

La quitina y sus derivados, biopolímeros con potencialidades de aplicación agrícola

✉ Miguel Á Ramírez¹, Aida T Rodríguez¹, Luis Alfonso², Carlos Peniche³

¹Estación Experimental del Arroz, Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, INCA
Carretera a La Francia Km 1½, CP 22900, Los Palacios, Pinar del Río, Cuba

²Centro Nacional de Investigaciones Científicas, CNIC
Ave. 25 e/ 158 y 190, Cubanacán, CP 10600, Playa, Ciudad de La Habana, Cuba

³Centro de Biomateriales
Ave. Universidad S/N e/ G y Ronda, CP 10400, Ciudad de La Habana, Cuba
E-mail: miguelar@inca.edu.cu

RESUMEN

La quitina es un polímero biodegradable muy abundante en la naturaleza, que se obtiene fundamentalmente del exoesqueleto de los crustáceos, y del que mucho se ha escrito por sus potencialidades de aplicación en la agricultura. Ella y sus derivados son efectivos en el control de enfermedades y plagas vegetales. Sus mecanismos de acción están vinculados a su estructura química. Pueden actuar sobre el organismo patógeno, o inducir mecanismos defensivos en las plantas, contra varias enfermedades vegetales antes y después de la cosecha. La adición de quitina y sus derivados al suelo, favorece el crecimiento y la actividad de muchos organismos quitinolíticos, por un efecto sinérgico. Estos constituyen controles biológicos y enemigos naturales de muchos agentes causales de enfermedades y plagas vegetales. Además, favorecen el crecimiento y desarrollo de microorganismos beneficiosos que establecen relaciones simbióticas con las plantas, tales como las micorrizas o especies del género *Rhizobium*. A su vez, incrementan la población y la actividad microbiana en el suelo, lo que mejora la disposición de nutrientes y sus propiedades. Como reguladores del crecimiento, aceleran la germinación de las semillas, el vigor de las plantas, y el rendimiento agrícola. Por tanto, por su gran potencial de aplicación en la agricultura, se augura que se utilizarán con una mayor extensión, principalmente como sustitutos de los actuales plaguicidas químicos o como reguladores del crecimiento de las plantas.

Palabras clave: quitina, agricultura, biopolímero, regulador del crecimiento, control biológico

Biotecnología Aplicada 2010;27:262-269

ABSTRACT

Chitin and its derivatives as biopolymers with potential agricultural applications. Chitin is a biodegradable polymer widely spread in nature. It is mainly obtained from crustacean shells. Chitin and its derivatives have shown to be effective in controlling plagues and plants diseases. Their mechanism of action is strongly linked to their chemical structures. These mechanisms can result from the direct action on the pathogen or can be a consequence of its capacity to induce defensive mechanisms on plants. In any case, the effect is their protection against various vegetable diseases, before and after harvest. The addition of chitin and its derivatives to the soil favours the growth and activity of many chitinolytic organisms that constitute biological controls and are natural enemies of many agents responsible for vegetable plagues and diseases, generating a synergistic effect. On the other side, these biopolymers also favour the growth and development of beneficial microorganisms that establish synergistic relationships with plants, such as mycorrhizas or *Rhizobium* species. On top of that, increasing the microbial population and activity in the soil improves the properties of nutrients and their availability. As growth regulators, it has been established that these biopolymers accelerate seeds germination, the ability of plants to grow as well as the agricultural yield. It is concluded that chitin and its derivatives have great potential for applications in agriculture. It is foreseen that in the future these biopolymers will be used in greater extension, mainly for substituting actual chemical pesticides or as growth regulators.

Keywords: chitin, agriculture, biopolymer, growth regulator, biological control

Introducción

El uso de productos bioactivos compatibles con el medio ambiente es uno de los principales retos de la agricultura moderna. En ese sentido, la aplicación de la quitina y sus derivados representa una alternativa promisoriosa, por su naturaleza, su actividad biológica y la facilidad de obtención.

Numerosos estudios demuestran los mecanismos de acción y la eficiencia de estos principios activos en la agricultura, fundamentalmente estudios de laboratorio y en ambientes controlados. Sin embargo, no abundan las investigaciones de campo ni la repetición de los resultados, sobre todo en investigaciones destinadas a introducir tecnologías de aplicación de estos derivados en condiciones de producción. Ello se debe,

entre otras razones, a que esta información está dispersa, y en muchos casos carece de detalles teóricos y prácticos que permitan reproducirla. En este artículo se abordan estos detalles de investigaciones dentro y fuera de Cuba, tras la aplicación de la quitina y sus derivados en la agricultura, con el objetivo de propiciar investigaciones que conduzcan a la introducción efectiva de estos bioproductos en la agricultura cubana.

Características generales de la quitina y sus derivados

La quitina es el segundo polisacárido más abundante de la naturaleza, solo superada por la celulosa. Este biopolímero tiene una elevada tasa de regeneración

natural, pues se estima que al menos 1×10^9 toneladas de quitina se sintetizan y degradan cada año en la biosfera [1]. Esta sustancia forma parte de las estructuras celulares de hongos [2], bacterias [3], insectos [4], arácnidos [5], crustáceos [6], nemátodos [7] y de organismos invertebrados, como anélidos, moluscos, cefalópodos, hemicordados, entre otros [8].

La quitina pura es un sólido blanco, parcialmente cristalino, inodoro e insípido. Está compuesto por aminoazúcares unidos entre sí por enlaces glicosídicos $\beta(1 \rightarrow 4)$, que forman una cadena lineal de unidades de N-acetil-2-amino-2-desoxi-D-glucosa, algunas de las cuales, desacetiladas [9]. La quitina tiene una estructura muy similar a la celulosa. La diferencia estriba en que el carbono 2 contiene un grupo hidroxilo en la celulosa y un grupo acetamida en la quitina (Figura).

Otras características importantes de este bioproducto de naturaleza polimérica es su elevada masa molecular, además de su estructura porosa que le permite absorber mucha agua [10].

Según la fuente de obtención y el método de preparación, las características de la quitina varían. Por ello se trabaja en el perfeccionamiento de los métodos de obtención, para lograr las propiedades más convenientes para distintos usos [11]. Debido a la insolubilidad de la quitina en agua, lo cual limita significativamente sus aplicaciones, en muchos casos es conveniente trabajar con algunos de sus derivados directos, en lugar del polímero original.

Entre los derivados de la quitina, el más importante es la quitosana, que también puede hallarse en la naturaleza u obtenerse de forma sintética (Figura 1). Su característica fundamental es que sus unidades están mayormente desacetiladas, lo cual influye en sus propiedades químicas y biológicas. Constituye uno de los pocos polímeros naturales catiónicos que se conoce. Es soluble en disoluciones ácidas diluidas, y manifiesta una potente actividad antimicrobiana [12]. Ello se debe a que sus grupos amino adquieren carga positiva, lo cual también explica sus propiedades antimicrobianas [13].

La elevada viscosidad de las disoluciones de quitosana es otra de sus características principales y también favorece su actividad biológica, la cual depende de factores como el peso molecular promedio del polímero, el grado de acetilación y la concentración de la disolución, entre otros. A partir de las disoluciones de quitosana también pueden obtenerse películas, hilos y vendajes con una extensa aplicación en muchas ramas de la economía [14].

Otro de sus derivados son los oligosacáridos de quitina, que constituyen fragmentos del polímero de 2 a 20 unidades de N acetilglucosamina. Su tamaño molecular mucho menor, les confiere propiedades químicas y actividades biológicas diferentes al polímero original, tales como la solubilidad en agua, y como moléculas señalizadoras en asociaciones simbióticas en las plantas [15].

