



Efecto de una mezcla de polímeros de quitosano en plantas de tomate (*Solanum lycopersicom* L.)

Effect of a chitosan polymers mixture in tomato plants (*Solanum lycopersicom* L.)

^{ID}Donaldo Morales-Guevara*, ^{ID}José Dell' Amico-Rodríguez, ^{ID}Eduardo Jerez-Mompie,
^{ID}Lilisbet Guerrero-Domínguez, ^{ID}Arasay Santa Cruz-Suárez

Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), carretera San José-Tapaste, km 3½, Gaveta Postal 1, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. CP 32 700

RESUMEN: Con el objetivo de evaluar el efecto de una mezcla de polímeros de quitosano en plantas de tomate (*Solanum lycopersicom* L.), se realizó el presente trabajo en el que se utilizaron diferentes dosis y momentos de aplicación del bioestimulante. Se emplearon semillas del cultivar Amalia sembradas en semilleros y, posteriormente, trasplantadas en el campo a una distancia de 0,25 m entre plantas y a 1,20 m entre hileras. Las aplicaciones de quitosano se realizaron en tres momentos del ciclo del cultivo, a los siete-ocho días posteriores al trasplante, al inicio de la floración y la combinación de ambos momentos, con la mitad de las dosis totales en cada momento. Las dosis utilizadas fueron 200, 400 y 600 mg ha⁻¹ y un control sin bioestimulante, lo que dio lugar a diez tratamientos. Se evaluaron: la longitud y el diámetro de los tallos; la masa seca de la parte aérea; la superficie foliar; el número de frutos por planta; la masa fresca de los frutos y el rendimiento por planta. La aplicación de una mezcla de polímeros de quitosano en el período de inicio de la floración incrementó la acumulación de materia seca, la superficie foliar, la formación de mayor número de frutos y el rendimiento de las plantas.

Palabras clave: bioestimulantes, crecimiento, rendimiento, superficie foliar.

ABSTRACT: In order to evaluate the effect of a chitosan polymers mixture in tomato plants (*Solanum lycopersicom* L.), the present work was carried out in which different doses and moments biostimulant application were used. To do this, Amalia variety seeds sown in seed beds and later transplanted in the field at a distance of 0.25 m between plants and 1.20 m between rows were used. Polymers mixture of chitosan applications were made at two moments of the crop cycle, seven-eight days after transplantation and at the beginning off lowering, using the doses of 200, 400 and 600 mg ha⁻¹ in each of the moments mentioned above, there were also three treatments in which the previous doses were applied in equal parts in the two moments studied, and a control without bioestimulant made room for ten treatments. The length and diameter stem, dry mass of the aerial part, leaf surface, average number of fruits and fruit mass, and the yield per plant were evaluated. From the results obtained, it was possible to conclude that the polymers mixture of chitosan application in the start period of the flowering, increased the accumulation of dry matter, the leaf surface, the formation of a bigger fruits number and yield of tomato plants.

Key words: biostimulant, growth, yield, leaf surface.

INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicom* L.) es una planta herbácea de cultivo anual, tanto en condiciones de campo abierto como de cultivo protegido (1). Es una de las hortalizas más importantes y populares a nivel mundial, por su alto potencial de rendimiento y adecuada adaptabilidad al medio, siendo China, la India, Turquía y Estados Unidos los principales productores (2).

En Cuba, representa el 50 % del área total dedicada a las hortalizas y la producción oscila alrededor de los 750 000 t; sin embargo, los rendimientos registrados en varias áreas productivas del país son bajos debido, entre algunas causas, a las desfavorables condiciones edafoclimáticas que prevalecen, la falta de insumos y la escasez de alternativas para garantizar las exigencias del cultivo (3).

*Autor para correspondencia: dmorales@inca.edu.cu

Recibido: 05/08/2021

Aceptado: 05/11/2021



La búsqueda de nuevas alternativas que permitan hacer un uso más racional de los recursos, disminuir los costos de producción sin afectar la calidad y los rendimientos de los cultivos, ha propiciado el uso de bioestimulantes del crecimiento de uso agrícola (4).

