
INDUCCIÓN DE SUPRESIVIDAD A FITOPATÓGENOS DEL SUELO. UN ENFOQUE HOLÍSTICO AL CONTROL BIOLÓGICO

JULIANA BAUTISTA-CALLES, ROBERTO GARCÍA-ESPINOSA, JESÚS PÉREZ-MORENO, EMMA ZAVALETA-MEJÍA, ROBERTO MONTES-BELTMONT y RONALD FERRERA-CERRATO

RESUMEN

La supresividad del suelo a fitopatógenos es un concepto holístico que se ha pretendido explicar y manejar infructuosamente bajo el enfoque reduccionista, en la búsqueda del control biológico mediante el aislamiento de antagonistas específicos contra ciertos fitopatógenos y su reintroducción al suelo en cantidades aumentadas. Bajo el enfoque holístico, se revalora el concepto de supresividad como una propiedad emergente del sistema, que resulta de su propia complejidad y que no puede explicarse, y menos manejarse, desintegrando al sistema en sus componentes elementales. Su guía filosófica es la teoría general de sistemas y de la complejidad. La complejidad es precursora de la esta-

bilidad y, en ecología del suelo, la propiedad de autoorganización de los sistemas complejos puede conducir al surgimiento de la supresividad. En la presente revisión se analizan trabajos relacionados con la supresividad de suelos, que en general parecen indicar que bajo el enfoque reduccionista aquella no ha sido manejada de forma exitosa. Con el enfoque holístico existen mayores posibilidades de manejarla mediante cambios profundos en la estructura del sistema y así mejorar el control biológico. Finalmente, se analizan las perspectivas del estudio de la supresividad de suelos.

El enfoque atomista ha dominado las ciencias agrícolas durante el último siglo. Esta doctrina ha conducido a una marcada sobre-especialización, donde cada disciplina, aislada del conjunto social y de la tradición histórica de la que nació y en la que vive, suele dogmatizarse e ignorar sus supuestos y su funcionalidad (Sarabia, 1995). Como consecuencia, cada disciplina se ha convertido en un fin en sí misma y, con frecuencia, se ha aislado del

contexto social del que surgen las ciencias agrícolas.

La Fitopatología corre el riesgo de dogmatizarse e ignorar su funcionalidad. De hecho la especialización la ha colocado con frecuencia fuera del contexto ecológico, al menos cuando se ha buscado el manejo de enfermedades de la raíz. Es entonces necesario un nuevo enfoque, el sistémico, para lograr una aproximación a la realidad del productor, a los agroecosistemas y su patosistema,

así como para buscar un mejor balance ecológico. Es indispensable además una nueva visión del fenómeno del parasitismo que lo conciba como parte de la trama de la vida, constituido de componentes que interactúan a diferentes niveles de organización y siempre de manera compleja. En Fitopatología, el cambio de paradigma implicaría reconocer que en los sistemas agrícolas, por tratarse de sistemas de alta complejidad (sobre todo el patosistema de la raíz), las relaciones simples causa-

PALABRAS CLAVE / Antagonistas / Fitopatógenos del Suelo / Homeostasis / Rizosfera / Suelos Supresores / Teoría de la Complejidad /

Recibido: 05/10/2006. Modificado: 10/12/2007. Aceptado: 02/01/2008.

Juliana Bautista-Calles. M.C. y Estudiante de doctorado, Colegio de Postgraduados (COLPOS), México. Profesor Investigador, Benemérita Universidad de Puebla, México. Dirección: Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo. K. 36.5 carr. México-Texcoco. Montecillo, México. CP56230. e-mail: bjuliana@colpos.mx

Roberto García-Espinosa. Ph.D., University of Florida, EEUU. Profesor Investigador, COLPOS, Montecillo, México.

Jesús Pérez-Moreno. Ph.D., University of Sheffield, RU. Profesor Investigador, COLPOS, Montecillo, México.

Emma Zavaleta-Mejía. Ph.D., University of California, Riverside, EEUU. Profesor Investigador, COLPOS, Montecillo, México.

Roberto Montes-Belmont. Doctor en Ciencias, Universidad Autónoma de México, México. Profesor Investigador, Centro de Desarrollo de Productos Bióticos (CEPROBI), Instituto Politécnico Nacional, México.

Ronald Ferrera-Cerrato. Doctor en Ciencias, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional, México. Profesor Investigador, COLPOS, Montecillo, México.

efecto son la excepción y no la regla. Es necesario detectar los puntos de regulación o de control (atrayentes del sistema) y aprender la forma correcta de hacerlos funcionar para que se logre inducir el comportamiento del sistema de modo que el todo se oriente en el rumbo deseado.