Un factor común entre la quitina y estos derivados es su significativo contenido de nitrógeno, entre 6,14 y 8,3%, y su elevada estabilidad química y térmica [2]. Sin embargo, son sustratos muy susceptibles al ataque de numerosas familias de enzimas, lo cual se ha relacionado con su estructura y origen natural [16].

La presencia de los grupos funcionales hidroxilo y amino (en las unidades desacetiladas) en su estructura,

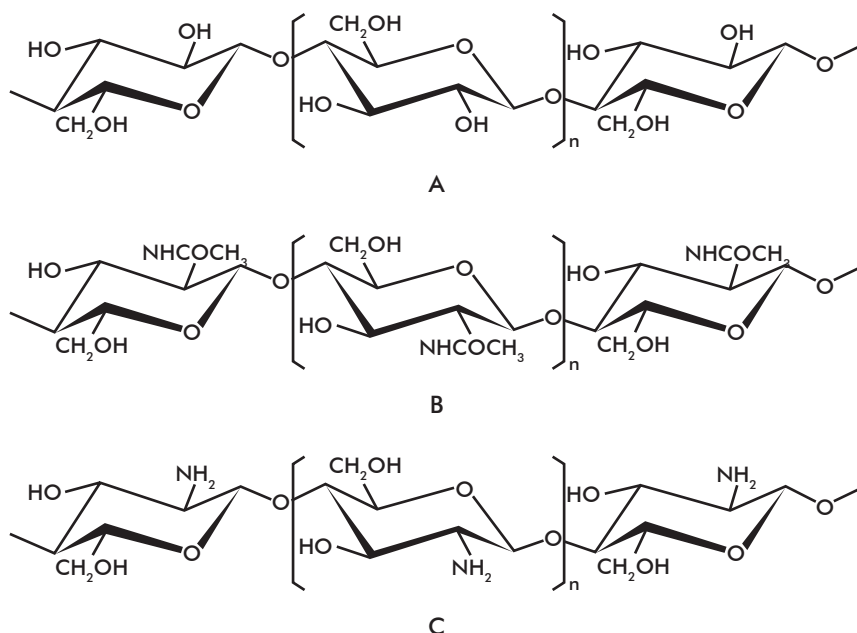


Figura 1. Representación de las cadenas de (A) celulosa; (B) quitina totalmente acetilada y (C) quitosana totalmente desacetilada, para evidenciar su similitud estructural.

permite la formación de compuestos de coordinación (complejos) con iones metálicos como el cobre, el cinc y el hierro, entre otros, aunque no con los metales alcalinos como el sodio y el potasio, o los alcalinotérreos como el calcio y el magnesio. Estos complejos han mostrado una potente actividad antimicrobiana frente a algunos agentes patógenos vegetales, por lo que resultan promisorios para su aplicación agrícola [17]. Además, poseen propiedades adsorbentes y absorbentes, que se han utilizado en la remoción de colorantes [18, 19], tratamientos de aguas residuales [20], entre otras aplicaciones. Por todo ello, la quitina y sus derivados tienen gran aplicación en la actividad humana [21].

Preparación de la quitina y sus derivados directos

La quitina puede obtenerse a partir de los organismos que la poseen, pero fundamentalmente se han empleado desechos de crustáceos y hongos. Sin embargo, es difícil la producción de grandes volúmenes de materia fúngica para su comercialización [22], por lo que la fuente más utilizada son los desechos del procesamiento de los crustáceos, debido a su disponibilidad, contenido de quitina y a que son residuos altamente contaminantes [23]. Se estima que la industria pesquera mundial cada año produce más de 170 000 toneladas de desechos quitinosos, que se pueden emplear en la obtención de esta sustancia. Se calcula que la producción global de residuos quitinosos es de 1 440 000 toneladas, de las que potencialmente se pueden obtener más de 25 000 toneladas de quitina [24].

Se han establecido varios métodos para la producción de quitina a partir de sus fuentes naturales. Estos procesos involucran fundamentalmente el tratamiento con ácidos para lograr la desmineralización de los materiales y el tratamiento con álcali para separar las proteínas. De manera opcional, también se pueden eliminar los pigmentos y las grasas. Sin em-

1. Gooday GW. The ecology of chitin degradation. *Adv Micro Ecol* 1990;11:387-419.

2. Yen MT, Mau JL. Selected physical properties of chitin prepared from shiitake stipes. *Food Sci Technol* 2007;40(3): 558-63.

3. Gomes RC, Soares RMA, Nakamura CV, Souto-Padrón T, de Souza RF, de Azevedo Soares Semêdo LT, et al. *Streptomyces lunalinharensii* spores contain chitin on the outer sheath. *FEMS Microbiol Lett* 2008;286(1):118-23.

4. Majtán J, Biliková K, Markovic O, Gróf J, Kogan G, Simuth J. Isolation and characterization of chitin from bumblebee (*Bombus terrestris*). *Int J Biol Macromol* 2007;40(3):237-41.

5. Wei-Bing, Shi-Ming, Feng. Lethal effect of *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*, and *Paecilomyces fumosoroseus* on the eggs of *Tetranychus cinnabarinus* (Acari: *Tetranychidae*) with a description of a mite egg bioassay system. *Biol Control* 2004;30:165-73.

6. Díaz-Rojas EI, Argüelles-Monal WM, Higuera-Ciapara I, Hernández J, Lizardi-Mendoza J, Goycoolea FM. Determination of chitin and protein contents during the isolation of chitin from shrimp waste. *Macromol Biosci* 2006;6(5):340-47.

7. Fanellia E, Vitob MD, Jonesc JT, Giorgia CD. Analysis of chitin synthase function in a plant parasitic nematode, *Meloidogyne artiellia*, using RNAi. *Gene* 2005;349: 87-95.

8. Wu SD, Wu C-S, Chen H. Cuticle structure of squid *Illex argentinus* pen. *Fish Sci* 2003;69:849-55.

9. Peniche C. Estudios sobre quitina y quitosana. [Tesis en opción del título de Doctor en Ciencias]. Editorial Universitaria, Universidad de La Habana, 2006.

10. Tamura H, Nagahama H, Tokura S. Preparation of chitin hydrogel under mild conditions. *Cellulose* 2006;13(4):357-64.

bargo, estos componentes suelen ser útiles en algunas aplicaciones; en especial en la agricultura, por lo que usualmente el grado de pureza necesaria lo define el uso específico que se dará al producto [25].

Cada año, en Cuba se capturan más de 8000 toneladas de langosta, y alrededor del 30% se desecha, lo que equivale a 1500 toneladas de materia prima aproximadamente, que pueden ser utilizadas para la obtención de quitina [26]. La explotación comercial de otros crustáceos como el camarón, el cangrejo y la jaiba, también genera residuos que se pueden utilizar para tal fin.

En Cuba se han desarrollado algunos procedimientos para la preparación de quitina, con diferentes aplicaciones. Por ejemplo, el método de producción de quitina de alta calidad y pureza, adecuado para uso en la industria farmacéutica, se considera uno de los primeros en Iberoamérica [27]. Actualmente hay dos fábricas para la producción de este tipo de quitina de calidad farmacéutica, con una capacidad de producción mucho mayor que las demandas actuales. También se emplea un procedimiento de obtención que implica el aprovechamiento integral del residuo [28], y otro diseñado para la preparación de quitina y sus derivados, destinados específicamente a la agricultura [29].

