestras se molieron en un molino Willey, lo cual determinó el contenido de N y K de acuerdo con la metodología descrita por Bataglia et al. (1983), y el contenido de Si por la metodología de Kraska y Breitenbeck (2010). Sobre la base de la masa seca por maceta y el contenido de cada elemento en hojas y tallos, se calculó la acumulación de Si, K y N (g por maceta).

Los datos de acumulado de N, K y Si, así como el porcentaje de severidad por *B. maydis* al final del ensayo y el ABCPE fueron sometidos a un análisis de varianza una vez comprobado el supuesto de normalidad por la prueba de Kolmogorov Smirnov. Los porcentajes de severidad fueron transformados en 2 arcsen

$\sqrt{\%}/100$. Los datos de las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ($p < 0,05$). Se utilizó el programa estadístico SISVAR (Furtado, 2011).

Resultados y discusión

En el quinto día de la inoculación, se observaron en el experimento algunas manchas pequeñas en las hojas de las plantas de maíz y, en el sexto día, se observaron síntomas generalizados en todos los tratamientos, pero con diferentes niveles de intensidad en las plantas (figura 1). Las muestras llevadas al laboratorio permitieron aislar e identificar al hongo *B. maydis*. Posteriormente, se pudieron observar los conidios típicos del hongo a partir de preparaciones directas de las manchas.

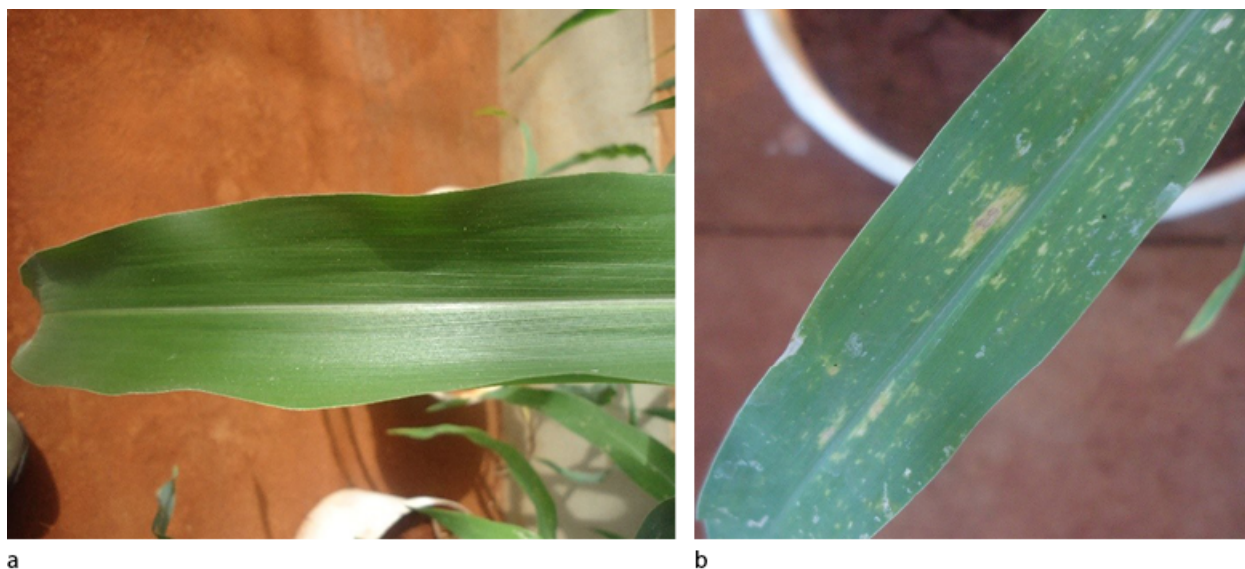


Figura 1. a) Hoja sin síntoma, perteneciente al tratamiento: K 240 kg/ha, Si 380 kg/ha, N 200 kg/ha; b) hoja perteneciente al tratamiento K 240 kg/ha, Si 0 kg/ha, N 200 kg/ha.

Fuente: Elaboración propia

La temperatura media promedio durante el periodo de incubación del hongo fue de 22,8 °C y la humedad relativa media promedio de 63,7 %. Durante el periodo de desarrollo de la enfermedad, las temperaturas medias oscilaron entre 23,1 °C y 27,5 °C y las humedades relativas medias entre 56,0 % y 68,5 % (figura 2).