El uso de bioestimulantes naturales para la agricultura ha sido considerado una alternativa segura por sus significativos resultados, sobre todo, ante el encarecimiento de la producción agrícola y los desafíos de la sustentabilidad, garantizando altos rendimientos sin afectar su calidad (5).

El quitosano es un bioestimulante natural que ha sido muy estudiado en muchas especies vegetales, incluyendo cereales, ornamentales, los cultivos de frutas y medicinales. Las respuestas han sido muy diversas, dependiendo de la estructura y la concentración de las moléculas empleadas, las especias y el estado de desarrollo de la planta (6).

Diversos han sido los estudios realizados utilizando el quitosano con diferentes fines, así se pueden señalar algunos ejemplos con resultados muy favorables, como han sido los relacionados con la conservación de alimentos (7); la conservación de frutos almacenados en frío, en los que no se han encontrado modificaciones en su composición bioquímica y en su actividad antioxidante (8); en el recubrimiento de frutos para su conservación (9); en la inducción de mecanismos de defensa de las plantas ante enfermedades (10); en el tratamiento a semillas para la obtención de posturas (11) y en aplicaciones foliares para reducir la incidencia de fisiopatías en los frutos, lo que además, provocó un incremento de su actividad antioxidante (12), entre otros.

Teniendo en cuenta lo antes señalado y la necesidad de utilizar tecnologías que permitan incrementar las producciones agrícolas, mediante la utilización de técnicas y productos que no agredan al medio ambiente y no afecte la salud de las personas, se realizó el presente trabajo, con el objetivo de evaluar el efecto de una mezcla de polímeros de quitosano en plantas de tomate (*Solanum lycopersicom* L.).

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la finca experimental del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), en suelo Ferralítico rojo éutrico compactado (13). Para ejecutar el trabajo se utilizaron semillas del cultivar Amalia, plantadas a una distancia de 0,25 m entre plantas y a 1,20 m entre hileras.

Se emplearon tres dosis de una mezcla de polímeros de quitosano (Quitomax®), las que se aplicaron en tres momentos durante el desarrollo del cultivo. Los tratamientos evaluados fueron:

- Control sin aplicación de producto
- 200 mg ha⁻¹ a los 7-8 días posteriores al trasplante
- 400 mg ha⁻¹ a los 7-8 días posteriores al trasplante
- 600 mg ha⁻¹ a los 7-8 días posteriores al trasplante
- 200 mg ha⁻¹ al inicio de la floración

- 400 mg ha⁻¹ al inicio de la floración
- 600 mg ha⁻¹ al inicio de la floración
- 100 mg ha⁻¹ a los 7-8 días y 100 mg ha⁻¹ al inicio de la floración
- 200 mg ha⁻¹ a los 7-8 días y 200 mg ha⁻¹ al inicio de la floración
- 300 mg ha⁻¹ a los 7-8 días y 300 mg ha⁻¹ al inicio de la floración

Los diferentes tratamientos fueron distribuidos en el campo, de acuerdo a un diseño de bloques al azar, con cuatro repeticiones. Las parcelas contaron con diez surcos de 10 m de largo, para las evaluaciones se utilizaron 10 plantas por parcela tomadas al azar, lo que dio lugar a una muestra de 40 plantas por tratamiento. Los datos presentados corresponden a las medias de dos años.

A los 20 días posteriores a la última aplicación, se evaluaron las variables longitud y grosor de los tallos; la masa seca de la parte aérea y la superficie foliar por planta y, al momento de la recolección, el número de frutos por planta; la masa fresca de los frutos y se estimó el rendimiento en base a la masa fresca.

Las labores culturales y fitosanitarias se realizaron de acuerdo a lo planteado en las guías técnicas para el cultivo del tomate.