Actividad biológica de las quitinas en la agricultura

La quitina y sus derivados actúan biológicamente sobre las plantas y los microorganismos que interactúan con ellos [30]. Se identifican cuatro vertientes de investigación fundamentales en la aplicación de la quitina en la agricultura (Tabla 1):

1. Protección vegetal contra plagas y enfermedades antes y después de la cosecha.
2. Potenciación de la acción de microorganismos antagonistas y controles biológicos.
3. Potenciación de las relaciones simbióticas beneficiosas plantas-microorganismos.
4. Regulación del crecimiento y desarrollo de las plantas.

Algunos resultados apuntan que la quitina polimérica no ejerce una apreciable actividad antimicrobiana sobre el crecimiento y desarrollo de los agentes patógenos vegetales, en lo cual influye su insolubilidad en agua y su estructura compacta. Sin embargo, la quitosana, su derivado desacetilado, sí ha mostrado una potente actividad antimicrobiana, atribuida fundamentalmente a la carga positiva que adquieren sus grupos amino en disolución. Estos resultados concuerdan con los del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), que ha utilizado oligómeros solubles de quitina y quitosana, mientras que las oligoquitosanas (cargadas positivamente) mostraron actividad antifúngica, y los oligómeros de quitinas (no se encuentran cargados), una actividad muy baja, comparable con el tratamiento testigo [31].

Las membranas vegetales perciben la presencia de la quitina polimérica y sus derivados: como respuesta se desencadena una cascada de reacciones enzimáticas que pueden conducir a una resistencia sistémica inducida en las plantas [32]. Esto se ha corroborado al aislar receptores de membrana específicos para quitina, en especies como la soya y el arroz [33].

Tabla 1. Algunas aplicaciones de la quitina y sus derivados en la agricultura

Aplicación	Cultivo	Propiedades	Compuesto	Referencia
Protección postcosecha	Mango	Antimicrobiana	Quitosana	[37-39]
	Guayaba	Antimicrobiana		
	Tomate	Antimicrobiana		
Retardación de la maduración de frutos	Papaya	Formador de películas semipermeables	Quitosana	[40]
Estimulación de enzimas defensivas	Arroz	Elicitora	Quitina	[41-43]
	Tabaco		Quitosana	
	Chicharo		Quitosana	
Estimulador de simbiosis micorrizógena	Tomate	Inductor de mecanismos de reconocimiento	Quitina	[44]
Control de nemátodos	Tomate	Aumenta la microbiota quitinolítica del suelo	Quitina	[45]
Potenciador de la acción de biocontroles	Maní	Sustrato estimulador de enzimas hidrolasas	Quitina	[46]
	Manzana			

También las quitinas se han utilizado en el incremento de la eficiencia de los controles biológicos naturales. Muchos de los microorganismos antagonistas de plagas y enfermedades vegetales, como el *Trichoderma* sp., usan enzimas quitinasas para ejercer su control. En presencia de la quitina y algunos de sus derivados, estas quitinasas y otras enzimas hidrolasas se sobreproducen, y ello conduce a un aumento en la eficiencia de los organismos biocontroles [34].

Investigaciones recientes demuestran que la quitina y sus derivados pueden mejorar la simbiosis de leguminosas-*Rhizobium*. Los factores de nodulación que excreta el *Rhizobium* sp. son fragmentos de quitina de 3 a 5 unidades con ramificaciones de ácidos grasos y proteínas [35], por lo que la adición de quitina pudiera servir como sustrato precursor para la producción de estos metabolitos. En otras asociaciones como la micorrización, los derivados de quitina han mejorado la eficiencia de este proceso, en cultivos como el tomate [36].

La quitina puede favorecer el crecimiento y desarrollo de las plantas, porque incrementa la actividad enzimática y metabólica. Se ha demostrado que acelera la germinación y aumenta el crecimiento de las plantas, así como su desarrollo [30].

Protección vegetal contra plagas y enfermedades antes de la cosecha

La quitina y sus derivados se han utilizado en la protección vegetal de enfermedades, antes y después de la cosecha, directa e indirectamente. Estas acciones se relacionan con el tipo específico de interacción entre el agente patógeno y la planta. Algunos resultados de tal aplicación agrícola para la protección vegetal, se agrupan seguidamente según los diferentes tipos de agentes patógenos.

Actividad antifúngica

La actividad biológica de la quitina y sus derivados en la protección de plantas contra hongos tiene dos mecanismos de acción fundamentales. El primero, relacionado con la actividad antifúngica de estas moléculas, afecta el crecimiento y desarrollo del agente patógeno. Y el segundo, relacionado con la estimulación de mecanismos defensivos que inhiben o interfieren el desarrollo del agente patógeno, evita o limita el progreso de la enfermedad.

11. Rinaudo M. Chitin and chitosan: Properties and applications. *Prog Polym Sci* 2006;31(7):603-32.

12. Harish Prashanth KV, Tharanathan RN. Chitin/chitosan: modifications and their unlimited application potential -an overview. *Trends Food Sci Technol* 2007;18(3):117-31.

13. Xu J, Zhao X, Han X, Du Y. Antifungal activity of oligochitosan against *Phytophthora capsici* and other plant pathogenic fungi *in vitro*. *Pest Biochem Physiol* 2007;87(3):220-8.

14. Pillai CKS, Paul W, Sharma CP. Chitin and chitosan polymers: Chemistry, solubility and fiber formation. *Prog Polym Sci* 2009;34(7):641-78.

15. Gil-Serrano AM, Franco-Rodríguez G, Tejero-Mateo P, Thomas-Oates J, Spaink HP, Ruiz-Sainz J, et al. Structural determination of the lipo-chitin oligosaccharides nodulation signals produced by *Rhizobium fredii* HH103. *Carbohydr Res* 1997;303:435-43.

16. Li J, Du Y, Liang H. Influence of molecular parameters on the degradation of chitosan by a commercial enzyme. *Polymer Degrad Stab* 2007;92(3):515-24.

17. Cárdenas R, Ramírez M. Efecto de los derivados de quitina y su combinación con sulfato de cobre en el comportamiento del crecimiento micelial y esporulación de un aislamiento monospórico del hongo *Pyricularia grisea*, Sacc. *Cultiv Trop* 2004; 25(4):89-93.

18. Klimiuk E, Gusiatin Z, Kabardo K. The effectiveness of surfactants adsorption onto chitin and dye-modified chitin. *Polish J Environ Studies* 2006;15(1):95-104.

19. Crini G, Badot PM. Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes. *Prog Polym Sci* 2008;33(4):399-447.

20. Crini G. Recent developments in polysaccharide-based materials used as adsorbents in wastewater treatment. *Prog Polym Sci* 2005;30(1):38-70.

21. Rudrapatnam N. Chitin - The undisputed biomolecule of great potential. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2003;43(1):61-87.