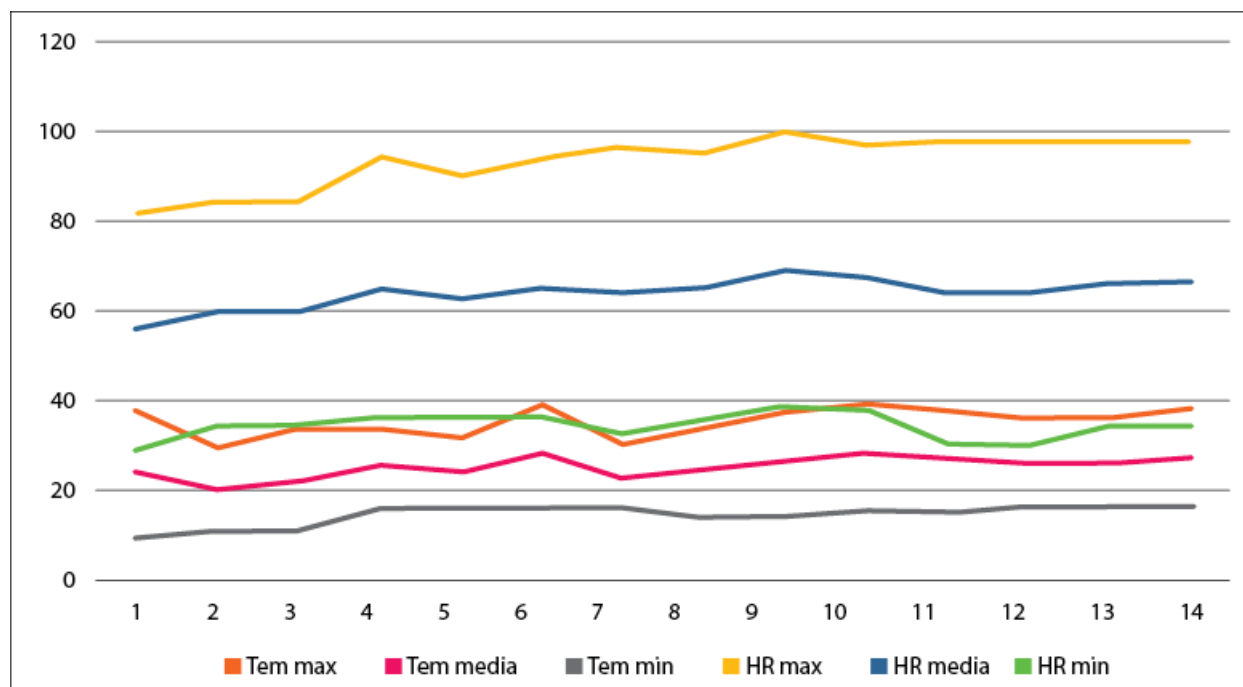


Figura 2. Condiciones de temperatura (máxima, media y mínima) y humedad relativa (máxima, media y mínima) que concurrieron desde que se inoculó *B. maydis* hasta que se concluyó el ensayo.

Fuente: Elaboración propia

Estas condiciones meteorológicas en el invernadero se corresponden con las informadas como favorables para el desarrollo de la enfermedad de la mancha foliar por *B. maydis* en maíz en general (Naz et al., 2013) y en maíz dulce en particular (Seminis, 2015), lo que favoreció el desarrollo exitoso del experimento.

Se comprobó, en los análisis de varianzas, valores F significativos para los efectos simples de las dosis de N, K y Si sobre los acumulados de N, K y Si en las plantas de maíz, así como para severidad de *B. maydis* y el ABCPE. Los valores F fueron significativos para los efectos de interacción entre Si y K sobre los acumulados de K, la severidad de *B. maydis* y el ABCPE. De igual forma, fueron significativos los valores F de la interacción de Si x N y sobre los acumulados de N, de K y la severidad de *B. maydis* y el ABCPE. También los valores de F fueron significativos para los efectos de la interacción de K x N en todas las variables estudiadas (tabla 1).

