

ACTIVIDAD ANTIFÚNGICA DEL SILICATO DE POTASIO PARA CONTROLAR LA PUDRICIÓN DE LA CORONA EN BANANO

Vianey González-Jiménez¹, Pedro A. Moscoso-Ramírez¹, Carlos F. Ortiz-García¹, Saúl Sánchez-Soto¹ y Francisco M. Lara-Viveros²

RESUMEN

La pudrición de corona es la enfermedad poscosecha más importante en banano en todo el mundo. Se determinó la actividad antifúngica del silicato de potasio (SP) en poscosecha contra la pudrición de la corona (PC) del banano inoculado con *Colletotrichum musae* (Cm). Se probaron tratamientos con SP (30 a 160 mM) mediante experimentos *in vitro* e *in vivo* (70 a 300 mM). La concentración preliminar *in vivo* de 90 mM de SP, se usó en los experimentos de la influencia de la temperatura de baños, en la efectividad del SP. Tratamientos de baños curativos de SP a 90 mM a 40 °C durante 20 min aplicados solo o combinados con bajas dosis de tiabendazol (TBZ) se evaluaron sobre la PC, así como también el efecto del SP sobre la calidad del banano. El SP a 90 mM inhibió totalmente el crecimiento micelial de Cm, y redujo significativamente la severidad de la PC tanto en tratamientos preventivos (51,1 %) como curativos (59,5 %) en experimentos primarios *in vivo*. Entre los baños con SP a 90 mM durante 20 min probados a diferentes temperaturas, el baño a 40 °C curativo fue seleccionado como el más efectivo. El tratamiento combinado de baño curativo, SP+TBZ, mejoró el control contra PC con una reducción de incidencia de 91,6 %. El SP no afectó la calidad de fruto de banano.

Palabras clave adicionales: Calidad, *Colletotrichum musae*, incidencia, micelio, severidad

ABSTRACT

Antifungal activity of potassium silicate to control crown rot in banana

Crown rot is the most important postharvest disease in banana worldwide. The post-harvest antifungal activity of potassium silicate (SP) against crown rot (CR) of banana inoculated with *Colletotrichum musae* (Cm) was determined. Treatments with SP (from 30 to 160 mM) were tested through *in vitro* and *in vivo* (from 70 to 300 mM) experiments. The 90 mM concentration of SP in *in vivo* experiments was selected as the most effective and used in experiments on the influence of dip temperature on SP effectiveness. Curative dip treatments of 90 mM SP at 40 °C for 20 min applied alone or in combination with low doses of thiabendazole (TBZ) were evaluated on CR, as well as the effect of SP on banana quality. SP at 90 mM totally inhibited the mycelial growth of Cm as well as significantly reduced the severity of CR in both preventive (51.1 %) and curative (59.5%) treatments in *in vivo* primary experiments. Among the dips with PS at 90 mM for 20 min tested at different temperatures, the dip at 40 °C was selected as the most effective. The combined curative dip treatment, SP+TBZ, improved the control against CR with an incidence reduction of 91.6 %. SP does not affect banana fruit quality.

Additional Keywords: *Colletotrichum musae*, incidence, mycelium, quality, severity

Editor Asociado: Dra. Marie Tamara González.

INTRODUCCIÓN

La pudrición de la corona (PC) causada por un complejo fúngico, *Colletotrichum musae*, *Fusarium spp.* y *Lasiodiplodia theobromae*, entre otros, es la principal enfermedad en poscosecha (Mirshekari *et al.*, 2012) en México y en todas las áreas productoras del mundo (Lassois *et al.*,

2008). La PC tiene mucha importancia en la exportación de banano y su incidencia es más frecuente durante o después de la maduración forzada del banano (Ranasinghe *et al.*, 2003). Algunos trabajos de investigación han mostrado que el hongo Cm es la especie más patogénica en el complejo de hongos y puede causar la infección a partir de un inóculo muy pequeño (Jahan *et al.*,

Recibido: Noviembre 28, 2024

Aceptado: Junio 11, 2025

¹Área de agricultura, Campus Tabasco, Colegio de Posgraduados. Tabasco, México. e-mail: vianey.gonzalez@upch.mx; moscoso@colpos.mx (autor de correspondencia); cfortiz@colpos.mx; ssoto@colpos.mx

²Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo, Coahuila, México. e-mail: francisco.lara@ciqa.edu.mx

2019; Goswami *et al.*, 2020; González *et al.*, 2023, 2024).

El control de la enfermedad se realiza principalmente con fungicidas químicos sintéticos convencionales (tiabendazol, imazalil y procloraz). El tiabendazol es un fungicida que pertenece al grupo benzimidazol. Es además conocido como aditivo alimentario (E-233) en Europa, de la clase de los conservantes, y es un antifúngico aprobado para tratamiento de enfermedades de pre y post cosecha de frutos frescos por la Administración de Alimentos y Drogas de los EE.UU (FDA, en inglés) (Budetic *et al.*, 2023). En México está autorizado su uso en varios cultivos, incluyendo el banano contra enfermedades de pre y poscosecha (COFEPRIS, 2025). La dosis recomendada para el control de la PC en poscosecha en banano es de 450 ppm (Lassois y Bellayre, 2014). Sin embargo, el uso de estos fungicidas trae consigo varios problemas: i) contaminación del medio ambiente; ii) acumulación de residuos en el fruto por arriba del límite permisible; y, iii) aparición de cepas del hongo resistentes a los fungicidas (Gatto *et al.*, 2011). Por ello, existe la necesidad de buscar alternativas al control químico sintético convencional, a través de sustancias menos tóxicas a mamíferos y más eco-amigables, tales como el silicio (Si) (Krauss y Johanson, 2000). Es conocido que el Si puede tener un efecto directo sobre patógenos (Fatemi *et al.*, 2011) o un efecto indirecto sobre el fruto hospedero. Este último incluye la formación de barreras físicas y mecánicas a la penetración del patógeno a nivel de la pared celular (Buonaurio *et al.*, 2009) y la inducción bioquímica de defensas como la acumulación de lignina, compuestos fenólicos y proteínas relacionadas a patogénesis (PRP) (Perera y Karunaratne, 2002). Varios estudios reportan el control de enfermedades poscosecha con silicio, tales como pudrición rosada (*Trichotecium roseum*) en melones (Guo *et al.*, 2007), podredumbre verde (*Penicillium digitatum*) y azul (*P. italicum*) en cítricos (Moscoso y Palou, 2014) y antracnosis en papaya (Vidal *et al.*, 2022). En el cultivo del banano se ha reportado el efecto benéfico del uso de silicato de sodio en combinación con tratamientos térmicos y con ácido salicílico para el control de *Colletotrichum sp.* (Silva *et al.*, 2016). Sin embargo, ninguna información está disponible sobre el efecto del Si

sobre la PC en banano. Bajo este esquema, los objetivos de este trabajo fueron: i) determinar el efecto *in vitro* del SP sobre el crecimiento micelial de Cm; ii) determinar el efecto *in vivo* del SP sobre la PC; iii) determinar la influencia de la temperatura del SP sobre su efectividad; iv) determinar el efecto del SP sólo o combinado con bajas dosis de tiabendazol sobre la PC; y, v) evaluar el efecto del SP sobre la calidad de los frutos del banano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Patógeno fúngico. El patógeno *Colletotrichum musae* (Cm) se obtuvo de la colección de cultivos fúngicos del Laboratorio de Fitopatología del Colegio de Posgraduados del Campus Tabasco. El hongo fue sembrado y cultivado en cajas Petri con medio papa dextrosa agar (PDA) e incubado a 25 °C durante 7 a 14 días.