La eficiencia del bioestimulante en el número de frutos, la masa fresca de los frutos, la superficie foliar y el rendimiento por planta se estimó como el incremento en porcentaje de los valores alcanzados por la variable en cada tratamiento, respecto al valor mostrado por el control (14).

Para el procesamiento de los datos se utilizó el Programa estadístico SPSS 19.0 para Windows, las medias se compararon mediante la prueba de rangos múltiples de Tukey y para graficar los resultados se utilizó el Programa SIGMA PLOT 11.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis estadístico de los diferentes indicadores evaluados no mostró interacción entre los factores en estudio.

En la **Tabla 1** se expone el análisis de las diferentes variables de crecimiento evaluadas.

Al analizar la respuesta de las plantas tratadas en diferentes momentos de su ciclo biológico, se encontró que el producto favoreció ligeramente el crecimiento en longitud de los tallos, con diferencias entre las plantas tratadas y el control, mientras que el diámetro de los tallos no mostró diferencias entre las plantas tratadas con el producto y las no tratadas.

La respuesta mostrada por las plantas en cuanto al comportamiento de la longitud y el diámetro de los tallos, al parecer, es característica de las plantas, al menos, cuando se utilizan dosis bajas como las empleadas en este trabajo, resultados de la aplicación del producto al inicio de la floración, respecto a la aplicación posterior al trasplante y al control, lo que concuerdan con los informados en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.) y en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) (15,16).

Tabla 1. Efecto de una mezcla de polímeros de quitosano en la longitud y grosor de los tallos (cm), la masa seca de la parte aérea (g) y la superficie foliar (cm²) de plantas de tomate

Tratamientos	Longitud tallos	Grosor de los tallos	Masa seca aérea	Superficie foliar
Momentos				
Control sin aplicación	53,06 b	0,95	6,13 d	1480,15 d
A los 7-8 días posteriores al trasplante	55,63 a	0,92	6,77 c	1693,38 c
Al inicio de la floración	56,19 a	0,93	7,06 b	1722,13 b
A los 7-8 días posteriores al trasplante y al inicio de la floración	56,29 a	0,94	7,68 a	1978,95 a
Es:	0,733*	0,019	0,062**	29,40**
Dosis				
Control sin aplicación	53,06 b	0,95	6,13 b	1480,15 b
200 mg ha ⁻¹	55,83 a	0,91	7,16 a	1768,52 a
400 mg ha ⁻¹	56,08 a	0,95	7,16 a	1810,65 a
600 mg ha ⁻¹	56,19 a	0,93	7,19 a	1815,28 a
ES	0,733*	0,019	0,125*	46,92*

Por otra parte, el análisis del comportamiento de la acumulación de materia seca en la parte aérea y la superficie foliar sí mostraron diferencias altamente significativas entre todos los tratamientos, con los mejores resultados en aquellos que recibieron el producto al inicio de la floración, respecto a la aplicación posterior al trasplante y al control.

El comportamiento de la superficie foliar puede estar asociado con la emisión de un mayor número de hojas, aspecto que ha sido señalado por otros autores, a partir de que encontraron una respuesta similar cuando realizaron varias aplicaciones foliares de este producto (17,18).

Este comportamiento similar manifestado por la masa seca de la parte aérea y la superficie foliar, se puede explicar por la mayor capacidad fotosintética que tienen las plantas con mayor superficie foliar, toda vez que es en las hojas donde se encuentran los centros receptores capaces de captar la luz que posibilita la realización del proceso fotosintético, que da lugar a la acumulación de materia seca en los diferentes órganos de las plantas.

Al respecto, se ha planteado que el comportamiento de la superficie foliar permite determinar el estado nutricional de la planta, su crecimiento, la capacidad para absorber el carbono, la tasa de transpiración, el uso eficiente del agua y la conversión de fotoasimilados (19).

Por la respuesta mostrada por las plantas cuando el bioestimulante se aplicó al inicio de la floración se confirma lo plantado en relación con que la respuesta de las plantas está relacionada, entre otros aspectos, con el momento en que se realiza la aplicación del quitosano (5).