Tabla 1. Valores F del ANOVA para los acumulados de los elementos N, K y Si, y las variables de la enfermedad

Factores	Acumulado			ABCPE ^(a)	Severidad 2 arcosen $\sqrt{\%}/100$
	N	K	Si		
	Valores F				
Silicio	18,33**	27,91**	135,92**	475,46**	474,98**
Nitrógeno	9,45**	5,84**	30,00**	36,04**	35,43**
Potasio	7,36**	121,07**	40,50**	80,26**	80,97**
Si x N	3,02*	4,64**	3,49*	16,82**	16,56**
Si x K	43,89**	5,22**	4,09*	12,60**	10,29**
N x K	8,13**	5,60**	7,89**	21,61**	22,35**
CV (%)	15,67	7,54	14,17	6,30	4,32

* Significativo para $p \leq 0,05$; ** significativo para $p \leq 0,01$.

Fuente: Elaboración propia

Castellanos et al. (2015a) también verificaron la influencia de las interacciones de Si x K, Si x N y K x N sobre el acumulado de K y Si, al igual que de los dos últimos elementos sobre el acumulado de N en plantas de maíz en condiciones de hidroponía.

El aumento de la acumulación de N que ocurrió frente a la presencia de Si se explica por lo planteado por Feng et al. (2010), quienes señalan que el Si puede mejorar el metabolismo del N y aumentar la actividad enzimática responsable de la reducción y la asimilación de N.

La aplicación de potasio al cultivo de maíz se reflejó en una mayor acumulación de este elemento en la parte foliar de la planta, lo cual se corresponde con lo descrito por Andreotti et al. (2000), que obtuvieron un aumento de la concentración de K con un aumento creciente de las dosis de K.

Resultados de incremento de la acumulación de N en función de las dosis de N también fueron obtenidos en la parte aérea de las plantas de maíz (hojas, tallos, mazorca, paja y granos) por Gava et al. (2010).

Muchos autores han señalado el aumento de la acumulación de silicio en los diferentes cultivos como respuesta a la aplicación de este elemento benéfico en maíz (Ávila et al., 2010; Barbosa et al., 2011) y en arroz, en condiciones de hidroponía (Mauad et al., 2013).

El acumulado de N, K y Si en las plantas de maíz se incrementó en comparación con el resto de las interacciones a la dosis de 380 kg/ha de Si y 240 kg/ha de K. El acumulado de N fue menor en el tratamiento donde no se aplicó Si y 240 kg/ha de K; el de K, en las dos interacciones donde no se aplicó K, y el de Si, en las interacciones donde no se aplicó este como fertilizante. La intensidad de *B. maydis* y el ABCPE fueron más altas en la interacción dosis 0 de Si y dosis 0 de K, mientras que los menores valores de severidad de la enfermedad se observaron en la interacción de la dosis de 380 kg/ha de Si con 240 kg/ha de K (tabla 2).

Tabla 2. Comparación de las medias de los acumulados de N, K y Si y el ABCPE, y la intensidad de *Bipolaris maydis* para la interacción Si x K

Tratamientos		Acumulado (mg por maceta)			<i>Bipolaris maydis</i>	
Dosis de Si (kg/ha)	Dosis de K (kg/ha)	N	K	Si	ABCPE	Severidad (%)
0	0	61,51 b	1450,94c	118,37 d	12,33 a	75,8 a
0	240	51,70 c	2326,09b	158,68 c	11,44 b	69,0 b
380	0	55,64 bc	1751,80c	192,82 b	9,33 c	56,1 c
380	240	79,06 a	3085,92a	234,56 a	7,27 d	43,7 d
E. típico*		2,18	86,98	5,58	0,14	

* Letras desiguales en las columnas difieren para $p \leq 0,05$.

Fuente: Elaboración propia

En la interacción de la dosis 0 de Si y dosis 0 de K se acumuló más N que en la interacción 0 de Si y 240 kg/ha de K, de forma contraria a lo que observaron Castellanos et al. (2015a) en maíz bajo condiciones de hidroponía. Esto podría explicarse por el Si presente en el suelo, el cual ayuda a la absorción de N en dichas condiciones de estrés, por falta de K.

El presente resultado se corresponde con Kaya et al. (2006), quienes observaron un incremento de las cantidades de K en la planta de maíz en presencia de Si cuando estas se sometieron a estrés hídrico.