Preparación de la suspensión de conidios de *C. musae*. Los conidios de Cm de una colonia de 14 días de edad se tomaron de la superficie de las cajas Petri conteniendo PDA y se transfirieron a un vial que contenía una solución de agua estéril con 0,05 % (p/v) de Tween 80. Posteriormente, la suspensión de conidios se filtró usando una gasa estéril para eliminar los fragmentos de micelio del hongo. En seguida, dos alícuotas de la suspensión de conidios filtrado fueron colocadas sobre un hematocitómetro para finalmente ajustar una concentración de 10^6 conidios·mL⁻¹ del hongo.

Frutos. Los experimentos se realizaron con bananos (*Musa acuminata*) cv. Enano Gigante, en madurez fisiológica de tamaño uniforme y libre de daños. Se removieron los remanentes florales, la suciedad y las impurezas. Los racimos de banano se recolectaron en campos de producción comercial del área de Cucuyulapa, Cunduacán, Tabasco (17° 59' 31.092'' N y 93° 15' 16.668'' O), geográficamente a 15 km de la ciudad de Cárdenas, Tabasco, México. Antes de cada experimento, los racimos fueron desmanados y las manos fueron seleccionadas, aleatorizadas, lavadas con agua potable, y secadas a temperatura ambiente.

Desinfección y maduración de los frutos. El agua para el lavado de los frutos y deslatexado, se desinfectó con NaClO (5 % v/v, Hycel reactivos químicos, Jalisco, México) a 250 ppm durante 5 minutos y luego se secó a temperatura ambiente

(25 °C). Después de 0,5 h de secado, los frutos se desinfectaron con una solución acuosa de NaClO (1,0 % v/v) durante 2 min, se enjuagó para eliminar el cloro residual y se secó a temperatura ambiente por 0,5 h adicionales. Posteriormente, los frutos se trataron con una solución acuosa de etefón a 2000 ppm (ETHREL 21,7 % LS, Bayer®, México, México) durante 1 min para la maduración forzada. Finalmente, las coronas de las manos de banano se desinfectaron por inmersión durante 30 s con alcohol etílico al 70 % (v/v).

Efecto del SP sobre el crecimiento micelial de Cm *in vitro*. Para evaluar el efecto del SP (39,2 % de i.a., Ag Sil® 21, Silicatos y Derivado S.A. de C.V., Estado de México, México) sobre el crecimiento micelial de Cm, se probaron tratamientos de 30, 50, 70, 90, 110 y 160 mM, más un control. Se usó un diseño experimental completamente al azar. Cada tratamiento consistió de 5 cajas Petri (cada caja Petri fue una repetición). Se preparó una solución acuosa madre, o stock, a la concentración de 20 % de SP (K₂SiO₃), la cual se adicionó al medio de cultivo PDA, cuando dicho medio estaba a la temperatura de 47,5 ± 2,5 °C, para lograr las concentraciones (tratamientos) finales deseadas de SP. Aproximadamente 20 mL de medio PDA con SP se vaciaron en cada caja Petri. 24 horas después, un disco de micelio de 5 mm de Cm de 7 días de edad se colocó en el centro de la caja Petri, según cada tratamiento de SP evaluado y se incubó a 25 °C. El experimento se realizó por duplicado.

Se midieron dos diámetros (mm) de la colonia de Cm de manera perpendicular uno del otro a los 9 días de incubación. El crecimiento micelial se expresó como la inhibición de crecimiento micelial en porcentaje (%ICM), la cual se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\%ICM = ((DCC - DCT) / DCC) * 100$$

Donde:

DCC = Diámetro de la colonia en el control, mm

DCT = Diámetro de la colonia en el tratamiento, mm

Efecto del SP sobre la PC *in vivo*. La concentración de SP que inhibió completamente, o que obtuvo el mayor porcentaje de inhibición de los conidios de Cm se utilizó como referencia para

determinar el rango de concentraciones a probar *in vivo* utilizando los frutos.

Tratamientos. Se aplicaron 9 tratamientos correspondientes a: frutos sin inocular (TSI), control (agua destilada estéril), 70, 90, 100, 150, 200, 250 y 300 mM de SP, con un atomizador sobre la superficie de corte de la corona hasta cubrirlo completamente, y se establecieron dos momentos para la aplicación del inóculo sobre las coronas, que fueron: una hora antes y una hora después de la aplicación de los tratamientos, colocando 100 µL de la suspensión de 10⁶ conidios mL⁻¹ de Cm. Se empleó un diseño experimental completamente al azar y cada tratamiento consistió de tres repeticiones con tres manos de 4-6 frutos cada una. Posteriormente, los frutos inoculados y tratados o viceversa se colocaron en cajas de plástico de 10 kg y se almacenaron en un cuarto a 25±1 °C y 85±5 % de humedad relativa (HR) durante 7 días. La lectura de severidad se tomó a los 7 días tras la inoculación del hongo.

Se valoró la pudrición de corona usando la escala de severidad (Cuadro 1, Figura 1) propuesta por Alwindia *et al.* (2004) y se expresó como porcentaje de reducción de severidad (%RS) de la enfermedad.

$$\%RS = \left(\frac{IPC - IPT}{IPC} \right) * 100$$

Donde: IPC es índice de la pudrición de la corona en el control, y IPT es índice de la pudrición de la corona en el tratamiento.

Influencia de la temperatura del SP en la efectividad antifúngica. Para determinar la influencia de la temperatura se usó la concentración más efectiva de SP (90 mM) seleccionada en los experimentos previos. Los tratamientos evaluados fueron 8, correspondientes a: i) frutos sin inocular (TSI); ii) control (sólo agua sin calentar); iii) agua a 30°C (AC 30 °C); iv) agua a 40 °C (AC 40 °C); v) agua a 50 °C (AC 50 °C); vi) SP a 90 mM a 30 °C (SP 30 °C); vii) SP a 90 mM a 40 °C (SP 40 °C); y, viii) SP a 90 mM a 50 °C (SP 50 °C). La aplicación de los tratamientos se realizó mediante baño de inmersión de los frutos de 20 minutos. Posteriormente se efectuó la inoculación, considerando dos momentos: una hora antes y una hora después de la inmersión de los frutos en los

respectivos tratamientos. La inoculación se realizó según el procedimiento previamente descrito. La inmersión de los frutos se efectuó en una nevera plástica (Igloo®, Cárdenas, Tabasco, México) con un volumen de 18 L y el agua se calentó, según los tratamientos, con la ayuda de un calentador eléctrico manual para agua de capacidad de 21 L (Silverline®, DC-CA, 1000 W, Cárdenas, Tabasco, México). Los tratamientos fueron

evaluados mediante un diseño experimental completamente al azar y se usaron 3 repeticiones de 4 manos (4-6 frutos por cada mano) por cada tratamiento. Las manos con frutos tratadas e inoculadas o viceversa se colocaron en cajas de plástico de 10 kg y se almacenaron en un cuarto a 25 ± 1 °C y 85 ± 5 % de HR durante 7 días. Se valoró la severidad (%RS) de la PC después del periodo de incubación.