Desde una nueva percepción, las únicas soluciones viables serán aquellas que resulten sostenibles. El concepto de sostenibilidad se ha convertido en un elemento clave en el movimiento ecológico y es crucial para el desarrollo de las ciencias agrícolas. El gran desafío actual es crear comunidades sostenibles, es decir, entornos sociales, culturales y científicos en los que podamos satisfacer nuestras necesidades y aspiraciones sin comprometer el futuro de las próximas generaciones (Capra, 1999). Sostenibilidad en Fitopatología significa independencia del uso de productos sintéticos en el mantenimiento de la sanidad y fertilidad de los agroecosistemas. La práctica del monocultivo y la contaminación debida al uso indiscriminado de agroquímicos han afectado de forma adversa a los agroecosistemas, causando su inestabilidad, lo que se manifiesta en una mayor agresividad de plagas y enfermedades en los cultivos, además de otros efectos nocivos. Sin embargo, un manejo ambientalmente sano y racional de las enfermedades de los cultivos se podrá lograr aceptando que el objetivo principal no debe ser el de eliminar al patógeno responsable de la enfermedad sino, más bien, que a pesar de su presencia se logren obtener rendimientos rentables para los agricultores (Zavaleta-Mejía, 1999). Lo anterior puede ser posible si se entiende mejor la naturaleza de la enfermedad, admitiendo que las enfermedades constituyen uno de los mecanismos de regulación en el funcionamiento del sistema; es decir, que las enfermedades son un factor de selección de los tipos de vegetación dentro del ecosistema.

La presente revisión tiene como finalidad revalorar el concepto de supresividad bajo el enfoque holístico dentro del control biológico, siguiendo la guía filosófica de la teoría general de sistemas y de la complejidad, visualizando a la supresividad a su vez como el punto de regulación de las especies fitopatógenas con origen en el suelo y como una propiedad emergente de la propia complejidad del sistema.

Perspectiva Holística en la Ciencia

La perspectiva holística ha sido conocida como “sistémica” y el modo de pensar como “pensamiento sistémico” (Capra, 1999). Esta perspectiva holística ha sido marginal en la ciencia,

incluyendo las ciencias agrícolas, como lo indica el hecho que los vocablos “holismo” y “holístico” han sido reconocidos por el Diccionario de la Real Academia Española solo recientemente, reconociendo como holismo a la “doctrina que propugna la concepción de cada realidad como un todo distinto de la suma de las partes que lo componen” y a las palabras holístico y holística como lo “perteneciente o relativo al holismo” (RAE, 2001).

Son dos las características esenciales del pensamiento sistémico, el cambio de énfasis de las partes al todo y la habilidad para focalizar la atención alternativamente en distintos niveles de sistemas (Capra, 1999). El cambio de énfasis de las partes al todo implica comprender que los sistemas vivos son totalidades integradas cuyas propiedades no pueden ser reducidas a las de sus partes más pequeñas. Sus propiedades esenciales o sistémicas, son propiedades del conjunto, que ninguna de las partes tiene por sí sola. Estas propiedades, denominadas emergentes, surgen de las relaciones organizativas entre las partes, es decir, de la configuración de relaciones ordenadas que caracterizan al sistema. Sin embargo, dichas propiedades son destruidas cuando el sistema es diseccionado en elementos aislados (Sarabia, 1995; Capra, 1999). Por su parte, la habilidad para focalizar la atención alternativamente en distintos niveles de sistemas implica que los sistemas vivos son un todo en el que se coordina cada uno de sus subsistemas pero constituyen, a su vez, parte de sistemas de niveles más altos; es decir, son todo y son parte. Son sistemas dentro de otros sistemas más complejos. De hecho el planeta tierra ha sido considerado como un superorganismo al cual se le ha denominado Gaia (Love-lock, 1992).

Autoorganización en Sistemas de Alta Complejidad

Para Capra (1999) el concepto de autoorganización (organización espontánea) emerge como el concepto central de la visión sistémica de la vida. La teoría moderna de la complejidad postula que a través de la organización espontánea los sistemas de elevada complejidad encuentran por sí mismos, las formas óptimas de organización y funcionamiento. Estipula también que deben mantenerse a un mínimo los controles externos, que son los que vulneran al sistema y lo llevan al borde del colapso. Un ejemplo de la propiedad de autoorganización de los sistemas de elevada complejidad es la que se observa en la supresividad. Es probable que la supresividad a ciertas especies de patógenos, observada

de manera general en ecosistemas naturales, se deba a la elevada complejidad tanto estructural como de comportamiento de las especies de microorganismos que en ellos interactúan. Es factible entonces que en los agroecosistemas la supresividad pudiera surgir al estimular la complejidad, por ejemplo al incrementar la diversidad de antagonistas a fitopatógenos con origen en el suelo (García, 2000).