Otras investigaciones han demostrado que el Si aumenta la conductancia estomática, de manera que promueve una mejor eficiencia del uso del agua, como por ejemplo en el cultivo de la canola *Brassica napus* L. (Brassicaceae) (Farshidi et al., 2012). Este también induce el incremento de la transpiración ya que favoreció el aumento de la absorción de K en el espartillo *Spartina densiflora* Brongn. (Poaceae) sometido a estrés salino (Mateos-Naranjo et al., 2013). Todo lo anterior se explica porque el Si participa activamente en el cierre y apertura de las estomas (Prado, 2008).

El mayor nivel de N acumulado se observó en las interacciones con las dosis de 200, 400 y 600 kg/ha de N con 240 kg/ha de K y de 200 kg/ha de N y 0 kg/ha de K, y los menores, en las interacciones 0 kg/ha de K y las dosis más bajas y más altas de N (0, 400 y 600 kg/ha) y a la dosis de 240 kg/ha de K y 0 kg/ha de N (tabla 3).

Tabla 3. Comparación de las medias de los acumulados de N, K y Si, el ABCPE y la intensidad de *Bipolaris maydis* para la interacción K x N

Tratamientos		Acumulado (mg por maceta)			<i>Bipolaris maydis</i>	
Dosis de K (kg/ha)	Dosis de N (kg/ha)	N	K	Si	ABCPE	Severidad (%)
0	0	41,60 d	1330,41 c	84,07 c	11,52 a	69,3 a
0	200	67,16 abc	1680,27 bc	199,58 ab	10,83 a	66,1 a
0	400	59,32 bcd	2319,63 ab	214,67 ab	9,44 b	56,2 bc
0	600	60,01 bcd	1671,14 bc	171,36 b	10,69 a	63,8 ab
0	800	50,59 cd	1005,40 c	108,27 c	11,66 a	70,8 a
240	0	56,11 cd	2918,76 a	184,29 b	7,91 c	47,0 d
240	200	60,47 bc	2969,09 a	208,90 ab	7,91 c	47,5 d
240	400	76,27 ab	2617,06 a	236,70 a	8,47 c	50,5 cd
240	600	81,32 a	2528,69 a	179,35 b	10,83 a	64,5 a
240	800	66,88 abc	2496,42 a	173,87 b	11,66 a	70,5 a
E. típico*		3,99	159,34	10,23	0,26	

* Letras desiguales en las columnas difieren para $p \leq 0,05$.

Fuente: Elaboración propia

El acumulado de K fue favorecido cuando se fertilizó con K, independientemente de la dosis de N, así como a una dosis intermedia de N (400 kg/ha) frente a la ausencia de K.

Los mayores acumulados de Si se observaron en las dosis de N de 200 y 400 kg/ha con o sin aplicación de K y las menores, en los tratamientos donde no se aplicó K a las dosis más altas y bajas de N (0 y 800 kg/ha). Se verificó que a bajas y altas dosis de N el Si es menos absorbido por la planta de maíz y que la fertilización con K aumenta la eficacia de la absorción.

Estos resultados concuerdan con los de Mauad et al. (2013), quienes encontraron interacción del contenido de Si con las combinaciones de las dosis de este y N en la parte aérea de las plantas de arroz.

Castellanos et al. (2015a) también observaron la influencia de la acumulación de Si en la planta de maíz en condiciones de hidroponía en función de la interacción K x N tanto para dosis bajas como para dosis altas de K. En ambos casos los máximos acumulados se presentaron en concentraciones intermedias de N, entre 10 y 15 mmol/L.

Los menores ABCPE y de severidad de ataque de *B. maydis* se presentaron en los tratamientos con 240 kg/ha de Si y dosis de N de 0, 200 y 400 kg/ha, aunque esta última variable no se diferenció estadísticamente entre los tratamientos con y sin aplicación de K y 400 kg/ha de N. Las mayores ABCPE se presentaron en los tratamientos sin aplicación de K (0 kg/ha) y en las dosis más bajas y más altas de N (0, 200, 600 y 800 kg/ha), así como ante la aplicación de K (240 kg/ha) y en las dosis más altas de N (600 y 800 kg/ha). Por

su parte, la severidad fue mayor, cuando no se aplicó K frente a dosis bajas y altas de N (0, 600 y 800 kg/ha) y cuando se aplicó K frente a las dosis más altas de N (600 y 800 kg/ha).