Cuadro 1. Escala de severidad para valorar la pudrición de corona.

0	Ninguna decoloración o crecimiento micelial sobre la corona
1	Decoloración o crecimiento micelial limitado a la superficie del corte de la corona
2	Decoloración o crecimiento micelial menos de 10% del área de la corona
3	11-40% de decoloración o crecimiento micelial sobre el área de la corona
4	41-70% de decoloración o crecimiento micelial sobre el área de la corona
5	71-100% de decoloración o crecimiento micelial sobre el área de la corona
6	Decoloración o crecimiento micelial sobre el pedicelo de los dedos
7	Decoloración o crecimiento micelial alcanza la pulpa de los dedos

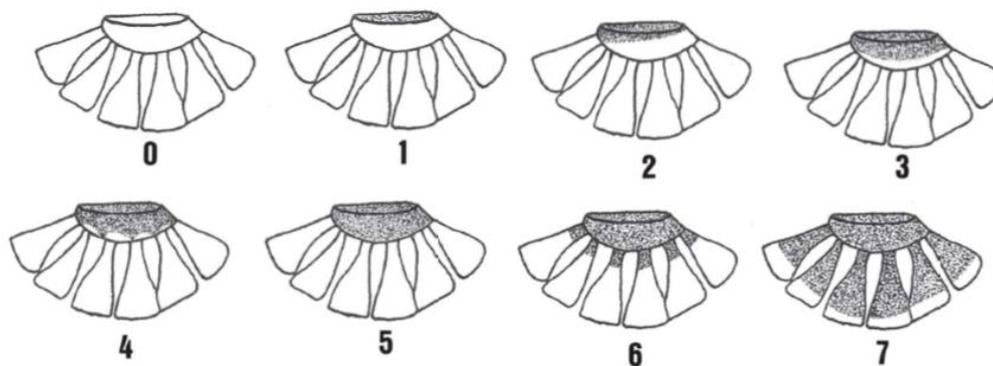


Figura 1. Índice de clasificación visual de severidad de la pudrición de la corona (Alvindia *et al.*, 2004).

Efecto del SP en combinación con TBZ sobre la severidad de la PC. El SP en solución acuosa a 90 mM calentado a 40 °C aplicado mediante inmersión de los frutos en la solución durante 20 minutos y una hora antes de la inoculación de *Cm* fue el tratamiento más efectivo seleccionado de los experimentos previos, se usó para determinar la efectividad del SP solo o combinado con bajas dosis de tiabendazol (TBZ). Los ensayos se realizaron utilizando frutos de banano cv. Enano Gigante. Los frutos se desinfectaron, se

maduraron con etileno y se realizó la inoculación de acuerdo con los procedimientos descritos previamente. Los tratamientos utilizados fueron: tratamiento sin inocular (TSI); control (agua sin calentar); SP a 90 mM 40 °C (SP 40 °C); SP a 90 mM más TBZ a 225 ppm a 40 °C (SP+TBZ); TBZ a 225 ppm (TBZ 225); TBZ a 450 ppm (TBZ 450); y, TBZ a 600 ppm (TBZ 600) y fueron aplicados mediante la inmersión de los frutos considerando el mismo procedimiento realizado previamente. Para el tratamiento combinado de SP

más TBZ, ambos compuestos fueron mezclados en agua, en sus cantidades respectivas, y agitados con una varilla de plástico. Se usaron 3 dosis de TBZ: una dosis baja (TBZ a 225 ppm), una dosis comercial (TBZ a 450 ppm) y una dosis regional (TBZ a 600 ppm). El diseño experimental fue completamente al azar. Cada tratamiento consistió de 3 repeticiones de 4 manos (4-6 frutos por cada mano) cada una. Las manos con frutos se colocaron en cajas de plástico y se almacenaron en un cuarto a 24-26 °C y 85±5 % de HR durante 7 días. Se valoró la incidencia en porcentaje (número de coronas enfermas/ número de coronas totales) y la severidad de la pudrición de la corona después del periodo de incubación. Para esta última variable se utilizó la escala de severidad propuesta por Alwindia *et al.* (2004) y la severidad se expresó como el porcentaje de reducción de severidad (%RS) de la enfermedad.

Efecto del SP sobre la calidad poscosecha de los frutos. Para determinar el efecto del SP sobre la calidad de los frutos, se evaluó la calidad externa e interna de los frutos después de 6 días de la aplicación de los tratamientos. Los frutos se almacenaron en un cuarto a 25±1 °C y 85±5 % de HR. Se empleó un diseño experimental completamente al azar, con 20 frutos (cada fruto fue una repetición y se utilizaron frutos de la segunda y tercera mano del racimo). Para la variable pérdida de peso se usaron 8 manos (cada mano fue una repetición) por tratamiento. Los tratamientos evaluados fueron: control (sólo agua) durante 1 min; SP a 90 mM a 20 °C durante 1 min; y, SP a 90 mM a 40 °C durante 20 min. Se valoraron los siguientes parámetros de calidad en los frutos:

Calidad externa

- Pérdida de peso (%). Se cuantificó el peso inicial y final de las manos en cada tratamiento.
- Peso de fruto (g). Se registró el peso individual de 20 frutos por tratamiento con ayuda de una balanza digital (Ohaus Corp®, N13123, USA).
- Firmeza de la pulpa (kgf). Se cortaron transversalmente los frutos en su parte media para poder medir la firmeza de la pulpa con un penetrómetro digital (TMP Equipos® S.A. de C.V., GY-4, México) usando un puntal de 8 mm de diámetro.
- Peso de pulpa y cáscara (g). Se

descortezaron 20 frutos y se pesaron separadamente la pulpa y la cáscara de los frutos.

- Relación peso de pulpa/peso de cáscara del fruto. Se calculó dividiendo peso de pulpa entre peso de cáscara en 20 frutos.

Calidad interna

- Acidez titulable (% de ácido málico). Se realizó por titulación usando hidróxido de sodio (NaOH) a 0,1 N y fenolftaleína como indicador (AOAC, 2005).
- Contenido de sólidos solubles totales (CSST, °Brix). Se licuó 30 g de pulpa de banano en 90 mL de agua destilada durante 2 min y se filtró en tela organza. Se colocó 3-4 gotas del filtrado en la superficie del prisma y se realizó la lectura en el refractómetro (Atago®, Pal-1, Japón) (AOAC, 2005).

Análisis estadístico. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza (ANAVAR) con el programa Statgraphics (Statgraphics Plus, v 5.1; Manugistics Inc., Rockville, Maryland, EE.UU.). Las reducciones de severidad o incidencia de la PC con respecto a los tratamientos control, se calcularon como porcentajes. Los datos de reducción de severidad o incidencia en porcentaje de la PC se transformaron al arco-seno de la raíz cuadrada de la proporción de coronas infectadas para normalizar las varianzas antes de ser sometidas al ANAVAR. La significancia estadística se consideró en el nivel $p=0,05$. Se aplicó la prueba de medias de la diferencia mínima significativa (DMS) de Fisher para separar medias cuando fue necesario. Los valores mostrados son medias no transformadas.