Los derivados de quitina, en especial cuyos grupos funcionales pueden reaccionar fácilmente, como la quitosana y sus compuestos, han mostrado una actividad fungicida directa contra muchos hongos fitopatógenos [47]. Esta actividad está influenciada por las propiedades químicas del compuesto aplicado y su concentración. En este sentido, la aplicación de polímeros de quitosana a concentraciones de 1000 mg/L inhibe totalmente el crecimiento micelial de *Rhizoctonia solana*, mientras que a 500 mg/L la inhibición es del 80% (32). Cuando se reduce el tamaño molecular y se aplica hidrolizado de quitosana, a una concentración de 500 mg/L, solo se logra el 50% de inhibición. Si aumenta el grado de acetilación y se aplica quitina coloidal, la inhibición del crecimiento es solo del 20%. Varios estudios han concluido tal afirmación, aunque destacan la importancia del tipo de hongo [48]. Con una muestra de 14 hongos fitopatógenos diferentes en condiciones *in vitro*, se observan distintas inhibiciones del crecimiento micelial, en dependencia del tamaño molecular y del grado de acetilación. Sin embargo, se apreció una tendencia a una mayor inhibición del crecimiento con el incremento del grado de desacetilación y el tamaño molecular de los derivados quitinosos ensayados.

En cuanto a los mecanismos que explican la acción directa de la quitosana y sus derivados, se ha establecido que la propiedad de los grupos amino libres de cargarse positivamente en un medio ligeramente ácido, influye significativamente en la actividad antifúngica. Algunos autores plantean que actúa en el cromosoma al interactuar con el ADN celular y mejorar la expresión de los genes involucrados en la resistencia en las plantas [43]. También se ha propuesto que la acción ocurre de forma indirecta al hacer inaccesible el Ca^{2+} , nutrientes y minerales esenciales para el crecimiento de hongos filamentosos. Otros investigadores informan que interactúa con la membrana plasmática, y provoca interferencias en las funciones de las membranas, lo cual se asocia con su capacidad de actuar como agente quelante y producir alteraciones en la permeabilidad de la membrana citoplasmática [49]. También se sugiere que afecta la actividad en *Rhizopus stolonifer* al influir en el balance entre la biosíntesis y la degradación de los componentes de la pared celular.

Los resultados de los laboratorios del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, con *Pyricularia grisea* indican que la presencia de quitosana y de sus oligómeros en el medio de cultivo a concentraciones de 1000 mg/L y pH 5, inhibe totalmente el crecimiento micelial de este hongo [50]. Sin embargo, es importante considerar el pH de la disolución resultante, que afecta la carga positiva de los grupos amino, pues en otro ensayo a pH 6, solo hubo una ligera afectación del crecimiento del hongo, aunque se mantuvo una inhibición total de la esporulación [17].

De forma similar, la presencia de quitosana a 1000 mg/L afectó el crecimiento de *Sarocladium oryzae* en más del 40% con respecto al tratamiento control (sin adición de quitosana) [51]. Algunos estudios plantean la importancia de la familia y del género del hongo en su susceptibilidad ante los derivados de quitina, y que el contenido de quitina en la pared celular puede ser un factor importante que explica esa diferencia.

Mientras que el crecimiento micelial de *Phytophthora parasitica* se inhibe a bajas concentraciones de quitosana (100 mg/L), el crecimiento de *Fusarium oxysporum radici lycopersicii* se inhibe significativamente a concentraciones mayores que 1000 mg/L.

De manera particular se ha estudiado la estimulación artificial de los mecanismos defensivos de las plantas, mediante la aplicación de elicitores derivados de quitina (elicitación), pues en muchas ocasiones estas se protegen (resistencia sistémica) contra numerosas enfermedades vegetales [52].

Los resultados de investigaciones en el cultivo del arroz muestran que la semilla recubierta con derivados de quitina produce enzimas hidrolíticas, tales como quitinasas y β 1,3 glucanasas, que degradan la quitina y el β 1,3 glucano, respectivamente, componentes mayoritarios de la pared celular de muchos hongos fitopatógenos [53, 54].

Además, la quitosana y sus derivados solubles cargados positivamente, estimulan la producción de metabolitos antifúngicos en las plantas [55]. Sin embargo, algunos autores han demostrado que en la planta de arroz, los derivados no cargados positivamente, y la quitina polimérica insoluble, estimulan niveles elevados de metabolitos antimicrobianos de muy alta potencia, tales como las fitoalexinas: momilactonas, oryzalexinas, que en concentraciones tan bajas como 0.9 mg/L, o incluso en cantidades de nanogramos, provocan la inhibición total del crecimiento de *P. grisea Sacc* [32].

Otros autores sugieren que debido al menor tamaño molecular de los oligómeros, estos pudieran ser más efectivos en plantas, al ser más fácilmente absorbidos por la raíz o por aspersión foliar [42]. A pesar de estas ventajas que presentan los oligómeros sobre el polímero original, otros trabajos demuestran que este criterio no es absoluto y que además influyen el tipo de cultivo, las características del agente patógeno, en especial la composición de su pared celular, el grado de acetilación de la quitosana y el pH de la disolución [56].

En varios cultivos se ha evaluado la aplicación de los derivados quitinosos para prevenir la ocurrencia de enfermedades fúngicas provenientes de agentes patógenos del suelo. Por ejemplo, la aplicación de quitosana protege el cultivo del pepino contra *Phytophthora aphanidermatum*. [57]. En el tomate, las quitosanas parcialmente acetiladas producen enzimas hidrolíticas y reducen las lesiones provocadas por *F. oxysporum lycopersicii*, tanto por tratamiento de la semilla como por vía foliar [55]. Otros autores han encontrado una disminución de la incidencia de enfermedades en el trigo y el arroz con significativos incrementos del rendimiento [58]. También en el maní se ha comprobado protección, además de la elicitación de los mecanismos defensivos [59]. Se debe señalar que aunque la mayoría de los trabajos para proteger los cultivos han sido con quitosana y sus derivados, se ha establecido muy claramente la importancia de la acetilación en estas estructuras para la producción de peróxido de hidrógeno y otras especies activas de oxígeno, que son las que desencadenan la cascada de reacciones enzimáticas que conducen a la resistencia sistémica de las plantas [60].

La quitina y sus fragmentos, aunque no presentan carga, también han mostrado sus potencialidades en

22. Andrade V, Neto B, Fukushima K, Campos-Takaki G. Effect of medium components and time of cultivation on chitin production by *Mucor circinelloides* (*Mucor javanicus*) IFO 4570A factorial study. Rev Iberoam Micol 2003;20:149-53.

23. Cauchie M. Chitin production by arthropods in the hydrosphere. Hydrobiologia 2002;470(1-3):63-95.

24. Goycolea F, Agulló E, Mato R. Fuentes y procesos de obtención. In: Abram AP, editor. Quitina y Quitosano. Obtención, caracterización y aplicaciones, Lima, Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú, 2004, p.106-54.

25. No H, Meyer S. Preparation and characterisation of chitin and chitosan a review. J Aquat Food Prod Technol 1995; 14:27-52.

26. León ME, de Puga R, Baisre J. National report on the lobster fisheries in Cuba. FAO Fish Rep 2001;619:197-202.

27. Henriques R, Nieto O, inventors; Instituto de Química y Biología Experimental, assignee. Método para obtención de quitina suficientemente pura. CU Patent 20760. 1980.

28. García D, Oviedo C, Nieto JM, Peniche C, Henriquez RD, inventors; Instituto de Química y Biología Experimental, assignee. Método para el aprovechamiento del desecho de la langosta común. CU Patent 21658 A1. 1996 Oct 5.

29. Ramírez MA, Cabrera G, Gutiérrez A, Rodríguez T. Metodología para la obtención de quitosana a bajas temperaturas. Cultiv Tropic 2000;21(1):79-82.

30. Hirano S. Applications of chitin and chitosan in the ecological and environmental fields. In: Goosen MFA, Ed., Technomic, Lancaster, PA, 1997:31-54.