Otros autores han referido un incremento del crecimiento vegetativo, como respuesta a la aplicación foliar de quitosano (20), al igual que en la calidad de las posturas de tomate, con tratamientos a las semillas antes de la siembra (11).

Resultó interesante el hecho de que las plantas respondieron de la misma forma con las diferentes dosis de producto aplicados, sin diferencia entre ellas, aunque demostrando un efecto positivo respecto a las plantas no tratadas

Esta respuesta permite sugerir que, solo basta con una pequeña dosis de estos polímeros para transmitir la señal que desencadena el proceso de crecimiento y, quizás, algunos otros que no han sido evaluados en este trabajo.

En la Figura 1 se presentan las variables número y masa de los frutos, como los componentes principales que determinan el rendimiento de las plantas de tomate. Se encontró que el número de frutos fue la variable que más influyó en el incremento del rendimiento.

En ambas variables, los tratamientos que fueron asperjados con el bioestimulante mostraron valores superiores a los del tratamiento control (sin bioestimulante). También, se observó que la masa de los frutos no mostró diferencias entre los tratamientos en los que se aplicó el bioestimulante, tanto entre los momentos en que se aplicó como entre las dosis utilizadas.

En el caso del número de frutos, sí se pudo distinguir un incremento significativo de ellos, de acuerdo al momento en que se aplicó el bioestimulante, con los mayores valores cuando las aplicaciones coincidieron con el inicio de la floración; mientras que, las dosis utilizadas solo mostraron superioridad respecto a las plantas que no fueron tratadas con el bioestimulante.

La aspersión del bioestimulante al inicio de la floración parece indicar que su adición en ese momento desencadena una serie de eventos fisiológicos y bioquímicos que contribuyeron al incremento del número de frutos, lo que permite señalar que este componente es el que, en mayor medida, influyó en el aumento del rendimiento de las plantas.

Una característica bastante frecuente cuando se aplican fitohormonas, es que la percepción de señales del ambiente, por parte de los vegetales, puede ser inductiva, es decir, se producen aun cuando el estímulo-símbolo haya desaparecido o tiene carácter sistémico.

Este comportamiento conlleva a sugerir que la respuesta está mediatizada por algunas sustancias sintetizadas, en pequeña cantidad, por el metabolismo secundario de algunas células/tejidos que pueden actuar en otras partes de la planta (21).

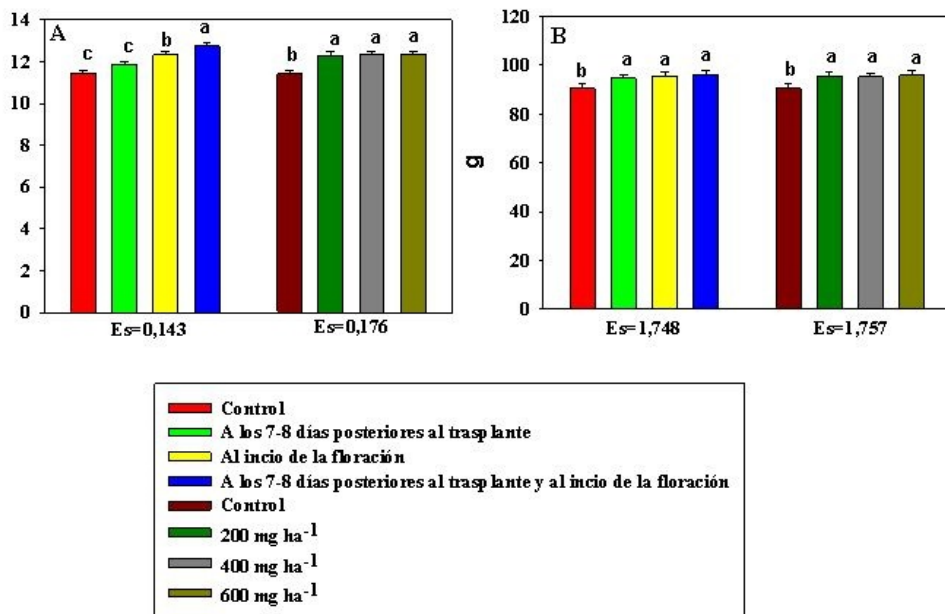


Figura 1. Efecto de una mezcla de polímeros de quitosano en el número (A) y la masa de los frutos (B) de plantas de tomate