RESULTADOS

Efecto del SP sobre el crecimiento micelial de Cm *in vitro*. En general, todas las concentraciones evaluadas con SP tuvieron un efecto significativo ($p\leq 0,05$) sobre el crecimiento micelial de Cm después de 9 días de incubación a 25 °C. A partir de la concentración de 90 mM de SP se inhibió el 100 % del crecimiento micelial de Cm, seguido por la concentración de 70 mM de SP, con una inhibición de 77,7 % del crecimiento micelial del hongo en comparación con el control. El resto de las concentraciones de SP tuvieron

inhibiciones de crecimiento micelial del hongo bajas. Por lo tanto, el SP a 90 mM se tomó como

referencia para experimentos subsecuentes (Figura 2).

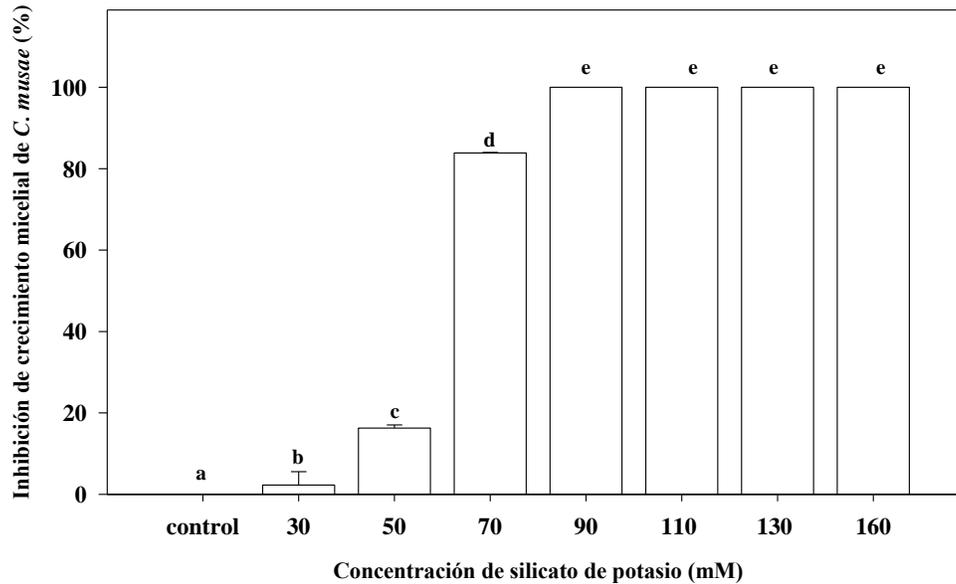


Figura 2. Efecto *in vitro* del silicato de potasio sobre la inhibición de crecimiento micelial de *C. musae* después de 9 días de incubación a 25 °C. Letras distintas sobre las columnas significan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de la diferencia mínima significativa de Fisher ($p \leq 0,05$) aplicado a datos transformados al arco-seno. Barra es el error típico (ET; $n=5$). Se muestran las medias de inhibición de crecimiento micelial no transformadas de dos experimentos. ET=error típico.

Efecto del SP sobre la PC *in vivo*. En general, los valores de reducción de la severidad de la PC por la aplicación de los tratamientos preventivos y curativos *in vivo* de SP a los 7 días después de la inoculación artificial de la corona con Cm y almacenado en un cuarto a 25 ± 1 °C, mostraron que hubo diferencias estadísticas en la reducción de severidad de la PC (Figura 3). La concentración de SP de 90 mM fue el tratamiento más efectivo para reducir la severidad de PC, tanto en tratamiento preventivo como en curativo, con valores de 51,1 y 59,5 %, respectivamente, comparado con el control (Figura 3), seguido por la concentración de 70 mM de SP, con valores de 41,6 y 40,4 % de reducción de severidad de la PC, respectivamente (preventivo y curativo). El resto de las concentraciones de SP probadas tuvieron reducciones de severidad de PC bajas en ambos tipos de tratamiento (preventivo y curativo), variando de 7,1 a 14,2 %. Por lo tanto, la concentración de 90 mM de SP fue seleccionada como el tratamiento más efectivo para las evaluaciones subsecuentes.

Influencia de la temperatura del SP en la efectividad antifúngica. En baños preventivos, el tratamiento más efectivo de temperatura sobre SP a 90 mM durante 20 min para reducir la severidad de PC en banano fue el SP 40 °C, con un valor de 70,2 % de reducción de severidad de PC, seguido por los tratamientos SP 50°C (64,3 %), AC 50 °C (59,5 %), SP 30 °C (51,2%) y AC 30°C (50,0 %) (Figura 4). En baños curativos, los tratamientos significativamente más efectivos de temperatura para reducir la severidad de PC en banano fueron el SP 40 °C y SP 50 °C, con reducciones de severidad de PC de 77,4 y 75,0 %, seguido por los tratamientos SP 30°C (60,7 %), AC 50°C (57,1 %) y AC 40 °C (41,7 %) (Figura 4). Sin embargo, SP 50 °C no es recomendable su uso porque la cáscara del fruto presentó quemaduras. Por lo tanto, la temperatura de baño de 40 °C (SP 40 °C) aplicado como tratamiento curativo fue seleccionado como el más efectivo para experimentos futuros.