31. Parra Y, Ramírez MA. Efecto de diferentes derivados de quitina sobre el crecimiento *in vitro* del hongo *Rhizoctonia solani* Kuhn. Cultiv Tropic 2002;23(2):73-5.

32. Ruen YY, Ch W. Elicitation of rice diterpenes phytoalexins by chitin. Arch Biochem Biophys 1993;294(3):450-5.

33. Day RB, Okada M, Ito Y, Tsukada K, Zaghovani H, Shibuya N, et al. Biding site for chitin oligosaccharides in the soybean plasma membrane. Plant Physiol 2001; 26:1162-73.

34. Kishore GK, Pande S, Podile AR. Chitin-supplemented foliar application of *Serratia marcescens* GPS 5 improves control of late leaf spot disease of Groundnut by activating defence-related enzymes. J Phytopathol 2005;153:169-73.

35. Staehelin C, Schultze M, Tokuyasu K, Poinso V, Promé JC, Kondorosi E, et al. N-deacetylation of *Sinorhizobium meliloti* Nod factors increases their stability in the *Medicago sativa* rhizosphere and decreases their biological activity. Mol Plant Microbe Interact 2000;13(1):72-79.

36. Iglesias R, Pombo R, Cabrera G, Fernández F, Morales D. Efecto de la quitina y sus derivados sobre la infección micorrizica y el crecimiento y desarrollo de las plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). Cultiv Tropic 1995;16(3):43-4.

37. Chien P-J, Sheu F, Yang F-H. Effects of edible chitosan coating on quality and shelf life of sliced mango fruit. J Food Eng 2007;78(1):225-9.

la protección de plantas, fundamentalmente en monocotiledóneas. Se ha establecido que los oligómeros de quitina y no los de quitosana, provocan numerosas reacciones de defensa en el arroz, el trigo, la arábida, el melón, el frijol, la soya y el maní [34, 58, 61, 62]. Entre esas respuestas defensivas inducidas en las plantas por los derivados de quitina están la acumulación de proteínas relacionadas con la patogénesis, tales como la enzima fenilamonioliasa (PAL), β 1,3 glucanasa, quitinasa, peroxidasa [41], y también la síntesis de inhibidores de proteasas, la producción de fitoalexinas [63], la lignificación [64], la síntesis de calosa, y la reacción de muerte celular hipersensible [65].

Actividad antiviral

Los derivados quitinosos presentan actividad antiviral. En ese sentido se destaca que los derivados catiónicos de quitosana son muy potentes en la inhibición de las lesiones locales producidas por los virus, lo cual se ha atribuido a la dependencia de la infección viral con la carga superficial [66]. Sin embargo, no se ha verificado una correlación entre el grado de acetilación y el peso molecular, con respecto a la actividad antiviral, pues también se ha comprobado que oligómeros de quitina totalmente acetilados a una concentración de 0,01% inhiben el virus del mosaico de la alfalfa en el frijol.

La eficiencia en la actividad antiviral de los derivados quitinosos depende de la especie vegetal tratada. Los resultados sugieren que los mecanismos que inducen la actividad antiviral de los derivados quitinosos actúan de dos formas: 1) directamente por afectación de la adherencia de los virus a la superficie de las hojas; y 2) sistémicamente por la transmisión de resistencia a otras partes de las plantas, en las que intervienen diferentes enzimas, entre las cuales se incluye la peroxidasa [67, 68].

Es importante destacar que estos derivados, y en especial la quitosana, protegen a las plantas no solo contra virus transmitidos mecánicamente, sino también por los transmitidos por vectores [56].

También se ha comprobado que la quitosana asperjada a concentraciones del 1% es capaz de proteger al tomate contra viroides, lo cual es muy importante en la práctica agrícola, pues la infección con estos agentes patógenos es muy destructiva y hasta ahora muy difícil de combatir [69].

Los resultados de la actividad antiviral de la quitosana son muy valiosos para la agricultura, pues prácticamente no existen productos químicos que controlen las infecciones virales vegetales.

Actividad antibacteriana

Los derivados de quitina también pueden proteger las plantas contra enfermedades bacterianas. Estudios *in vitro* han demostrado que la quitosana y los derivados catiónicos de quitina inhiben el crecimiento de 11 bacterias en un rango de concentraciones que oscila entre 0.008 a 0.25%, y concluyen que los niveles de inhibición directa dependen fundamentalmente del tipo de bacteria y del derivado utilizado [70]. Otros autores mostraron que solo los derivados quitinosos catiónicos son efectivos en la inhibición del crecimiento de bacterias grampositivas y gramnegativas; mientras los aniónicos no lo son ni aun a concentraciones 15 veces mayores [71]. Estos mismos autores encontraron una

correlación inversa entre el efecto del peso molecular de las quitosanas y la inhibición del crecimiento. Tal resultado coincide con los de otros investigadores, que plantean que la actividad antibacteriana de los derivados de quitosana depende fundamentalmente del tipo de bacteria ensayada y del peso molecular [72].

Además, la eficiencia de la aplicación de quitosana en la inhibición de la infección bacteriana en el tomate, depende de la concentración de quitosana y del tiempo de aplicación antes de la infección. La inhibición se logra al 0.1% de concentración [73].

En otros experimentos con hojas de tomate asperjadas con derivados catiónicos y aniónicos de quitosana, los primeros inhibieron la infección por *Pseudomonas syringae* pv. entre el 60 y el 70%; mientras que los aniónicos no la inhibieron. Debido a que algunos derivados catiónicos que no inhibieron el crecimiento bacteriano *in vitro*, y sí redujeron la infección *in vivo*, se ha sugerido que los derivados catiónicos de quitosana en su actividad antibacteriana tienen un comportamiento dual: inhiben el crecimiento bacteriano, e inducen mecanismos naturales de defensa en las plantas [56, 74].

Actividad nematocida

La quitina y otros derivados quitinosos se han empleado exitosamente para controlar nemátodos parásitos en los suelos [75]. La adición de la quitina al suelo provoca el incremento de microorganismos quitinolíticos, cuya actividad provoca la destrucción de los huevos y de la cutícula de nemátodos jóvenes que en su composición contienen quitina [76]. Además, al mineralizarse, la enmienda de quitina incrementa las emisiones de amoníaco en concentraciones tóxicas para los nemátodos, lo que contribuye a disminuir la población de nemátodos patógenos y a reducir el daño que estos provocan en las raíces [77]. Este efecto se corroboró al añadir inhibidores de la nitrificación, cuya función es mantener durante más tiempo la quitina añadida en el suelo, y el resultado es una reducción en el índice de daños por nemátodos [78]. La aplicación de quitina aumenta la población microbiana de organismos quitinolíticos y nematocidas en el suelo, lo que provoca la reducción de lesiones por nemátodos en plantas de tomate [45].

Se ha señalado que el efecto de la quitina sobre la mortalidad de los nemátodos es más marcado que el de la quitosana, que en su composición tiene mayor contenido de nitrógeno, lo cual sugiere que la contribución al aumento de microorganismos nematófagos y nematocidas es mayor que la producción de amoníaco a niveles tóxicos [79].

Se diseñaron derivados de quitina encaminados a utilizar ambos mecanismos nematocidas, tales como el complejo quitina-proteína. Los resultados mostraron que al introducir el complejo quitina-proteína, quitina pura y quitosana en un cultivo *in vitro* de nemátodos del género *Heterotera*, la actividad nematocida superior fue del complejo quitina-proteína, mientras que la acción de la quitina pura fue muy superior a la de la quitosana [79].