Al respecto, en estudios realizados con otros cultivos, se ha informado un mayor crecimiento de las plantas, expresado por el mayor número de hojas y una mayor cantidad de frutos por planta, lo que conllevó a un incremento de los rendimientos; además, se señaló que este incremento del rendimiento no implicó alteraciones en el contenido de clorofilas, ni en la calidad de las frutas (20).

En la Figura 2, se presenta el efecto de una mezcla de polímeros de quitosano en el rendimiento promedio por planta. Se obtuvo un comportamiento concordante con el de los componentes del rendimiento analizado.

Se detectó que las plantas de todos los tratamientos que recibieron la aplicación del bioestimulante mostraron valores superiores y significativos, en relación con las plantas no tratadas. Las plantas que recibieron el producto incrementaron significativamente su rendimiento respecto a aquellas que no fueron tratadas con el bioestimulante.

De igual forma, se observó que no hubo respuesta diferenciada entre las plantas tratadas con las diferentes dosis utilizadas, lo que indicó que no se requieren grandes dosis de estos polímeros para transmitir el impulso necesario, para desencadenar los procesos fisiológicos y bioquímicos que dan lugar a las diferentes manifestaciones de las plantas.

El análisis del comportamiento de las plantas al ser asperjadas con la mezcla de estos polímeros, en diferentes momentos de su ciclo biológico, mostró un incremento altamente significativo entre ellos, con una respuesta destacada cuando las aplicaciones se realizaron al inicio de la floración, lo que indicó que la adición del bioestimulante en este momento del desarrollo de las plantas, actúa en las características genético-fisiológicas que determinan la respuesta de esta variable.

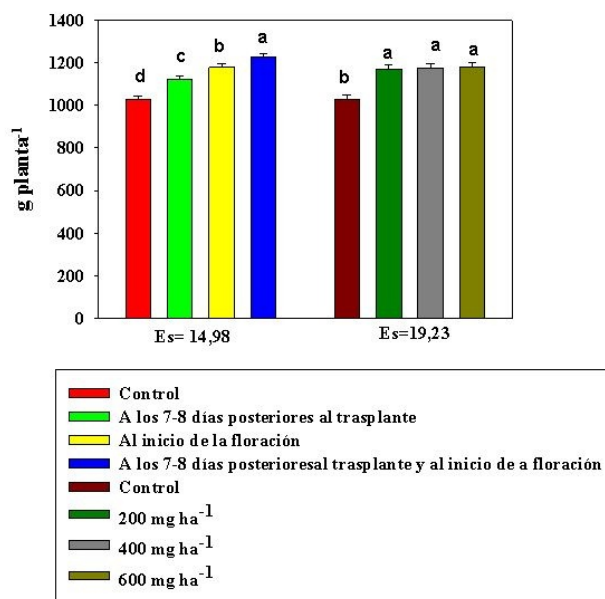


Figura 2. Efecto de una mezcla de polímeros de quitosano en el rendimiento estimado (g planta⁻¹) de plantas de tomate

Al valorar la respuesta de esta variable, se pudo demostrar que su comportamiento está determinado por el mayor número de frutos por planta, resultados que concuerdan con los obtenidos en otros cultivos (5,22) y que también han sido encontrados al comparar la respuesta del cultivo del tomate a la adición del bioestimulante, mediante aspersiones foliares en diferentes momentos del desarrollo de las plantas (23).