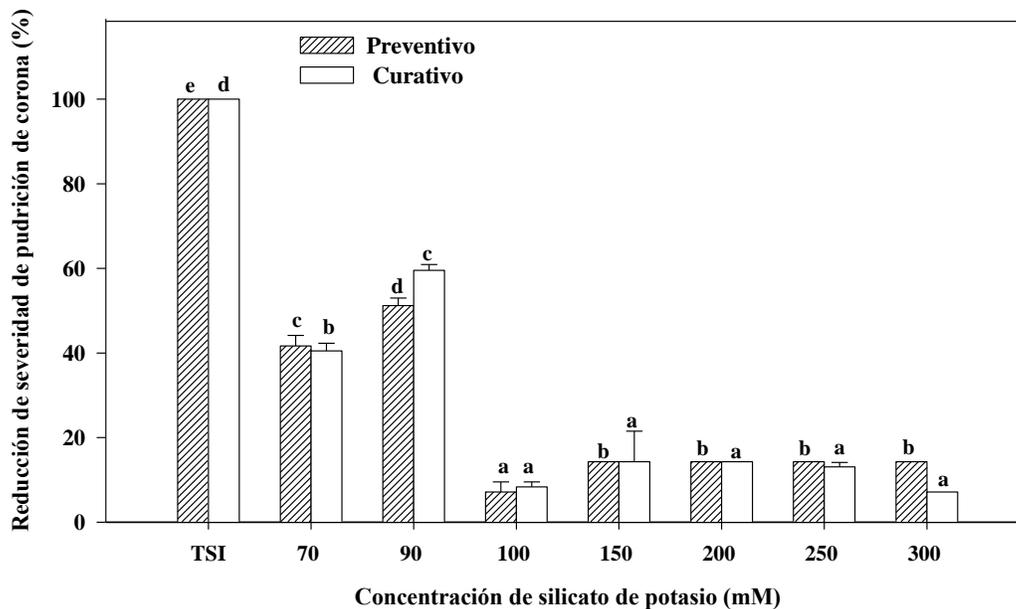


Figura 3. Efecto del silicato de potasio sobre la pudrición de la corona en banano (*Musa acuminata*) cv. Enano Gigante en experimentos in vivo, inoculado con *C. musae* 1 h antes (curativo) o después (preventivo) del tratamiento, e incubado durante 7 días a 25 ± 1 °C y 85 ± 5 %HR. Las reducciones de la severidad se determinaron con respecto al tratamiento control (severidad de 100% para ambos efecto preventivo y curativo). Para cada tipo de efecto, columnas con letras diferentes indican diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de la mínima diferencia significativa de Fisher ($p \leq 0,05$) aplicado a datos transformados al arco seno. Barra indica error típico (ET; $n=3$). TSI= tratamiento sin inocular, ET=error típico. Se muestran valores de medias no transformadas.

Efecto del SP en combinación con TBZ sobre la severidad de la PC. De los tratamientos evaluados como curativos en baño para reducir la incidencia de PC, el tratamiento combinado de SP a 90 mM con el fungicida TBZ a dosis baja (SP+TBZ) y el tratamiento de TBZ a 600 ppm (TBZ 600), consistentemente ambos, redujeron la incidencia de PC un 91,6 %. El resto de los tratamientos (SP 90, TBZ 225 y TBZ 450) tuvieron un efecto nulo sobre la incidencia de PC en banano (Figura 5). Similarmente, el tratamiento combinado SP+TBZ y el tratamiento TBZ 600 fueron los mejores para reducir la severidad de PC, con un valor de 98,8 % para ambos, seguido de los tratamientos SP 90 (72,6 %) y TBZ 450 (50,0 %). El tratamiento TBZ 225 redujo la severidad de PC, con un valor de 23,8 % (Figura 5).

Efecto del SP sobre la calidad poscosecha de los frutos. En general, el SP a 90 mM durante 20 min calentado (40 °C) o no calentado (20 °C durante 1 min) no tuvo efecto significativo

($p \leq 0,05$) sobre los atributos de calidad del fruto de banano (Cuadro 2).

DISCUSIÓN

Los hallazgos del presente estudio revelan que el crecimiento micelial *in vitro* de Cm se inhibió por completo a 90 mM. Estudios similares a esta investigación han informado que el SP tiene acción fungitóxica directa. Bekker *et al.* (2006) reportan que $40 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ de SP soluble adicionado en agar inhibe completamente el crecimiento micelial de *C. coccodes* y *F. solani*, mientras que $80 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ de SP soluble adicionado en agar inhibe totalmente a *Drechslera sp* y *F. oxysporum*. Recientemente, Vidal *et al.* (2022) encontraron que el crecimiento micelial *in vitro* de *C. brevisporum* se inhibe hasta 93 % a una concentración de 3 % de SP, mientras que en este estudio el crecimiento micelial de Cm fue suprimido totalmente a una concentración de 90 mM (~ 1,4 %) de SP.

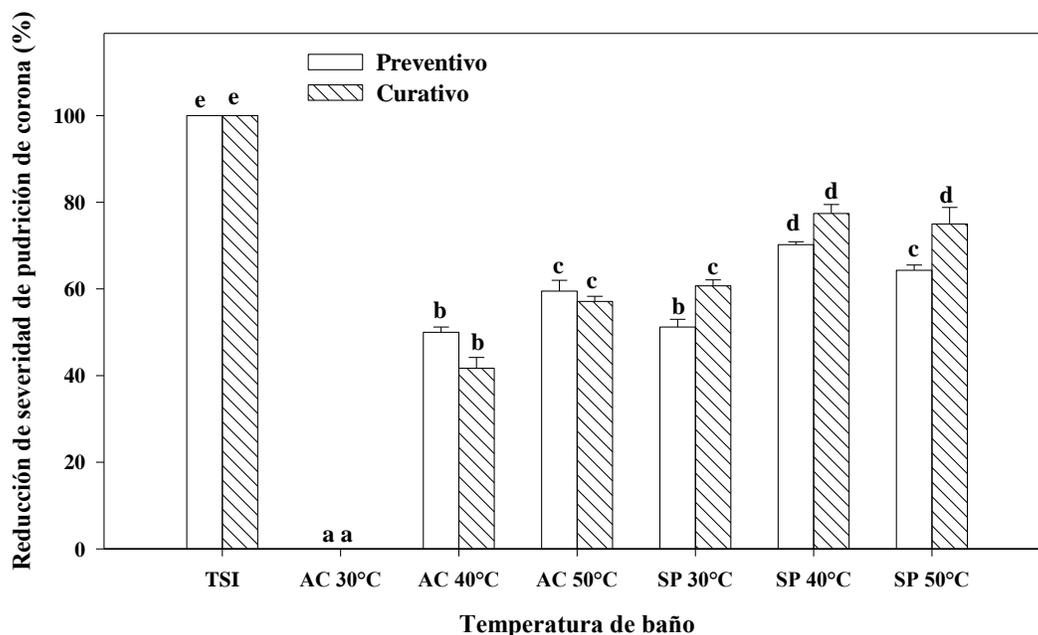


Figura 4. Reducción de la severidad de la pudrición de corona, en frutos de banano (*Musa acuminata*) cv. Enano Gigante, causada por *C. musae*, inoculado una hora antes (curativo) o una hora después (preventivo), de tratado con silicato de potasio (SP) a 90 mM y agua (AC) a diferentes temperaturas, aplicado mediante inmersión de los frutos durante 20 minutos, e incubado durante 7 días a 25 ± 5 °C y 85 ± 5 %HR. Las reducciones de la severidad se determinaron con respecto al tratamiento control (severidad de 100% para ambos efectos preventivo y curativo). Para cada tipo de efecto, columnas con letras distintas indican diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de la diferencia mínima significativa de Fisher ($p \leq 0,05$) aplicado a datos transformados al arco seno después de un ANAVAR. Barras indican error típico (ET; n=3). AC= agua caliente, SP= silicato de potasio, TSI= tratamiento sin inocular, ET=error típico. Se muestran medias no transformadas.