Protección poscosecha de frutos

La aplicación de derivados de quitina, en especial la quitosana, confieren protección a los frutos frente a

38. Thommohaway C, Kanlayanarat S, Uthairatanakij A, Jitareerat P. Quality of fresh-cut guava (*Psidium Guajava* L.) as affected by chitosan treatment. *Acta Horticult* 2007;746:449-55.

39. Bautista-Baños S. Evaluación del quitosano en el desarrollo de la pudrición blanda del tomate durante el almacenamiento. *Rev Iber Tecnología Postcosecha* 2004;1:63-67.

40. Alimuniar A, Zainuddin R. An economical technique for producing chitosan. *Proceedings from the 6th International Conference on Chitosan, Poland, 16-19 August, 1994.*

41. Rodríguez AT, Ramírez MA, Cárdenas RM, Hernández AN, Velázquez MG, Bautista S. Induction of defense response of *Oryza sativa* L. against *Pyricularia grisea* (Cooke) Sacc by treating seeds with chitosan and hydrolyzed chitosan. *Pest Biochem Physiol* 2007;89:206-15.

42. Falcón AB, Ramírez MA, Márquez R, Hernández M. Chitosan and its hydrolysate at tobacco-phytophthora parasitica interaction. *Cultiv Tropic* 2002;23(1):61-6.

43. Hadwiger LA, Ogawa T, Kuyama H. Chitosan polymer sizes effective in inducing phytoalexin accumulation and fungal suppression are verified with synthesized oligomers. *Mol Plant Microbe Interact* 1994;7(4):531-3.

44. Iglesias R, Gutiérrez A, Fernández F. The influence of chitin from lobster exoskeleton on seedling growth and mycorrhizal infection in tomato crop (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Cultiv Tropic* 1994; 15(2):48-9.

45. Jin RD, Suh J, Park RD, Kim YW, Krishnan HB, Kil Yong K. Effect of chitin compost and broth on biological control of *Meloidogyne incognita* on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Nematology* 2005;7(1):125-32.

46. Backman P, Rodriguez-Kabana R, Kokalis N, inventors; Auburn University, assignee. Method of controlling foliar microorganism populations. US Patent 5,288,488, 1994 Feb 22.

47. Rabea E, Badawy MT, Stevens CV, Smaghe G, Steurbaut W. Chitosan as antimicrobial agent: applications and mode of action. *Biomacromolecules* 2003; 4(6):1457-65.

48. Hirano S, Nagao YN. Effect of chitosan, pectic acid on pathogenic fungi. *Agric Biol Chem* 1989;58(1):24-6.

49. Roller S, Covill N. The antifungal properties of chitosan in laboratory media and apple juice. *Int J Food Microbiol* 1999; 47:67-77.

50. Rodríguez AT, Ramírez MA, Nápoles MC, Cárdenas RM. Antifungal activity of chitosan and one its hydrolysates on *Pyricularia grisea* Sacc fungus. *Cultiv Tropic* 2003;24(2):85-8.

51. Cruz A, Rivero D, Martínez B, Ramírez MA, Rodríguez AT. Efecto de la quitosana sobre el crecimiento y desarrollo *in vitro* de *Sarocladium oryzae* Sawada. *Rev Protección Veg* 2004;19(2):133-6.

52. Yamaguchi T, Ito Y, Shibuya N. Oligosaccharide elicitors and their receptors for plant defense responses. *Trends Glycosci Glycotechnol* 2000;12(64):113-20.

las enfermedades poscosecha. Para estos fines, se han empleado fundamentalmente quitosana y otros derivados solubles, que tienen propiedades antimicrobianas, y la capacidad de formar películas semipermeables a los gases [30].

Mediante el recubrimiento con una película de quitosana se reduce significativamente el daño por pudrición blanda en el tomate [39]. En la fresa, el tratamiento antes de la cosecha disminuye los niveles de infección y mejora la calidad de los frutos [80, 81]. En la zanahoria, la aplicación de quitosana hidrolizada tres días antes de la inoculación artificial de cursiva, provoca una menor incidencia de este agente patógeno y menor tamaño de las lesiones [82]. En estudios en pimientos tratados con quitosana, en condiciones de almacenamiento, el moho gris demoró en aparecer siete días más que en los frutos no tratados [83]. No solo los derivados de quitina se han utilizado para el recubrimiento de frutos, sino también para aumentar la calidad de piezas cortadas, como muestran las investigaciones en pitayas rojas [37] y en mango [37, 84]. En general, la quitosana ha mostrado un comportamiento similar a los fungicidas químicos, por lo cual pudiera utilizarse en su lugar, con la ventaja de que es un producto totalmente biodegradable [85]. La aplicación de estas variantes en la agricultura obedece a la reducción de los costos de producción de los derivados de quitina, y a sus ventajas frente a los actuales productos fitosanitarios.

Potenciación de la acción de bioplaguicidas

Muchos de los organismos antagonistas y controles biológicos naturales basan su efecto en la excreción de enzimas quitinasas e hidrolasas; esencial en su actividad biológica [86]. La aplicación de quitina y sus derivados incrementa la producción de esas enzimas por microorganismos como *Tricoderma sp.* y *Bacillus sp.*, entre otros, con lo cual aumenta la eficiencia de su control contra microorganismos y plagas patógenas [87]. Recientemente se ha escrito sobre la acción sinérgica de la quitina con medios biológicos. Por ejemplo, tras la aplicación conjunta de una bacteria y la quitina polimérica en el maní, se logró un mayor control de la enfermedad que con el microorganismo solo [34]. También con la aplicación de quitina se logró un control de *Phytophthora fragaria* en pastos; aunque es muy importante tener en cuenta los tiempos de exposición de la quitina para conseguir un mejor control [88].

La obtención de cepas nativas de biocontroles en suelos infectados por agentes patógenos, mediante la adición de quitina a estos suelos, incrementa las poblaciones de tales organismos. Luego, estas cepas endógenas pueden cultivarse y son potenciales controles biológicos en los suelos. Ello se comprobó con actinomicetos en un suelo arenoso [89].

Otros autores han demostrado cómo se incrementa significativamente la población de microorganismos quitinolíticos en presencia de quitina, incluso en suelos de muy baja fertilidad como las dunas, con lo cual mejora la microbiota del suelo y sus propiedades [90].

Las quitinasas son enzimas importantes en los mecanismos de control de los bioplaguicidas. En ese sentido, para seleccionar y evaluar la eficiencia de orga-

nismos bioinsecticidas, se utiliza mucho la hidrólisis de medios que contienen quitina.

Se ha planteado la posibilidad de incorporar derivados de quitina en las formulaciones de estos microorganismos, con el fin de aumentar la efectividad de los bioplaguicidas y suministrar un entorno propicio para su desarrollo y resistencia frente a condiciones adversas [46]. Basados en estas acciones, se puede contribuir a mejorar las opciones en el uso de controles biológicos en la agricultura.