En un sistema, la complejidad es precursora de estabilidad, según observó Jim Drake, ecólogo de la Universidad de Purdue, EEUU, quien en su modelo computarizado de simulación del proceso de la evolución y empleando poderosos equipos de cómputo, introdujo 125 diferentes “especies” (en realidad números) bajo un arreglo específico de condiciones ambientales. Al final del análisis el programa obtuvo una comunidad persistente (homeostasis), compuesta de 15 de las 125 “especies” originales. Tras repetir el análisis con las mismas especies, volvió a obtener comunidades persistentes con aproximadamente el mismo número de “especies” resultantes que en los intentos anteriores. Finalmente intentó reconstruir la comunidad mediante las especies contenidas en cualquiera de las comunidades anteriormente persistentes, es decir introdujo solo un grupo de las 15 especies, que resultaron persistentes en uno de los análisis anteriores y en esa ocasión la homeostasis no surgió. Es decir, fue necesario el “proceso” de evolución de toda la complejidad introducida (las 125 especies) para que emergiera la propiedad de homeostasis. De estos experimentos Drake derivó dos conclusiones: i. La composición de especies en la comunidad persistente es una propiedad emergente de la complejidad inicial y se deriva de las interacciones entre todas las especies originales de la comunidad y no de solo algunas en particular. ii. Existen especies que son eliminadas y otras que persisten, ambas resultantes de la interacción local de cada sistema, donde aparecen distintos patrones de conducta entre las “especies” (competencia o simbiosis); estas se autoorganizan de manera crítica hasta encontrar el equilibrio y sobreviven las más aptas de acuerdo a cada sistema dinámico complejo (Lewin, 1992).

Los Enfoques Reduccionista y Holístico en Control Biológico

Aunque el término más apropiado pareciera “manejo biológico”, dado que el uso de la palabra “control” significa tener dominio sobre algo y, respecto a enfermedades de la raíz, se está muy lejos de ello, en este escrito se acepta la corriente dominante del uso del tér-

mino control, en virtud de que se reconoce el origen entomológico del concepto, materia en la cual, efectivamente, en la mayoría de los casos se logra el dominio de la situación parasítica. Se acepta también que el término es en general más usado; de hecho, la búsqueda en bases de datos de bibliografía empleando “manejo biológico” no rinde información.

La primera definición de control biológico en fitopatología fue acuñada por Baker y Cook en 1974 como “... la reducción de la densidad de inóculo o de las actividades inductoras de enfermedad de un patógeno o parásito en su estado activo o dormante, por uno o más organismos, que se logra de manera natural o a través de manipulación del ambiente, el hospedante, el antagonista, o por introducción en masa de uno o más antagonistas...”. Tiempo después la definición fue cambiada a “La reducción de la cantidad de inóculo o de las actividades inductoras de enfermedad de un patógeno que se logra mediante la acción de uno o más organismos además del hombre” (Cook y Baker, 1983). En 1987 la Academia Nacional de Ciencias de EEUU definió al control biológico, según Erwin y Ribeiro (1996) como “El uso de organismos naturales o modificados, genes o productos de genes para reducir el efecto de organismos indeseables (plagas) y favorecer organismos deseables como cultivos, árboles, animales e insectos y microorganismos benéficos”. Gabriel y Cook (1990) mencionaron que el control biológico debe incluir organismos (hiperparásitos y antagonistas) naturales o genéticamente modificados por recombinación genética y genes o productos de genes, así como hospederos resistentes. En general las definiciones de control biológico, cuanto más recientes más enfatizan el enfoque reduccionista, respecto al enfoque holístico.

El control biológico en Fitopatología ha buscado la introducción y establecimiento generalmente de solo un aislamiento de determinada cepa antagonista que, en grandes cantidades, es introducido en el suelo contra uno o varios fitopatógenos con origen en el suelo (Papavizas, 1981; Berger *et al.*, 1996; Larena *et al.*, 2002; Jacobsen *et al.*, 2004). Sin embargo, debido a la homeostasis del suelo no es frecuente lograr el establecimiento del antagonista (Gindrat, 1979) y el control biológico con este enfoque no ha resultado exitoso. La introducción de antagonistas comenzó a ser practicada en la agricultura en 1927 y desde entonces, de cientos de antagonistas identificados como candidatos potenciales solo algunos han sido formulados para uso comercial en enfermedades. De estos pocos, apenas ~5% de tales agentes han conseguido