Se verificó que cuando se fertilizaron con N las cuatro dosis en estudio, se logró una acumulación alta de N en la planta de maíz ante la fertilización con Si, y solamente se lograron dosis intermedias de N cuando no se fertilizó con Si. El mayor nivel de N acumulado se observó frente al tratamiento con Si en las interacciones con las dosis de 200, 400, 600 y 800 kg/ha de N, y ante la no aplicación de Si a las dosis 200, 400 kg/ha de N. No obstante, la última interacción (0 kg/ha de Si x 400 kg/ha de N) no se diferenció estadísticamente de otros tratamientos incluyendo los que recibieron 0 kg/ha de N (tabla 4).

Tabla 4. Comparación de las medias para los acumulados de N, K y Si, además del ABCPE y la intensidad de *Bipolaris maydis* la para la interacción Si x N

Tratamientos		Acumulado (mg por maceta)			<i>Bipolaris maydis</i>	
Dosis de Si (kg/ha)	Dosis de N (kg/ha)	N	K	Si	ABCPE	Severidad (%)
0	0	45,46 c	1706,33 cd	113,98 e	12,22 ab	73,9 ab
0	200	72,92 a	1856,02 bcd	160,47 cde	11,94 b	72,8 b
0	400	58,89 abc	2241,59 abcd	181,12 bc	10,55 cd	63,5 cd
0	600	52,45 bc	1751,96 cd	122,87 de	11,52 bc	69,4 bc
0	800	53,31 bc	1886,67 bcd	114,17 e	13,19 a	79,3 a
380	0	52,26 bc	2542,84 ab	154,37 cde	7,22 e	43,1 e
380	200	68,88 ab	2793,34 a	248,02 a	6,80 e	40,3 e
380	400	76,71 a	2695,11 a	270,24 a	7,36 e	44,0 e
380	600	73,58 a	2447,87 ab	227,84 ab	10,00 d	60,1 d
380	800	65,31 ab	1615,16 d	167,97 cd	10,13 d	60,3 d
E. típico*		3,99	159,34	10,23	0,26	

* Letras desiguales en las columnas difieren para $p \leq 0,05$.

Fuente: Elaboración propia

En ausencia de Si, no hubo diferencia en el acumulado de K para las interacciones con las diferentes dosis de N. El K acumulado se incrementó ante la presencia del tratamiento con Si y las dosis de N de 0, 200 400 y 600 kg/ha, en relación con la dosis de 800 kg/ha, pero no difirió en relación con la interacción sin Si x 400 kg/ha de N.

Los mayores acumulados de Si se observaron en las dosis de N de 200, 400 y 600 kg/ha, sin diferencia estadística con la interacción sin silicio y la dosis intermedia de N (400 kg/ha). Se verificó que, a bajas y altas dosis de N, el Si es menos absorbido por la planta de maíz y que la fertilización con Si aumenta la eficacia de la absorción.

Estos resultados corroboran que la acumulación de Si en la planta se afecta con el desequilibrio nutricional que se produce con dosis altas de N. Esto ha sido planteado también por Mauad et al. (2013), quienes

informan disminución de las deposiciones de sílica en las hojas de las plantas de arroz frente a dosis más altas de N, y por Castellanos et al. (2015a), en sus observaciones del maíz en condiciones de hidroponía.

Las menores ABCPE y de severidad de ataque de *B. maydis* se presentaron con aplicación de Si y bajos niveles de N, que se confirma en los tratamientos con 380 kg/ha de Si y dosis de N de 0, 200 y 400 kg/ha. Las mayores ABCPE y de severidad de ataque se presentaron en los tratamientos 0 kg/ha de Si y las dosis más bajas y altas de N (0 y 800 kg/ha). En general, la aplicación de Si impactó sobre el desarrollo de la enfermedad ya que resultaron similares los valores de las variables de la enfermedad para los tratamientos 380 kg/ha de Si x 600 y 800 kg/ha de N, y 0 kg/ha de Si x 400 kg/ha de N. Este último tratamiento se destaca por los niveles bajos de severidad de ataque y ABCPE cuando no se aplicó Si.

En la literatura consultada se consiguieron resultados relacionados con el efecto positivo del silicio sobre otras las enfermedades de maíz pero que afectan el tallo, como las causadas por *Pythium aphanidermatum* (Edson) Fitzp, *Fusarium graminearum* Schwabe (*Gibberella zeae*) y *F. moniliforme* (Sawada) Wollenw (*G. fujikuroi*) (Sun et al., 1994).