En cuanto al efecto del SP sobre la PC en experimentos primarios *in vivo* curativo, 90 mM de SP en este estudio, redujo la severidad de PC hasta 59,5 %, esta reducción fue mayor a aquella reportada por Khan *et al.* (2001), quienes reportaron una reducción de severidad de Cm de 35-41 % con el antioxidante hidroxianisol butilado a 5 mM en banano; aunque claro está, los autores usaron una menor dosis del antioxidante. También es consistente con el trabajo de Moscoso y Palou (2014) quienes indicaron una mayor efectividad en el control de *Penicillium italicum* en naranjas cv. Valencia Late con 90 mM de SP, tanto en tratamientos preventivos como curativos. Vidal *et al.* (2022) no encontraron efecto curativo significativo del SP sobre la incidencia y severidad de la antracnosis en frutos de papaya cv. Maradol, pero si un efecto preventivo contra la

enfermedad a 90 mM. Los datos del presente estudio sugieren que el SP tiene actividad antifúngica tanto protectoras como curativas contra Cm; tales actividades inhibitoras y antifúngicas podrían deberse a diferentes modos de acción del SP, tales como la formación de barreras física a nivel de pared celular o daño directo sobre la membrana celular de los conidios del hongo (De Costa y Gunawardhana, 2012). Varios de los trabajos de investigación citados e incluyendo el presente estudio, indican que el SP se comporta como un regulador de crecimiento, en lo que respecta a su actividad antifúngica, a una dosis óptima. En contraste, los fungicidas convencionales tienen un efecto contra las enfermedades que es directamente proporcional a su concentración. Esta hipótesis es apoyada por los resultados del control de la severidad de la PC

en los experimentos *in vivo*, en tratamientos curativos y preventivos en este estudio. Es posible que el Si tenga un efecto directo sobre los conidios del hongo; Liu *et al.* (2010) reportaron daños sobre la membrana plasmática de conidios de *P. digitatum* tratadas con Si. Otros trabajos atribuyen la acción antifúngica del Si a un efecto indirecto sobre el hospedero, formando barreras

físicas o mecánicas a la penetración de patógenos a nivel de la pared celular (Datnoff *et al.*, 2001; Buonauro *et al.*, 2009); induciendo mecanismos de defensa bioquímica en la planta, incluyendo la acumulación de lignina, compuestos fenólicos y proteínas relacionadas a patogénesis (Edson *et al.*, 2015).

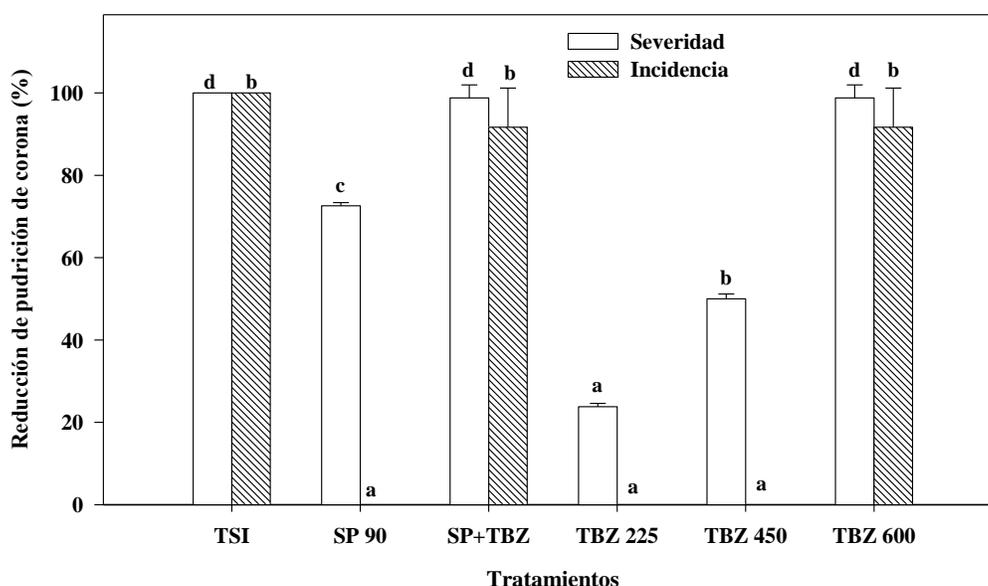


Figura 5. Efecto de silicato de potasio solo o combinado con TBZ sobre la pudrición de la corona en banano (*Musa acuminata*) cv. Enano Gigante, inoculado con *C. musae*, 1 h antes (curativo) del tratamiento durante 20 min a 40°C. Las reducciones de la incidencia y severidad se determinaron con respecto al tratamiento control tratado con agua (incidencia y severidad de 100%). Columnas con letras distintas indican diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de la diferencia mínima significativa de Fisher ($P \leq 0,05$) aplicado a datos transformados al arco seno. Barras indican error típico (ET; $n=3$). SP= silicato de potasio, TBZ= tiabendazol, TSI= tratamiento sin inocular, ET=error típico. Se muestran valores de medias no transformados.

Cuadro 2. Efecto del silicato de potasio sobre la calidad poscosecha del banano (*Musa acuminata*), a los 6 días de la aplicación de los tratamientos, mantenidos a 25 ± 1 °C y 85 ± 5 % de HR.

Tratamientos	FF (kgf)	PPMF (%)	PFI (g)	PCF (g)	PPF (g)	CSST (°Brix)	AT (% de ácido málico)
Testigo	0,562±0,07a	9,39±0,45a	206,05±29a	70,14±10a	135,12±20a	18,41±0,86a	0,24±0,08a
SP 90 mM a 20°C	0,559±0,06a	9,01±0,37a	210,78±32a	72,97±10a	137,81±22a	18,75±1,23a	0,27±0,04a
SP 90 mM a 40°C	0,593±0,09a	8,59±0,34a	197,64±28a	68,83±09a	128,81±20a	17,45±1,39a	0,30±0,06a

Firmeza de fruto (FF), pérdida de peso de mano de fruto (PPMF), peso de fruto individual (PFI), peso de cáscara de fruto (PCF), peso de pulpa de fruto (PPF), contenido de sólidos solubles totales (CSST) y acidez titulable (AT). Para cada columna, valores de medias \pm error estándar; medias con distintas letras son estadísticamente diferente (Fisher; $p \leq 0,05$). $n=20$ repeticiones por tratamiento.

Respecto a la influencia de la temperatura de baño en la efectividad del SP. Aunque el tratamiento curativo a 50 °C con SP a 90 mM durante 20 min, presentó una reducción significativa de la severidad de la PC, se descarta su utilización por los daños causados al fruto (quemaduras). Ummarat *et al.* (2011) reportaron resultados similares de quemadura de cáscara del fruto del cv. Gros Michel, a 50 °C. En el presente estudio, el tratamiento de baño curativo de SP a 40 °C presentó el mayor porcentaje (77,41 %) de reducción de severidad de PC, que supera ampliamente al valor reportado (45 %) con 300 mM de NaHCO₃ (De Costa y Gunawardhana, 2012), pero es similar (77,5 %) al obtenido con concentraciones 1 % (w/v) de bicarbonato de sodio (NaHCO₃) calentado a 50 °C durante 20 min (Alvindhia, 2013). Estas comparaciones son interesantes dado que tanto SP como el bicarbonato de sodio están clasificadas como sustancias GRAS.

Los hallazgos del presente estudio demuestran que existe un efecto sinérgico entre los tratamientos térmicos (40 °C) y el SP. Considerando que el tratamiento de 90 mM de SP redujo 59,5 % la severidad de PC (Figura 3) y tomando en cuenta que este mismo tratamiento en combinación con agua caliente (40°C) presentó 77,41 % de reducción (Figura 3), entonces el tratamiento térmico redujo un 17,9 % la severidad de PC. El efecto del tratamiento con agua caliente es fungistático y no tiene acción residual para prevenir el desarrollo de hongos después del tratamiento (Alvindhia, 2012) y actúa directamente sobre la viabilidad de las esporas y su esporulación (Fallik, 2004).