su objetivo (Desai *et al.*, 2002). Los trabajos con antagonistas reportados como exitosos bajo condiciones de laboratorio e invernadero (Papavizas, 1981; Berger *et al.*, 1996; Larena *et al.*, 2002) no lo han sido en campo. Bajo condiciones de campo raras veces se ha conseguido el control eficiente de fitopatógenos (Suslow y Schroth, 1982; Schippers *et al.*, 1987; Capper y Higgins, 1993) y pocos agentes de biocontrol han mostrado estabilidad en la práctica comercial a pesar de los muchos trabajos publicados. Los que se han reportado como exitosos bajo condiciones de campo no muestran estabilidad y no logran establecerse en el mercado de productos para el manejo de enfermedades, principalmente por la variabilidad de las condiciones ambientales en el campo que afectan la supervivencia, actividad y producción de antibióticos de los inoculantes de biocontrol (Weller, 1988).

El problema parece ser el reduccionismo con el que se enfoca la búsqueda del control biológico, el pretender manejar todo un sistema de elevada complejidad, con base en solo una especie antagonista, aumentada masivamente e introducida directamente al suelo. Una aproximación para lograr el aumento en la eficiencia del control biológico contra fitopatógenos ha sido el empleo de antagonistas en consorcios (Dandurand y Knudsen, 1993; Janisiewicz, 1996; García, 2007), los que pueden lograr mayor efectividad en suprimir la enfermedad que la aplicación de antagonistas individuales (Jacobsen *et al.*, 2004). Sin embargo, hasta la fecha los trabajos empleando antagonistas en consorcios no han sido realizados en campo.

Existe controversia acerca de los límites del concepto de control biológico y la misma es resuelta adoptando las definiciones que mejor se ajusten a la filosofía de los investigadores. De acuerdo a la situación actual del control biológico en las ciencias agrícolas y con el cambio de paradigma propuesto, la definición adoptada en el presente trabajo es la de Baker y Cook (1974). Esta definición tiene un enfoque holístico, ya que incluye un sin fin de métodos alternativos al control químico que pueden emplearse solos o en combinación. Por ejemplo, variedades resistentes, fechas de siembra, solarización, acolchado del suelo mediante plásticos degradables, rotación y asociación de cultivos, incorporación al suelo de residuos de plantas y materia orgánica, aplicación de antagonistas, etc. (Zavaleta-Mejía, 1999). Estas prácticas disminuyen la incidencia de la enfermedad o su impacto en la producción de cultivos y reducen el empleo de los pesticidas protegiendo al ambiente.

La Supresividad de Suelos como Propiedad Emergente en el Control Biológico

La supresividad puede ser considerada como parte de la capacidad de homeostasis de los ecosistemas estables; es decir, de su resistencia al cambio, la cual impide o frena la introducción o el éxito de especies foráneas y logra resistencia a otros cambios (García, 2000). La supresividad de suelos a enfermedades de la raíz implica cierto balance en la ecología del suelo que resulta en estabilidad de su productividad en razón de la ausencia o impacto reducido de enfermedades que, normalmente, serían destructivas en determinada región y cultivo. Así, un suelo supresor a ciertos patógenos es aquel donde un patógeno no puede establecerse, y de hacerlo causa daños mínimos o inicialmente severos que disminuyen con el monocultivo continuo (Hornby, 1979; Schneider, 1982). Cuando existen condiciones apropiadas para que en determinado agroecosistema exista una enfermedad con origen en el suelo, pero su incidencia y daños están ausentes o su expresión es leve, se dice que el “potencial de enfermedad” de ese suelo es mínimo y esto se debe a que existe la posibilidad de que se trate de un suelo supresor a esa enfermedad (Huber y Schneider, 1982). Bajo el enfoque holístico y de la teoría de la complejidad, la supresividad del suelo es una propiedad emergente del sistema que resulta de su propia complejidad; el fenómeno no puede ser explicado y menos manejado diseccionando el sistema para conocer los componentes elementales, ya que ninguno de esos componentes puede explicarla por sí solo.

La Supresividad del Suelo Puede Ser Manejada

Existen trabajos que ilustran los mecanismos de la supresividad y demuestran que ésta puede ser transferida (Huber y Schneider, 1982) e inducida (Damian y García, 1994). Sin embargo, la supresividad también puede ser eliminada (García, 2000). Hasta una pequeña proporción (1-10%) de suelo supresor mezclado con suelo conductivo, es decir con suelo que es favorable al desarrollo de una epidemia, otorga supresividad a la mezcla (Baker, 1980; Scher y Baker, 1980; Alabouvette *et al.*, 1985), lo cual indica que la supresividad del suelo se debe, en gran parte o totalmente, al componente microbiano del suelo. Así, la posibilidad de que la supresividad pueda ser transferida a suelos con elevado potencial de enfermedad ha sido una idea provocativa de quienes han trabajado con el concepto de

supresividad (Baker y Cook, 1974). Por lo tanto, resulta atractiva la alternativa de transformar un suelo conductivo en uno supresor a ciertos fitopatógenos con origen en el suelo. El concepto de supresividad a fitopatógenos por parte de ciertos suelos está bien documentado en diversas partes del mundo (Cook y Baker, 1983; Linderman *et al.*, 1983), lo que ha contribuido a su aceptación generalizada para ser empleada en el control biológico. Sin embargo, el fenómeno aún no está suficientemente entendido como para ser aplicado en campo.