En cuanto a enfermedades foliares en otras gramíneas, Santos et al. (2003) informaron mayor severidad del tizón por *Magnaporthe grisea* (T.T. Hebert) M.E. Barr en las hojas en plantas de arroz, donde no se aplicó Si, con relación al tratamiento donde se aplicó la dosis más alta.

Zañaó et al. (2009) observaron que la aplicación de Si en arroz se reflejó en una mayor concentración de Si en las hojas y mayor resistencia a la helmintosporiosis por *Bipolaris oryzae* (Breda de Haan) Shoemaker. Además, Zañaó et al. (2010) informaron haber verificado un menor contenido de N en las hojas del cultivo del arroz, cuando estas presentaban mayor afectación por *B. oryzae*.

Pereira et al. (2010) también comprobaron diferencias en la severidad y el ABCPE de *Bipolaris sorokiniana* Shoemaker, en plantas de dos variedades de trigo que habían recibido fertilización con Si con respecto a otras que no recibieron Si. Estos autores verificaron una mayor concentración de Si en las hojas de las plantas que fueron fertilizadas con este elemento.

El incremento de la resistencia de las plantas por las aplicaciones de silicio ha sido asociado con la mayor densidad de células silicatadas en la epidermis de las hojas, que actúa como una barrera física a la penetración de los hongos. Aunque el Si es un elemento bioactivo en diferentes sistemas biológicos, el modo de acción en las plantas no se conoce totalmente (Romero et al., 2011). Estos autores plantean la existencia de resultados que demuestran que también el Si puede actuar localmente induciendo reacción de defensa y que además puede contribuir con una resistencia sistémica a través de hormonas de estrés, aunque el mecanismo exacto en que el silicio opera no está aún esclarecido.

Por tal razón, los presentes resultados, aunque explican el papel que puede jugar el Si en la resistencia del maíz a *B. maydis*, sobre todo cuando existe una fertilización balanceada de N en la planta, deben ser tomados de punto de partida para realizar otras investigaciones donde se profundice en los mecanismos de acción del Si que determinan esta respuesta benéfica. Por otra parte, debe profundizarse en futuras investigaciones particularmente el papel del potasio en la resistencia a las enfermedades a concentraciones

bajas de N, por la disminución significativa observada de la severidad de la mancha foliar con fertilización alta de potasio en las dosis de 0, 200 y 400 kg/ha de N.

Conclusiones

El tizón foliar se presentó en todos los tratamientos, pero las variables de la enfermedad estuvieron siempre influenciadas por la fertilización con N, K y Si, que indujeron severidades y ABCPE más altas en la interacción dosis 0 de Si y dosis 0 de K, y severidades de la enfermedad más bajas en la dosis 380 kg/ha de Si con 240 kg/ha de K.

En los tratamientos que recibieron fertilización con Si y K combinados con la dosis intermedia de N se presentaron mayores acumulados de N, K y Si y niveles más bajos de severidad y del ABCPE.

Los acumulados de N, K y Si presentaron variaciones frente a las interacciones de la fertilización de K y N, pues mostraron niveles de las variables de la enfermedad menores en la fertilización con K y dosis de N entre 0 y 400 kg/ha, mientras que los acumulados de N, K y Si también variaron frente a las diferentes combinaciones de la fertilización de Si y N. Con esto, se observan severidades y ABCPE menores en la fertilización con Si y dosis de N entre 0 y 400 kg/ha.

Finalmente, dosis altas de N no favorecieron la absorción de Si, lo que impidió realizar su papel benéfico. Por lo tanto, se observaron indicadores de la enfermedad más altos.

Agradecimientos

A Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil) por la beca de estudios al primer autor.

Descargos de responsabilidad

Todos los autores realizaron aportes significativos al documento, por lo que están de acuerdo con su publicación y manifiestan que no existen conflictos de interés en este estudio.