El análisis de la eficiencia del producto (Tabla 2) en las variables número de frutos, masa fresca de los frutos, superficie foliar y el rendimiento de las plantas (14) mostró

Tabla 2. Efecto de una mezcla de polímeros de quitosano en la eficiencia (%) del número y la masa de los frutos, la superficie foliar y el rendimiento de plantas de tomate

Tratamientos	Número de frutos	Masa de los frutos	Superficie foliar	Rendimiento
Momentos				
A los 7-8 días posteriores al trasplante	5	-3	10	14
Al inicio de la floración	6	-2	15	16
A los 7-8 días posteriores al trasplante y al inicio de la floración	6	-1	25	34
Dosis				
200 mg ha ⁻¹	5	-4	17	19
400 mg ha ⁻¹	6	0	17	22
600 mg ha ⁻¹	6	-2	17	23

la mayor eficiencia en el rendimiento y en la superficie foliar, principalmente, cuando el producto se aplicó en diferentes momentos del ciclo biológico de las plantas, con incrementos que variaron entre el 10 y el 25 % de la superficie foliar y del 14-34 % del rendimiento.

Por otra parte, al analizar el comportamiento de estas variables en función de las dosis de bioestimulante aplicadas, se pudo comprobar el efecto beneficioso del producto en la formación de una mayor superficie foliar y del rendimiento, aunque las diferencias en ambas variables no resultaron muy diferentes entre ellas.

De igual forma, se observó muy poco efecto de los factores estudiados en el aumento del número de frutos por planta, mientras que la masa de los frutos no se favoreció en ninguna de las variantes estudiadas.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados encontrados, se puede concluir que la aplicación de una mezcla de polímeros de quitosano, en el período de inicio de la floración, favorece la acumulación de materia seca, la superficie foliar, la formación de un mayor número de frutos y el rendimiento de plantas de tomate, lo que permite sugerir que la aplicación de este bioestimulante se realice al inicio de la floración.

BIBLIOGRAFÍA

- Costa MJ, Heuvelink E. The global tomato industry. 2018. pp. 1-26. In: Heuvelink, E. (ed.). Tomatoes. 2nd ed. CABI, Boston, MA. doi: [10.1079/9781780641935.0001](https://doi.org/10.1079/9781780641935.0001)
- FAO. FAOSTAT database for production crops. 2020. [cited 07/07/2021]; Available from: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Terry E, Falcon A, Ruiz Y, Morales D. Respuesta agronómica del cultivo de tomate al bioproducto QuitoMax®. Cultivos Tropicales. 2017;38(1):147-154.
- Jerez E, Martín R, Morales D, Reynaldo I. Efecto de oligosacarinas en el comportamiento de la papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad Romano. Cultivos Tropicales. 2017;38(1):68-74.
- Du Jardin P. Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. Sci. Hortic. 2015;196:3-14. Available from: <https://doi.org/10.1016/J.scienta.2015.09.021>
- Rath Pichyangkura A, Supachitra Chadchawan. Biostimulant activity of chitosan in horticulture, Scientia Horticulturae. 2015;196:49-65 Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.0310304-4238/2015>
- Ruíz S, Valenzuela CC, Chaparro, S, Ornelas JJ, Del Toro CL, Márquez E, López MA, Ocaño VM, Valdez S. Effects of chitosan-tomato plant extract edible coatings on the quality and shelf life of chicken fillets during refrigerated storage, Food Science and Technology. 2019;39(1):103-111. Available from: <https://doi.org/10.1590/fst.23117>
- Zahran AA, Hassanein RA., AbdelWahab AT, Effect of chitosan on biochemical composition and antioxidant activity of minimally processed 'Wonderful' pomegranate arils during cold storage. J. Appl. Bot. Food Qual. 2015;88:241-248.
- Candir E, Ozdemir AE, Aksoy MC. Effects of chitosan coating and modified atmosphere packaging on postharvest quality and bioactive compounds of pomegranate fruit cv. 'Hicaznar'. Sci. Hortic. 2018;235:235-243. doi: [10.1016/J.scienta.2018.03.017](https://doi.org/10.1016/J.scienta.2018.03.017)
- Swarnendu Ch, Chakraborty N, Panda K, Acharya K, Chitosan induced immunity in *Camellia sinensis* (L) O. Kuntze against blister blight disease is mediated by nitric oxide. Plant Physiology and Biochemistry. 2017;115:298-307. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.04.008>
- González LG, Paz-Martínez I; Boicet-Fabré T, Jiménez-Arteaga MC, Falcón-Rodríguez A, Rivas-García T. Efecto del tratamiento de semillas con QuitoMax® en el rendimiento y calidad de plántulas de tomate variedades ESEN y L-43. Terra Latinoamericana. 2021;39:1-6. Available from: <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.803>
- Griñán I, Morales D, Collado J, Falcón AB, Torrecillas A, MJ. Martín MJ, Centeno A, Corell M, Carbonell-Barrachina AA, Hernández F. Reducing incidence of peel physiopathies and increasing antioxidant activity in pomegranate fruit under different irrigation conditions by preharvest application of chitosan, Scientia Horticulturae. 2019;247:247-253 Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.12.017>