En México se ha documentado la inducción de supresividad contra enfermedades de la raíz, como es el caso de la tristeza del aguacatero, donde un grupo interdisciplinario, bajo una perspectiva holística, logró inducir supresividad contra *Phytophthora cinnamomi* mediante cambios estructurales profundos en el sistema, tales como aplicación de dosis elevadas de estiércol bovino fresco solo o con paja de alfalfa o con un fungicida selectivo, riego dirigido e individualizado de árboles y poda drástica de rejuvenecimiento. La supresividad fue tal que se observó una recuperación de los árboles afectados, permitiendo el desarrollo del llamado "Sistema Colegio de Postgraduados de manejo de la tristeza del aguacatero" (Téliz *et al.*, 1990; Rodríguez *et al.*, 1992; Damián y García, 1994).

La supresividad también puede ser eliminada por la transformación de los ecosistemas naturales a agroecosistemas, lo que conlleva cambios estructurales profundos, tan drásticos en la estructura y funcionamiento de la ecología del suelo que se manifiestan como una pérdida en la capacidad de suprimir a los patógenos presentes o introducidos, de manera que el potencial de enfermedad se incrementa rápidamente por la destrucción de la capacidad supresora de los suelos. Ello explica el abandono de tierras por el "cansancio" de los suelos (productividad reducida y económicamente no redituable). También en algunos sistemas agrícolas tradicionales donde es frecuente observar suelos supresores a ciertos fitopatógenos, la introducción de prácticas modernas, que pretenden maximizar y no optimizar la producción, destruyen la supresividad. Un ejemplo es el agroecosistema Chinampa, en Xochimilco, donde, si bien existen suelos supresores a ciertas enfermedades de la raíz, también existen ciertas zonas del mismo agroecosistema donde desde hace años se han adoptado prácticas tales como fertilización química y control de plagas y enfermedades con agroquímicos, donde la supresividad contra *Pythium* spp. y *Rhizoctonia solani* ha

desaparecido, causando severos daños a los cultivos (García, 2000).

Agroecosistemas con Supresividad de Suelos a Enfermedades de la Raíz

Existen ejemplos bien documentados sobre la existencia de suelos supresores a ciertos fitopatógenos, como los suelos que inhiben las actividades de *Gaeumanomyces graminis* var. *tritici*, *Fusarium oxysporum*, *Phymatotrichum omnivorum* = *Phymatotrichopsis omnivora*, *Phytophthora cinnamomi*, *Pythium* spp., *Rhizoctonia solana*, *Streptomyces scabies*, *Sclerotium cepivorum*, y *Sclerotium oryzae*, entre otros (Smit y Snyder, 1972; Baker y Cook, 1974; Zentmyer, 1980; Cook y Baker, 1983; Alabouvette *et al.* 1985). El fenómeno no se limita a especies de hongos y actinomicetos fitopatógenos sino que también hay suelos supresores a fitonematodos (Rodríguez-Kábana *et al.*, 1987). Hay algunos agroecosistemas como en Japón cuyos suelos volcánicos, con alto contenido de humus, son supresores a *Fusarium oxysporum* f. sp. *raphani* que induce amarillamiento en rábano (Komada, 1975). Suelos de Honduras muestran mecanismos de regulación que condicionan la supresividad en el caso del mal de Panamá (Cook, 1982), enfermedad que es más común en suelos ácidos que en alcalinos (Baker y Cook, 1974) y donde se observa una reacción inversa entre el contenido de arcilla montmorillonítica y la capacidad de desarrollo del patógeno en el suelo (Stotzky y Martin, 1963); las características de los suelos favorecen la actividad microbiana y en especial la de las bacterias que son desfavorables para el desarrollo del agente causal, *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. En California, en los valles de San Joaquín y Salinas, las enfermedades por *Fusarium* spp. no son de importancia en la producción hortícola (Cook y Baker, 1983). El valle hortícola del Ródano, en Châteaurenard, Francia, región con tradición en la producción de hortalizas, no se ve afectada por fusariosis (Piason, 1999).