Referencias

- Agricultores. Red de especialistas en agricultura. (2017, 21 de agosto). *Los mayores productores de maíz, encuentra tu país*. <https://agriculturers.com/los-mayores-productores-de-maiz-encuentra-tu-pais/>
- Andreotti, M., Souza, E. C. A. de, Costa C. A., Rodrigues, J. D., & Büll, L. T. (2000). Produção de matéria seca e absorção de nutrientes pelo milho em razão da saturação por bases e da adubação potássica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35(12), 2437-2446. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000001200015>
- Ávila, F. W., Baliza, D. P., Faquin, V., Lopes, J., & Ramos, S. J. (2010). Interação entre silício e nitrogênio em arroz cultivado sob solução nutritiva. *Revista Ciência Agronômica*, 41(2), 184-190. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902010000200003>

- Barbosa, F. L., Coelho, E. M., Mendonça, N. C. M., & Benetoli, T. R. (2011). Adubação foliar com silício na cultura do milho. *Revista Ceres, Viçosa*, 58(2), 262-267. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2011000200020>
- Bataglia, O. C., Furlani, A. M. C., Teixeira, J. P. F., Furlani, P. R., & Gallo, J. R. (1983). *Métodos de análise química de plantas. Boletim informativo* (n. 78). Instituto Agronômico de Campinas.
- Campbell, C. L., & Madden, L. V. (1990). *Introduction to Plant Disease Epidemiology*. John Wiley & Sons.
- Castellanos, L., Mello, R. de, Barbosa, G., Silva, C. N., Fernández, O., Perera, R., Rosatto, L., & Alvarez, R. (2015a). Daños por *Spodoptera frugiperda* Smith en maíz en función de nitrógeno, potasio y silicio. *Revista Protección Vegetal*, 30(3), 176-184. <http://revistas.censa.edu.cu/index.php/RPV/article/view/605/553>
- Castellanos, L., Mello, R. de, & Silva C. N. (2015b). El silicio en la resistencia de los cultivos a las plagas agrícolas. *Cultivos Tropicales*, 36, 18-26. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193243640002>
- Farshidi, M., Abdolzadeh, A., & Sadeghipour, H. R. (2012). Silicon nutrition alleviates physiological disorders imposed by salinity in hydroponically grown canola (*Brassica napus* L.) plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, 34(5), 1779-1788. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-0975-1>
- Feng, J., Shi, Q., Wang, X., Wei, M., Yang, F., & Xu, H. (2010). Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. *Scientia Horticulturae*, 123(4), 521-530. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.10.013>
- Gava, G. J. C., Oliveira, M. W., Silva, M. A., Jerônimo, E. M., Cruz, J. C. S., & Trivelin, P. C. O. (2010). Produção de fitomassa e acúmulo de nitrogênio em milho cultivado com diferentes doses de 15N-uréia. *Semina: Ciências Agrárias*, 31(4), 851-862. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2010v31n4p851>
- Kaya, C., Tuna, L., & Higgs D. (2006). Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water- stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 29(8), 1469-1480. <https://doi.org/10.1080/01904160600837238>
- Kraska, J. E., & Breitenbeck, G. A. (2010). Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41(17), 2075-2085. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.498537>
- Furtado, D. (2011). Sisvar: A computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, 35(6), 1039-1042. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>
- Mahdieh, M., Habibollahi, N., Amirjani, M. R., Abnosi, M. H., & Ghorbanpour, M. (2015). Exogenous silicon nutrition ameliorates salt-induced stress by improving growth and efficiency of PSII in *Oryza sativa* L. cultivars. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(4), 1050-1060. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162015005000073>
- Malavolta, E. (2006). *Manual de nutrição mineral de plantas*. Agronômica Ceres.
- Mateos-Naranjo, E., Andrades-Moreno, L., & Davy, A. J. (2013). Silicon alleviates deleterious effects of high salinity on the halophytic grass *Spartina densiflora*. *Plant Physiology and Biochemistry Paris*, 63(1), 15-121. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.11.015>
- Mauad, M., Costa, C. A., Grassi Filho, C. H., & Machado, S. R. (2013). Deposição de sílica e teor de nitrogênio e silício em arroz. *Semina: Ciências Agrárias, Londrina*, 34(4), 1653-1662. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n4p1653>
- Meneses, N., Mendoza, J. W., & Cecílio-Filho, A. B. (2017). Fertilización potásica del maíz dulce en suelo con alta disponibilidad de potasio. *Agrociencia Uruguay*, 21(2), 54-58.
- Naz, I., Hussain, M. F., Amna, Kamran, M. A., Mufti, R., Mukhtar, T., Rasul, F., Nasim, W., & Chaudhary, H. J. (2013). Effect of different fungicides on the incidence of maize pathogen *Helminthosporium maydis*. *Jokull Journal*, 63(6), 196-207.
- Olivera, D., Mello, R. de, Lizcano, R., Nascimento dos Santos, C. L., Calero, A., Theodore L. L. & Castellanos, L. (2019). Silicon supplementation alleviates ammonium toxicity in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(1), 413-419. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00043-w>