13. Hernández A, Pérez J, Bosch D, Castro N. Clasificación de los suelos de Cuba. Ediciones INCA, Mayabeque: Cuba, 2015, 93 p.
14. Algam S, Xie G, Li B, Yu S, Su T, Larsen J. Effects of *Paenibacillus* strains and chitosan on plant growth promotion and control of Ralstonia wilt in tomato. *J. Plant Pathol.* 2010;92(3):593-600. Available from: <https://www.jstor.org/stable/41998847>
15. Morales D, Torres LL, Jerez E, Falcón A, Dell'Amico J. Efecto del Quitomax en el crecimiento y rendimiento del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.). *Cultivos Tropicales.* 2015;36(3):133-143.
16. Morales D, Dell'Amico J, Jerez E, Díaz Y, Martín R. Efecto del QuitoMax® en el crecimiento y rendimiento del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) *Cultivos Tropicales.* 2016;37(1):142-147.
17. Mondal MMA, Malek MA, Puteh AB, Ismail MR, Ashrafuzzaman M, Naher L. Effect of foliar application of chitosan on growth and yield in okra. *Aust. J. Crop Sci.* 2012, 6:918-921.
18. Sathiyabama M, Bernstein N, Anusuya S. Chitosan elicitation for increased curcumin production and stimulation of defence response in turmeric (*Curcuma longa* L.). *Industrial Crops and Products.* 2016;89:87-94. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.05.0070926-6690/©2016>.
19. Vallejos B, Ponce D, Heinrich P, Doll U. Área y biomasa foliar total de *Nothofagus glauca* (Phil) Krasser en zona Andina, Región del Maule, Chile. *Colombia Forestal.* 2019;22(2):5-14. Available from: <https://doi.org/10.14483/2256201.14312>
20. El-Miniawy SM, Ragab M E, Youssef SM, Metwally AA. Response of strawberry plants to foliar spraying of chitosan. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences.* 2013;9(6):366-372.
21. Bottini A. FITOHORMONAS ¿Cómo interpretan las plantas las señales del ambiente? *Anales de la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria - 2017, Tomo LXX.* 118-124p.
22. Rodríguez AT, Miguel Á, Ramírez MA, Falcón A, Bautista S, Ventura E, Valle Y. Efecto del Quitomax® en el rendimiento y sus componentes del cultivar de arroz (*Oryza sativa* L.) var. INCA LP 5. *Cultivos Tropicales.* 2017;38(4):156-159.
23. Rouphael Y, Colla G, Giordano M, El-Nakhel Ch, Kyriacou MC, De Pascale S. Foliar applications of a legume-derived protein hydrolysate elicit dose dependent increases of growth, leaf mineral composition, yield and fruit quality in two greenhouse tomato cultivars. *Scientia Horticulturae.* 2017;226:253-260. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2017.09.007>