En México se han encontrado dos agroecosistemas con suelos supresores a ciertas enfermedades de la raíz: i. El de chinampas, en Xochimilco, es un claro ejemplo de la supresividad de suelos contra enfermedades inducidas por *Pythium aphanidermatum* (Lumsden *et al.*, 1981; Lumsden *et al.*, 1990), *Meloidogyne* spp (Zuckerman *et al.*, 1989; Marban *et al.*, 1992) y *Rhizoctonia solani* (García, 1994). ii. El de rotación maíz-frijol terciopelo (*Mucuna deeringiana*), practicado por los Chontales de Tabasco, con naturaleza supresora de suelos contra enfermedades de la raíz en el cultivo de

maíz. El sistema está basado en la rotación con leguminosas tropicales, principalmente el llamado frijol terciopelo o nescafé (*Mucuna deeringiana*), y también se ha trabajado con frijolón (*Canavalia ensiformis*), chícharo gandul (*Cajanus cajan*) y "kudzu" (*Pueraria phaseoloides*), los cuales, como cultivos de rotación previos al maíz, permiten la recuperación en productividad de suelos cansados. Los estudios sobre la mayoría de estas rotaciones permiten afirmar que, además de aumentar la fertilidad de los suelos, por la importante aportación de materia orgánica, inducen supresividad al reducir la incidencia de enfermedades de raíz en las plantas (Maciel y García, 1986; Granados *et al.*, 1990; Quiroga *et al.*, 1992; García, 1994; García de la Cruz *et al.*, 2005) e inducen otros cambios estructurales y funcionales en el agroecosistema, como el control de malezas y la fertilización (González *et al.*, 1990).

Estudios con Complejidad Creciente de Antagonistas a Fitopatógenos

La esterilización por calor, fumigación, radiación o cualquier otro medio, al eliminar el componente biológico del suelo, en la mayoría de los ejemplos conocidos, elimina por completo a la supresividad (Hornby, 1983). Es por tanto el componente microbiano de los suelos el responsable de la supresividad.

Guiado por las ideas descritas por Drake y su modelo de simulación de la evolución en computadora (Lewin, 1992), García (2007) preparó sustratos para la germinación de semillas y los esterilizó (proceso equivalente a borrar la información de la computadora), e introdujo en el sustrato números crecientes de aislamientos de antagonistas, pero en este caso las especies no son programas, sino seres vivos. La disminución de la incidencia de enfermedad significa la aparición de homeostasis y la inducción de supresividad. En invernadero, García intentó inducir supresividad de suelos contra la marchitez del jitomate por medio de complejidad creciente de antagonistas a fitopatógenos. Se emplearon tres grupos de antagonistas consistentes en hongos con capacidad antibiótica (HA), hongos con capacidad micoparasítica (HM) y bacterias con capacidad antibiótica (BA). Cada grupo estuvo constituido por seis aislamientos con los que se prepararon siete sustratos (tratamientos con diversos complejos de antagonistas): HA, HM, BA, HA+HM, HA+BA, HM+BA, y HA+HM+BA. En cada sustrato con 0 (testigo sin antagonistas), 6, 12 y 18 antagonistas, germinaron semillas de frijol terciopelo (*Mucuna deeringiana*) que pos-

teriormente fueron transplantadas a macetas con suelo infestado de *Fusarium oxysporum f. sp. radici lycopersici* (FORL). La leguminosa se desarrolló, luego se cortó y se dejó como cobertura sobre el suelo y sobre ésta se transplantaron plántulas de jitomate. Se observó una notable e inesperada respuesta de mayor vigor del frijol terciopelo en el sustrato que contenía organismos antagonistas, mayor cuanto mayor era la complejidad de la composición microbiana incluida. Esta relación de mayor vigor con 18 antagonistas que con el resto de los tratamientos se mantuvo aun después del trasplante de la leguminosa a un suelo infestado con FORL. El mayor vigor a mayor complejidad podría deberse al efecto de organismos promotores del crecimiento radical (Klopper *et al.*, 1980). Respecto a las plantas de jitomate sembradas en el segundo ciclo, donde no hubo siembra previa de la leguminosa las plántulas fueron prácticamente destruidas, mientras que en aquellos tratamientos que incluyeron la siembra previa de la leguminosa y que además fueron germinadas en suelos con complejidad creciente de antagonistas resultaron más sanas y productivas, de acuerdo al número de plantas muertas y el número de frutos por tratamiento. Otro experimento realizado en invernadero con complejidad ascendente, de 0, 10, 20 y 30 antagonistas, resultó en una supervivencia de plantas significativamente mayor a mayor complejidad de antagonistas al trasplante, tanto en plántulas de chile como de jitomate, al ser transplantadas en suelo fuertemente infestado con *Phytophthora capsici* (García, 2007).