Vidal *et al.* (2022) reportaron que una concentración 1,5 % de SP fue efectivo para reducir la incidencia de *C. brevisporum* en frutos de papaya cv. Maradol. La efectividad del tratamiento térmico en combinación con SP, como tratamiento preventivo de PC, fue similar al tratamiento curativo. Estudios previos mencionan que el tratamiento con agua caliente induce resistencia tisular del fruto que impacta en la reducción del crecimiento de patógenos (De Costa y Erabadupitiya, 2005; Dissanayake *et al.*, 2015).

Cuando se determinó el efecto del SP aplicado sólo o en combinación con bajas dosis de TBZ en tratamientos curativos contra la PC, el tratamiento combinado de SP a 90 mM con 225 ppm de TBZ

(SP+TBZ) no solo mejoró el control de la severidad (98,8 % de reducción de severidad), sino también de la incidencia (91,6 % de reducción de incidencia). Esto sugiere que existe un efecto de sinergia entre las dos sustancias, el SP aplicado sólo no redujo la incidencia de la PC; el tratamiento combinado fue mucho más efectivo que la dosis comercial de TBZ (450 ppm) y fue igual de efectivo a la dosis regional de TBZ (600 ppm). Al respecto, en papaya para el control de antracnosis, Vidal *et al.* (2022) no encontraron efecto sinérgico al aplicar SP+TBZ, como el mostrado para banano, en este estudio. Los resultados de la presente investigación sugieren que Cm posiblemente haya desarrollado algún grado de insensibilidad o resistencia a TBZ a dosis comercial (450 ppm) en el área de Cucuyulapa, Tabasco, y es probable que por esta razón el productor bananero de esta área incrementó la dosis de TBZ a 600 ppm, la cual es la dosis efectiva vigente en la región. Estudios previos han reportado resistencia a benzimidazol (grupo químico al que pertenece el TBZ) en aislados de *C. truncatum*, en el gen TUB-2 (Torres *et al.*, 2015), específicamente mutaciones del gen en varias especies de hongos (Downing, 2000). Mutaciones específicas en el gen TUB-2 de Cm pueden generar resistencia a fungicidas benzimidazoles. Estas mutaciones alteran la secuencia de aminoácidos de la proteína β -tubulina, reduciendo su afinidad de acoplamiento para benzimidazoles, permitiendo al hongo sobrevivir en presencia del fungicida (Leite *et al.*, 2020).

Estudios similares a este han reportado que las concentraciones de sólidos solubles y acidez titulable no se ven afectadas por tratamientos térmicos (Kapila *et al.*, 2015; Prasetia *et al.*, 2018; Vilaplana *et al.*, 2018), ni por tratamientos de SP (Nikagolla *et al.*, 2019). Así mismo, la firmeza del fruto y el peso del fruto en banano *Musa acuminata* cv. Gros Michel (Ummarat *et al.*, 2011) y bananas orgánicas *Musa acuminata* (Vilaplana *et al.*, 2018) no se afectan negativamente con el tratamiento térmico de 40°C. Por lo tanto, la apariencia y maduración de fruto del banano se puede mantener al emplear SP para el control de Cm en la postcosecha junto con el tratamiento térmico con agua caliente hasta 40 °C, y avanzar hacia estudios de calidad sensorial.

CONCLUSIONES

El SP inhibe eficazmente el crecimiento micelial de *C. musae in vitro* y muestra actividad protectora y curativa únicamente contra la severidad de PC con valores de 51,1 y 59,5 %, respectivamente, en experimentos *in vivo*. La temperatura de 40 °C incrementó la efectividad del SP. El tratamiento combinado de SP a 90 mM con dosis bajas de TBZ a 225 ppm fue altamente efectivo contra la PC, reduciendo tanto la incidencia como la severidad de la enfermedad con valores de 91,6 y 98,8 %, respectivamente, en tratamientos curativos. El SP no afecta la firmeza, pérdida de peso, peso de fruto, peso de cáscara, peso de pulpa, contenido de sólidos solubles totales, y acidez titulable de frutos del banano poscosecha.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación fue financiado por el Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. Vianey González Jiménez disfrutó de una beca predoctoral financiada por el “Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México” (CONACYT-219069-México).

LITERATURA CITADA

1. Alvindia, D.G., T. Kobayashi, K. Natsuaki y S. Tanda. 2004. Inhibitory influence of inorganic salts on banana postharvest pathogens and preliminary application to control crown rot. *Journal of General Plant Pathology* 70: 61-65.
2. Alvindia, D.G. 2012. Revisiting hot water treatments in controlling crown rot of banana cv. Buñgulan. *Crop Protection* 33: 59-64.
3. Alvindia, D.G. 2013. Improving control of crown rot disease and quality of pesticide-free banana fruit by combining *Bacillus amyloliquefaciens* DGA14 and hot water treatment. *European Journal of Plant Pathology* 136: 183-191.
4. AOAC international. 2005. AOAC Official Method 942.15. Acidity (Titratable) of Fruit Products. *Official method of Analysis*, ed. 18, 37, 10.
5. Bekker, T.F., C. Kaiser, R.V.D. Merwe y N. Labuschagne. 2006. *In-vitro* inhibition of mycelial growth of several phytopathogenic fungi by soluble potassium silicate. *South African Journal of Plant and Soil* 23: 169-172.
6. Budetic, M., D. Kopf, A. Dandic y M. Zamardzic. 2023. Review of characteristics and analytical methods for determination of thiabendazole. *Molecules* 28: 3926.
7. Buonaurio, R., M. Iriti y G. Romanazzi. 2009. Induced resistance to plant diseases caused by oomycetes and fungi. *Petria* 19: 130-148.
8. COFEPRIS. Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. 2025. Disponible: <https://siipris03.cofepris.gob.mx/Resoluciones/Consultas/ConWebRegPlaguici da.asp>.
9. Datnoff, L.E., K.W. Seebold y V.F.J. Correa. 2001. The use of silicon for integrated disease management: reducing fungicide applications and enhancing host plant resistance. In *Silicon in Agriculture*, ed. By Datnoff LE, Snyder GH and Korndorfer GH. *Studies in Plant Science* 8: 171-184.
10. De Costa, D.M. y H.R.U.T. Erabadupitiya. 2005. An integrated method to control postharvest diseases of banana using a member of the Burkholderia cepacia complex. *Postharvest Biology and Technology* 36: 31-39.
11. De Costa, D.M. y H.M.D.M. Gunawardhana. 2012. Effects of sodium bicarbonate on pathogenicity of *Colletotrichum musae* and potencial for controlling postharvest diseases of banana. *Postharvest Biology and Technology* 68: 54-63.
12. Dissanayake, P.K., M.L.M.C. Dissanayake y W.M.A.U.M. Wijesekara. 2015. Effect of hot water treatment on postharvest life of Seeni Kesel Banana (*Musa spp.* cv. Seeni Kesel-Pisang Awak, ABB). *Journal of Agriculture and Ecology Research International* 2: 209-218.
13. Downing, K.H. 2000. Structural basis for the action of drugs that affect microtubule dynamics. *Emerging Therapeutic Targets* 4: 219-237.