Nutrición de las plantas y la fertilidad del suelo

La quitina y sus derivados tienen características adicionales en comparación con la mayoría de los carbohidratos. Entre ellas, el contenido de nitrógeno en su composición, y por lo tanto una baja relación C/N [1]. Esta propiedad favorece la proliferación de microorganismos en el suelo, fundamentalmente de naturaleza quitinolítica y proteolítica, tales como los actinomicetos. Se ha observado que en menos de cuatro semanas se logra la mineralización de más de la mitad de la quitina añadida al suelo, lo cual está muy relacionado con la humedad, el pH y el contenido de materia orgánica en los suelos [90]. La adición de quitina al suelo incrementa la población y la actividad microbiana de organismos procariontes y eucariotes. Ambos participan en la mineralización de la quitina, y además aumentan las poblaciones de organismos fijadores de nitrógeno y las emisiones de metano, dióxido de carbono y monóxido de dinitrógeno [91, 92]. Muchos de estos organismos quitinolíticos que se incrementan con la adición de la quitina, pueden formar relaciones simbióticas beneficiosas con las plantas, tales como las micorrizas y las especies del género *Rhizobium*. En estas simbiosis, las plantas mejoran las condiciones para su nutrición al asimilar algunos nutrientes, y aumentan la fijación de un elemento tan importante como el nitrógeno. Por ejemplo, se han utilizado enmiendas de quitinas y fertilizantes tales como la urea, para el mejoramiento de la microbiota de los suelos, el control de organismos patógenos y la nutrición de las plantas, con resultados superiores a los tratamientos controles en cultivos de tomate, clavel y pastos [76, 77, 88].

Potenciación de la biofertilización

La quitina se ha utilizado en las interacciones simbióticas beneficiosas planta-microorganismo, tales como la micorrización. Esta asociación se incrementa hasta un 20% en plantas tratadas, lo que provoca un aumento considerable del rendimiento [74, 75]. Este resultado se ha aplicado en la producción de Ecomic: un biofertilizante cubano a base de micorrizas. Se sugiere que la adición de quitina pudiera acelerar el primer paso en el establecimiento de la infección micorrízica, que consiste en la ruptura de la pared celular del hongo mediante las quitinasas vegetales [93].

Por otra parte, los factores de nodulación imprescindibles para el establecimiento de la asociación simbiótica leguminosas-*Rhizobium* están compuestos parcialmente por oligómeros de quitina [15]. Tanto es así que la N-acetilación en esas moléculas es una condición necesaria para su actividad biológica; mientras las diferencias estructurales en esos compuestos sirve de señal a las distintas especies dentro del género *Rhi-*

53. Hirano S, Yamamoto T, Hayashi M, Nishida T, Inui H. Chitinase activity in seed coated with chitosan derivatives. *J Agric Biol Chem* 1990;54(10):2719-20.

54. Rodríguez AT, Ramírez MA, Falcón A, Guridi F, Cristo E. Estimulación de algunas enzimas relacionadas con la defensa en plantas de arroz (*Oryza sativa*, L.) obtenidas de semillas tratadas con quitosana. *Cultiv Trop* 2004;25(3):111-5.

55. Benhamou N, Lafontaine P, Nicole JN. Induction of systemic resistance to Fusarium crown and root rot in tomato plants by seed treatment with chitosan. *Phytopathology* 1994;84(12):1432-44.

56. Potential use of chitosan in plant protection. In: Chitin and chitosan. Polish-Russian Monograph. Eds: Struszczyk H, Pospieszny H and Gamzade A, 1999, p. 115-130.

57. El Ghaouth A, Arul J, Grenier J, Benhamou N, Asselin A, Belanger G. Chitosan induces systemic resistance against *Phytophthora blight* in greenhouse grown cucumber. *Phytopathology* 1994; 84(9):1120-7.

58. Hadwiger LA, inventor; Washington State University Research Foundation (Pullman, WA), assignee. Method for treating cereal crop seed with chitosan to enhance yield root growth, and stem strength. US patent 5,104,437. 1992 Apr 14.

59. Sathibayama M, Balasubramanian R. chitosan induces resistance components in arachi hipogaea against leaf rust caused by *Puccinia arachidis*. *Crop Prot* 1998; 17:307-13.

60. Kauss H, Jeblick W, Domard A, Siegrist J. Partial acetylation of chitosan and a conditioning period are essential for elicitation of H₂O₂ in surface-abraded tissues from various plants. *Adv Chitin Sci* 1997;2:94-101.

61. Hirano S, Hayashi M, Okuno S. Soybean seeds surface-coated with depolymerised chitins: chitinase activity as a predictive index for the harvest of beans in field culture. *J Sci Food Agric* 2000;81(2):205-9.

62. Wan J, Shuqun Zhang, Stacey G. Activation of a mitogen-activated protein kinase pathway in Arabidopsis by chitin. *Mol Plant Pathol* 2004;5(2):125-35.

63. Nahalka J, Nahalkov J, Gemeiner P, Blan P. Elicitation of plumbagin by chitin and its release into the medium in *Drosophyllum lusitanicum* Link. suspension cultures. *Biotechnol Lett* 1998;20(9):841-5.

64. Maksimov IV, Cherepanova EA, Khairullin RM. Chitin specific-peroxidases in plants. *Biochemistry (Moscow)* 2003; 68(1):111-5.

65. Prapagdee B, Kotchadatt K, Kumsopa A, Visarathanonth N. The role of chitosan in protection of soybean from sudden death syndrome caused by *Fusarium solani* f. sp. glycines. *Bioresour Technol* 2007; 98(7):1353-8.

66. Pospieszny H, Chirkov S, Atabekov L. Induction of antiviral resistance in plant by Chitosan. *Plant Sci* 1991;79:63-9.

67. Pospieszny H, Giebel J. Peroxidase activity is related to th resistance against viruses induced by chitosan. *Chitin Enzymol* 1996;2:379-83.

zobium para que se asocien con las distintas especies de leguminosas [35].

En ese sentido, se considera que las investigaciones futuras deberán dirigirse a aplicar este conocimiento teórico, pues las condiciones *in vitro* y semicontroladas suelen ser bastante distantes de las condiciones en el campo.

Regulador del crecimiento y desarrollo vegetal

Los derivados de quitina provocan cambios favorables en el metabolismo de las plantas y los frutos. La aplicación de quitosana a las semillas de tomate acelera la germinación y el vigor de las plantas [94]. También aumentan la germinación de las semillas de los cereales y el vigor de las plantas resultantes [95]. Específicamente, el recubrimiento de semillas con quitosana aumenta en más del 20%, el rendimiento del arroz y el trigo, en condiciones de campo, por lo que actualmente se dan los primeros pasos para su introducción a escala comercial [58].

Nuestras investigaciones revelan que la naturaleza química del derivado de quitina puede influir significativamente en el crecimiento vegetal [96]. La quitina coloidal, que es una forma degradada del polímero quitina, provocó mayor crecimiento de plántulas de tomate en los primeros 15 días, que el complejo quitina-proteína, que tiene una degradación mucho más lenta, pues en este compuesto la quitina mantiene sus enlaces con las proteínas. Sin embargo, al repetir la evaluación a los 30 días, las plantas suplementadas con complejo quitina-proteína tenían mayor altura y vigor que las suplementadas con quitina coloidal; aunque en todos los casos, las suplementadas con los derivados de quitina tenían un mejor comportamiento que el tratamiento control. El recubrimiento de la semilla de soya con quitina despolimerizada aumentó la cosecha en un 118% con respecto al control [61], y en la zanahoria también hubo mayor rendimiento del cul-

tivo. Este comportamiento de los derivados de quitina en el crecimiento vegetal concuerda con los autores que la sitúan como una oligosacarina exógena, que modula la respuesta fisiológica de estos cultivos.