- Opazo, J.D., Luchsinger, A., & Neyra, O. (2008). Factores de suelo y planta para determinar la fertilización nitrogenada en maíz dulce en la zona central de Chile. *Iidesia*, 26(2), 53-58. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/iidesia/v26n2/art07.pdf>
- Pal, I., Singh, V., Gogoi, R., Hooda, K. S., & Bedi, N. (2015). Characterization of *Bipolaris maydis* isolates of different maize cropping zones of India. *Indian Phytopathology*, 68(1), 63-66. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24187.21281>
- Parera, C. A. (2017). *Producción de maíz dulce*. INTA Ediciones.
- Pereira, G., Ávila, F., Ribas, W., Vaz de Oliveira, H., Ribeiro do Vale, F. X., & Xavier, M. S. (2010). Silício no progresso da mancha marrom na folha bandeira do trigo. *Tropical Plant Pathology*, 35(3), 186-189. <https://doi.org/10.1590/S1982-56762010000300009>
- Prado, R. (2008). *Nutrição de plantas*. Editora UNESP.
- Püntener, W., & Zahner, O. (1981). *Manual de ensayos de campo en protección vegetal*. Ciba Geigy.
- Raij, B. van, (1990). *Potássio: necessidade e uso na agricultura moderna*. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Potafos.
- Raya, J. C., & Aguirre, C. L. (2012). El papel del silicio en los organismos y ecosistemas. *Tecnología: Conciencia Tecnológica*, 43, 42-46. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3985098.pdf>
- Romero, A., Munévar, F., & Cayón, G. (2011). Silicon and plant diseases. A review. *Agronomía Colombiana*, 29(3), 473-480.
- Santos, R. G. dos, Korndörfer, G. H., & Prabhu, A. S. (2003). Eficiência do silício combinado com nitrogênio e tratamento de sementes no controle do doenças do arroz irrigado por inundação. *Biociência Jornal Uberlândia*, 19(3), 43-49. <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/6467/4201>
- Santos, R. G., Castro-Neto, M. D. de, Ramos, L. N., Sarmiento, R., Korndörfer, G. H., & Ignácio, M. (2011). Effect of silicon sources on rice diseases and yield in the State of Tocantins, Brazil. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 33(3), 451-456. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i3.6573>
- Seminis. (2015). *Guía de enfermedades del maíz dulce*. <https://www.seminis.mx/recursos/agronomic-spotlights/guia-de-enfermedades-del-maiz-dulce/>
- Silva, C. N., Mello, R. de, Caione, G., De Lima, A. J., & Checchio, F. L. (2016). Silicon and excess ammonium and nitrate in cucumber plants. *African Journal Agriculture Research*, 11(4), 276-283. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.1022>
- Sousa, J. V. C. de, Ribeiro, R. C., Queiroz, L. J., Carvalho, P. C., Rodrigues, T. M., & Brito, C. H. (2010). Silicato de potássio via foliar no milho: fotossíntese, crescimento e produtividade. *Biociência Jornal, Uberlândia*, 26(4), 502-513. <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/7148/5122>
- Sun, X., Sun, Y., Zhang, C., Song, Z., Chen, J., Bai, J., Cui, Y., & Zhang, C. (1994). The mechanism of corn stalk rot control by application of potassic and siliceous fertilizers. *Acta Phytopylacica Sinica*, 21, 102-108. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19952309031>
- Zanão, L. A., Ferreira, R. L., & Tavares, V. (2009). Teores foliares de nutrientes e de silício em plantas de arroz infectadas por *Bipolaris oryzae*. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44(2), 203-206. <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v11i1.15942>
- Zanão, L. A., Ferreira, R. L., & Tavares, V. (2010). Aplicação do silício para aumentar a resistência do arroz à mancha-parda. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44(2), 203-206. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2009000200013>