14. Edson, A.P., A.P. Adélia-Aziz y D.S.B. Deila-Magna. 2015. Silicon in plant disease control. Revisao de literature. Revista Ceres Viçosa 62: 323-331.
15. Fallik, E. 2004. Prestorage hot water treatments (immersion, rinsing and brushing). Postharvest Biology and Technology 32: 125-134.
16. Fatemi, S., M. Jafarpoury y H. Borji. 2011. Postharvest application of heat treatments and thibendazole, sodium bicarbonate fungicides on decay control and characteristics quality and quantity in the "Valencia" orange. African Journal of Agricultural Research 6: 2420-2424.
17. Gatto, M.A., A. Ippolito, V. Linsalata, N.A. Cascarano, F. Nigro, S. Vanadia y D.D. Venere. 2011. Activity of extracts from wild edible herbs against postharvest fungal diseases of fruits and vegetables. Postharvest Biology and Technology 61: 72-82.
18. González-Jiménez, V., P.A. Moscoso-Ramírez, C.F. Ortíz-García, S. Sánchez-Soto y F.M. Lara-Viveros. 2024. Control of Crown rot with potassium carbonate in banana cv. Enano Gigante. Plant Pathology 73(4): 873-883.
19. González-Jiménez V., P.A. Moscoso-Ramírez, C.F. Ortíz-García, S. Sánchez-Soto, y F.M. Lara-Viveros. 2023. Preventive and curative antifungal activity of the sodium silicate on postharvest Crown rot in banana cv. Enano Gigante. Silicon 15: 6683-6693.
20. Goswami, R., A. Bhattacharyya y P. Dutta. 2020. Nanotechnological approach for management of anthracnose and crown rot diseases of banana. Journal of Mycology and Plant Pathology 50: 335-346.
21. Guo, Y., L. Liu, J. Zhao y Y. Bi. 2007. Use of silicon oxide and sodium silicate for controlling *Trichothecium roseum* postharvest rot in Chinese cantaloupe (*Cucumis melo* L.). International Journal of Food Science and Technology 42: 1012-1018.
22. Jahan, Md. S., R.S. Lia, Md. E.K. Chowdhury, Md. F. Hasan, Md. A. Islam, B. Sikdar y Md. Khalekuzzaman. 2019. Characterization of crown rot disease of banana fruit and eco-friendly quality improvement approach during storage. Microbiology Research Journal International 27: 1-13.
23. Kapila, D.P., D.M.L.M. Chandrika y W.M.A.U.M. Wijesekara. 2015. Effect of hot water treatments on postharvest life of seeni kesel banana (*Musa spp.cv.* Seeni Kesel-Pisang Awak, ABB). Journal of Agriculture and Ecology Research International 2: 209-218.
24. Khan, S.H., J. Aked, y N. Magan. 2001. Control of the anthracnose pathogen of banana (*Colletotrichum musae*) using antioxidants alone and in combination with thiabendazole or imazalil. Plant Pathology 50: 601-608.
25. Krauss, U. y A. Johanson. 2000. Recent advances in the control of crown rot of banana in the Windward Islands. Crop Protection 19: 151-160.
26. Lassois, L. y L. Bellaire. 2014. Crown rot disease of bananas. In: Bautista-Baños, S. (Ed.). Postharvest Decay. Control Strategies. Academic Press. California, U.S.A. pp. 103-130.
27. Lassois, L., L. Bellaire y M.H. Jijakli. 2008. Biological control of crown rot of bananas with *Pichia anomala* strain K and *Candida oleophila* strain O. Biological Control 45: 410-418.
28. Leite, I.C.H.L., R.A. Silva, J.E.C.C. Santos, R.L. Freita-Lopes, M.P.S. Câmara, S.J. Michereff y U.P. Lopes. 2020. Analysis of *Colletotrichum musae* populations from Brazil reveals the presence of isolates with high competitive ability and reduced sensitivity to postharvest fungicides. Plant Pathology 69: 1529-1539.
29. Liu, J., Y.Y. Zong, G.Z. Qin, B.Q. Li y S.P. Tian. 2010. Plasma membrane damage contributes to antifungal activity of silicon against *Penicillium digitatum*. Current Microbiology 61: 274-279.
30. Mirshekari, A., P. Ding, J. Kadir y H.M. Ghazali. 2012. Effect of hot water dip treatment on postharvest anthracnose of banana var. *Berangan*. African Journal of Agricultural Research 7: 6-10.

31. Moscoso-Ramírez, P. y L. Palou. 2014. Control de las podredumbres verde y azul en naranjas mediante tratamientos de poscosecha con silicato potásico. *Levante Agrícola* 422: 179-184.
32. Nikagolla, N.G.D.N., M.Y. Udugala-Ganehenege y W.A.M. Daundasekera. 2019. Postharvest application of potassium silicate improves keeping quality of banana. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 94: 735-743.
33. Perera, A.N. y A.M. Karunaratne. 2002. Postharvest calcium chloride treatments do not help to increase shelf life of bananas. *Fruits* 57: 87-94.
34. Prasetia, H.A., L. Panjaitan, W. Salbiah y D.A. Setiabudi. 2018. The role of hot water treatment and chitosan coating in controlling a latent infection of *Colletotrichum musae* on banana var. Mas kirana. *Asian Journal of Agriculture and Biology* 6: 576-586.
35. Ranasinghe, L.S., B. Jayawardena y K. Abeywickrama. 2003. Use of waste generated from cinnamon bark oil (*Cinnamomum zeylanicum* Blume) extraction as a postharvest treatment for Embul banana. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 1: 340-344.
36. Silva, L.M., M.G. Barbosa, M.B. Fernandes y R.C.F. Ribeiro. 2016. Progreso temporal e controle da antracnose em banana no semiárido Norte Mineiro. *Revista Brasileira de Fruticultura* 38: 81-91.
37. Torres-Calzada, C., R. Tapia-Tussell, I. Higuera-Ciapara, R. Martin-Mex, A. Nexticapan-Garcez y D. Perez-Brito. 2015. Sensitivity of *Colletotrichum truncatum* to four fungicides and characterization of thiabendazole resistant isolates. *Plant disease* 99: 1590-1595.
38. Ummarat, N., T.K. Matsumoto, M.M. Wall y K. Seraypheap, K. 2011. Changes in antioxidants and fruit quality in hot water-treated 'Hom Thong' banana fruit during storage. *Scientia Horticulturae* 130: 801-807.
39. Vidal-Vergara, A., P.A. Moscoso-Ramírez, R. García-De la Cruz y N. Landero-Valenzuela. 2022. Antifungal effect of silicon against anthracnose on fruit in papaya maradol. *Silicon* 14: 8243-8254
40. Vilaplana, R., G. Hurtado y S. Valencia-Chamorro. 2018. Hot water dips elicit disease resistance against anthracnose caused by *Colletotrichum musae* in organic bananas (*Musa acuminata*). *LWT- Food Science and Technology* 95: 247-254.