Los trabajos reseñados no solo pretendieron manejar todo un sistema de elevada complejidad, con base en solo una especie antagonista aumentada masivamente e introducida directamente al suelo, sino que emplearon antagonistas en consorcios que formaron parte de la microflora de la rizosfera de los cultivos, para lograr el aumento en la eficiencia contra fitopatógenos.

Futuro del Estudio de la Supresividad de Suelos en México

En un ensayo crítico sobre supresividad, Hornby (1983) resaltó el interés creciente sobre el tema que se refleja en la abundante literatura generada sobre el mismo, pero enfatizó que desde el punto de vista conceptual no encontró nada nuevo. También que hasta que no se conozcan los mecanismos de la supresividad, el posible control biológico de enfermedades mediante su manejo permanecerá empírico, no confiable y no divulgable. Por su parte, Gabriel y Cook (1990) remarcaron la falta notoria de un marco

científico apropiado para el desarrollo de la investigación sobre el tema de supresividad. Al parecer, la frustración que se observa en tales opiniones surge del enfoque reduccionista imperante hasta ahora en la investigación sobre supresividad; es decir, surge de la aparente contradicción entre generar un concepto holístico, supresividad, y el intento de explicarlo y manejarlo de manera reduccionista, con base en el funcionamiento de solo algunos componentes del sistema.

Bajo la perspectiva de sistemas, cuando se pretenden inducir cambios profundos en el comportamiento de un sistema se deben realizar cambios profundos en su estructura (Briggs y Peat, 1994). Cabe remarcar que los mecanismos de regulación del comportamiento no son fáciles de evidenciar en ningún sistema, por lo que no es fácil descubrir la manera correcta de influir en ellos para lograr el efecto deseado. Dada la naturaleza compleja de las interacciones microbianas que tienen lugar en el suelo y que impiden que los patógenos de la raíz sean exitosos en los suelos supresivos, bajo el enfoque holístico la investigación y el manejo de sistemas agrícolas debe empezar por reconocer que, si existe un suelo supresor a ciertos fitopatógenos, hay que conservar su estructura y que si se desea inducir supresividad a un suelo donde las enfermedades causan devastación, hay que empezar por hacer cambios profundos en su estructura. Pese a todos los productos químicos con que se cuenta en la actualidad para contender con los parásitos agrícolas, si lo que se busca es un balance biológico de larga duración (sustentable), existen solo unos pocos mecanismos de regulación donde intervenir para producir cambios significativos, pero ni estos, ni la forma correcta de influir en ellos, son obvios.

Existen mecanismos de regulación que condicionan la supresividad y que están relacionados con el tipo de suelo, como es el caso del mal de Panamá, en Honduras (Cook, 1982). Otros están relacionados con la microflora nativa, como la supresividad en las chinampas de México (Lumsden *et al.*, 1981; Zuckerman *et al.*, 1989; Lumsden *et al.*, 1990; Marban *et al.*, 1992; García, 1994). El más claro mecanismo de regulación de la supresividad en los suelos de agroecosistemas tradicionales en México parece ser la alta diversidad de especies cultivadas en forma de rotación o de cultivos intercalados o asociados y el mantenimiento de elevados contenidos de materia orgánica (Maciel y García, 1986; Granados *et al.*, 1990; Quiroga *et al.*, 1992; García, 1994). Este mecanismo demuestra que la agricultura puede ser sustentable y

que la estabilidad de muchos años proporciona un balance biológico en el suelo que induce su capacidad supresora. Otros mecanismos de regulación que parecen inducir la supresividad, son la incorporación de abonos verdes y los suplementos de materia orgánica (Rodríguez-Kábana *et al.*, 1987). Thurston (1992), basado en los cronistas españoles de la época de la conquista, destacó la importancia y amplio uso en el nuevo mundo de sistemas tradicionales de siembra con cobertura, basados en roza-cubre (*slash and mulch*), a los que considera más importantes que el roza-tumba-quema (*slash and burn*). En su experiencia, conociendo la gravedad de las enfermedades de la raíz en cultivos anuales en regiones cálido-húmedas, resalta la importancia de estos sistemas que logran abatir considerablemente su incidencia y daños, permitiendo productividad sostenible; característica que no logran los sistemas de producción que se ha intentado transplantar de las regiones templadas a las regiones cálido-húmedas. A pesar de ello, existe muy poca literatura al respecto y la mayoría de los trabajos han sido realizados, en América Latina (Panamá, Colombia y Ecuador), en sistemas donde las enfermedades con origen en el suelo parecen no afectar a los cultivos (Abawi y Thurston, 1994).