Conclusiones

La abundancia de la quitina, sus propiedades biológicas y su carácter biocompatible convierten a este biopolímero y sus derivados en una alternativa muy promisoriosa para la agricultura. Como se ha podido documentar a lo largo de esta monografía, estos derivados poseen aplicación potencial valiosa en la agricultura. Sin embargo, aún debe investigarse más, sobre todo en la práctica agrícola de tales resultados de laboratorio y en condiciones controladas, en Cuba y el mundo. La acción antiviral de la quitina y otras se ha demostrado recientemente, y son necesarias para la agricultura hoy; mientras que otras más conocidas y aprovechadas, como la acción nematocida y antifúngica, pueden constituir grandes saltos en el desarrollo de las prácticas agrícolas sostenibles, teniendo en cuenta que pueden representar una reducción en el uso de plaguicidas químicos sintéticos, y los nuevos enfoques que suponen para la fitopatología moderna. Las relaciones simbióticas de estos compuestos pudieran ser importantes en las producciones agrícolas, sobre todo en condiciones adversas, como la baja fertilidad de los suelos, su salinidad o su contaminación con metales pesados, así como en procesos de sequía prolongada por efectos del cambio climático. Sin embargo, la aplicación de estos resultados en la agricultura aún no tiene toda la atención de investigadores, agricultores y productores, a pesar de las potencialidades de estas sustancias. En ese sentido, sin dudas entre los nuevos retos de la agricultura moderna estará el desarrollo de tecnologías apropiadas para la aplicación de las quitinas y sus derivados en el campo.

68. Iriti M, Sironi M, Gomarasca S, Casazza AP, Soave C, Faoro F. Cell death-mediated antiviral effect of chitosan in tobacco. *Plant Physiol Biochem* 2006;44(11-12): 893-900.

69. Pospieszny H. Antiviral activity of chitosan. *Crop Prot* 1997;16:105-6.

70. Jeon Y-J, Fereidoon S, Kim S-K. Preparation of chitin and chitosan oligomers and their applications in physiological functional foods. *Food Rev Int* 2000;16(2):159-76.

71. Pospieszny H, Mackowiak, Zolobowska, Struszczyk H. Effects of chitosan derivatives on the growth of phytopathogenic bacteria. In: *Progress on chemistry and application of chitin and its derivatives*. Polish Chitin Soc. Warsaw, editor Struszczyk, H, 1996, p. 101-6.

72. No H. Antibacterial activities of chitosans and chitosan oligomers with different molecular weights on spoilage bacteria isolated from Tofu. *J Food Sci* 2002;67(4):1511-4.

73. Pospieszny H, Mackowiak. Effect of the infection of plants by pathogenic bacteria *Adv Chitin Sci* 1997;2:759-62.

74. Li Y, Chen XG, Liu N, Liu CS, Liu CG, Meng XH, et al. Physicochemical characterization and antibacterial property of chitosan acetates. *Carbohydr Polym* 2007;67(2):227-32.

75. Rodríguez-Kabana R, Morgan-Jones G, Ownley-Gintis B. Effects of chitin amendments

to soil on *Heterodera glycines*, microbial population and colonization of cyst by fungi. *Nematropica* 1984;14:9-25.

76. Brown FJ, Neville S, U. Sarathchandra, Watson RN, Cox NR. Effects of chitin amendment on plant growth, microbial populations and nematodes in soil. *New Zealand Plant Prot.*53:1-5.

77. Bélair G, Tremblay N. The influence of chitin-urea amendments applied to an organic soil on *Meloidogyne hapla* population and growth of green house tomatoes. *Phytoprotection* 1995;76(2):75-80.

78. Oka Y, Pivonia S. Effect of a nitrification inhibitor on nematocidal activity of organic and inorganic ammonia-releasing compounds against the root-knot nematode *Meloidogyne javanica*. *Nematology* 2003;5(4):505-13.

79. McCandliss R, Eastwood. B, Milch RA, inventors; IGI Biotechnology, Inc. (Columbia, MD) assignee. Nematocidally active chitin-protein complex US Patent 4,536,207. 1985 Aug 20.

80. Bhaskara MV. Effect of pre-harvest chitosan sprays on post-harvest infection by *Botrytis cinerea* and quality of strawberry fruit. *Postharvest Biol Technol* 2000;20:39-51.

81. Ribeiro C, Vicente A, Teixeira JA, Miranda C. Optimization of edible coating composition

to retard strawberry fruit senescence. *Postharvest Biol Technol* 2007;44(1):63-70.

82. Molloy A, Cheah V, Koolard P. Induced resistance against *Sclerotinia sclerotium* in carrot treated with enzymatic hydrolyzed chitosan. *Postharvest Biol Technol* 2004;33:61-65.

83. El Gaoth A, Wilson A, Benhamou N. Biochemical and cytochemical aspects of the interactions of chitosan with *Botrytis cinerea* in bell pepper. *Postharvest Biol Technol* 1997; 12:183-94.

84. Chien P, Sheu F, Lin H. Quality assessment of low molecular weight chitosan coating on sliced red pitayas. *J Food Sci* 2007;79(2): 736-40.

85. El Ghaouth A, Arul J, Asselin A. Potential use of chitosan in postharvest preservation of fruits and vegetables. In: *Advances in Chitin and Chitosan*, Brines CJ, Sandfors PA and Zikakis JP (Eds.). Elsevier Applied Science, London, New York, 1992, p. 440-52

86. Choquer M, Becker HF, Vidal-Cros A. Identification of two group A chitinase genes in *Botrytis cinerea* which are differentially induced by exogenous chitin. *Mycol Res* 2007; 111(5):615-25.

87. Gohel V, Singh A, Vimal M, Ashwini P, Chhatpar HS. Bioprospecting and antifungal potential of chitinolytic microorganisms. *African J Biotechnol* 2006;5(2):54-72.

88. Rafferty S, John M, Murphy G, Cassells AC. Lytic enzyme activity in peat is increased by substrate amendment with chitin: implications for the control of *Phytophthora fragariae* in *fragaria vesca*. *Folia Geobot* 2003;38:139-44.
89. Gomes RC, Semêdo LT, Soares RM, Alviano CS, Linhares LF, Coelho RR. Chitinolytic activity of actinomycetes from a cerrado soil and their potential in biocontrol. *Lett Appl Microbiol* 2000;30:146-50.
90. DeBoer, Gerards WS, Gunnewiek PJAK, Modderman R. Response of the chitinolytic microbial community to chitin amendments of dune soils. *Biol Fert Soils* 1999;29(2):170-7.
91. Manucharova O, Yaroslavtsev AM, Senchenko DV, Stepanov AL, Zvyagintsev DG. Microbial transformation of chitin in soil under anaerobic conditions. *Biol Bull* 2006; 33(2):191-4.
92. Manucharova NA, Belova EV, Vorob'ev AV, Polianskaia LM, Stepanov AL. Succession of chitinolytic microorganisms in Chernozem soil. *Mikrobiologia* 2005;74(5):693-8.
93. Leake JR, Read DJ. Chitin as a nitrogen source for mycorrhizal fungi. *Mycol Res* 1990; 94:993-5.
94. Hidalgo L, Argüelles W, Peniche C. Efecto de la quitosana en tratamientos a la semilla de tomate. *Rev Protección Veg* 1996; 11(1):37-9.
95. Freepons DE, inventor. Plant growth regulators derived from chitin. US Patent No. 4,964,894. 1990 Oct 23.
96. Rodríguez Y, Noval B, Ramírez M, Rodríguez P. Efecto de diferentes fuentes de quitina en el crecimiento de plántulas de tomate. *Cultiv Tropic* 1998;19(3):32-6.

Recibido en mayo de 2010. Aprobado en diciembre de 2010.