En México, los trabajos de García de la Cruz *et al.* (2005) y de García (2007) parecen señalar un camino a seguir. García de la Cruz *et al.* (2005) con solo la rotación de leguminosas logró inducir supresividad. Mediante el sistema de roza-cubre y el empleo de diversas leguminosas en la rotación logró abatir la incidencia de *Phytophthora* y otros patógenos, principalmente con frijol terciopelo (*Mucuna deeringiana*), en el cultivo de piña. Según García (2007) cuando se empleó esa misma leguminosa como cultivo de rotación, con la previa introducción de una complejidad creciente de antagonistas en los sustratos de germinación, se observó la inducción de supresividad de suelos a ciertos patógenos en el ciclo de las solanáceas (jitomate y chile).

Existe la posibilidad de inducir supresividad mediante la introducción al suelo de complejos de antagonistas aislados de suelos supresores, como colonizadores de la rizosfera del chile (*Cap-sicum annuum*) o de las leguminosas (*M. deeringiana* o *Pachyrrizus erosus*) empleadas en la rotación previa al establecimiento del cultivo principal. Al menos eso indican los resultados de experimentos realizados en invernadero y campo, donde al introducir una complejidad creciente de 0, 8, 16, 24 y 32 antagonistas en los sustratos de germinación del cultivo principal, chile, todos los tratamientos con

antagonistas redujeron la incidencia de *P. capsici* en comparación con el testigo. En otros experimentos donde se introdujo la mayor complejidad (32 aislamientos diferentes) de antagonistas en los sustratos de germinación de leguminosas empleadas en la rotación, siempre se obtuvieron mayores rendimientos del cultivo principal (chile) en el segundo ciclo de cultivo y menor incidencia de *P. capsici* por la sola rotación con las leguminosas, aunque no siempre debido a la presencia de los antagonistas.

Se debe cambiar profundamente la estructura del sistema para lograr un cambio en el comportamiento del patosistema. Los ejemplos anteriores documentan la introducción de microflora antagonista, como colonizadora de raíces del cultivo principal y de leguminosas de crecimiento radical portentoso y estas raíces a su vez como vehículo de la flora antagonista, como un cambio suficiente a la estructura para lograr un cambio en el comportamiento del sistema. Ante la imposibilidad de trasladar toda la diversidad biológica presente en un suelo supresor a ciertas enfermedades, los trabajos citados utilizaron organismos con cierta capacidad probada de antibiosis o micoparasitismo para antagonizar *in vitro* a importantes patógenos como *P. capsici*, no solo en diversidad numérica o taxonómica de antagonistas introducidos al sistema en cantidades aumentadas, sino que la diversidad formó parte de la microflora de la rizosfera de las leguminosas empleadas en la rotación o del cultivo principal. Lo anterior parece una forma posible de inducir cambios en la estructura del sistema para lograr el nuevo balance favorable a la supresividad y adopta un nuevo enfoque del estudio del control biológico. Sin embargo, cambiar la estructura y el comportamiento de los complejos patosistemas edáficos para abatir la incidencia y daños de las enfermedades inducidas por fitopatógenos con origen en el suelo, requerirá descubrir los mecanismos de control y la forma correcta de influir en ellos en cada agroecosistema.

REFERENCIAS

- Abawi GS, Thurston HD (1994) Efecto de las coberturas y enmiendas orgánicas en el suelo y de los cultivos de cobertura sobre los patógenos del suelo y las enfermedades radiculares. Una revisión. En Thurston HD, Smith M, Abawi GS, Kears S (Eds.) *Tapado. Los Sistemas De Siembra Con Cobertura*. Cornell University Press. Ithaca NY, EEUU. pp. 97-108.
- Alabouvette C, Couteaudier Y, Louvet J (1985) Soils suppressive to *Fusarium* wilt: Mechanisms and management of suppressiveness. En Parker CA, Rovira AD, Moore KJ, Wong PTW (Eds.) *Ecology and Management of Soilborne Plant Pathogens*. American Phytopathological Society. St. Paul, MN, EEUU. pp. 101-106.
- Baker R (1980) Measures to control *Fusarium* and *Phialophora* wilt pathogens of carnation. *Plant Dis.* 64: 743-749.
- Baker KF, Cook RJ (1974) *Biological Control of Plant Pathogens*. Freeman. San Francisco, CA, EEUU. 432 pp.
- Berger F, Li H, White D, Frazer R, Leifert C (1996) Effect of pathogen inoculum, antagonist density, and plant species on biological control of *Phytophthora* and *Pythium* damping-off by *Bacillus subtilis* Cot1 in high-humidity fogging glasshouses. *Phytopathology* 86: 428-433.
- Briggs J, Peat FD (1994) *Espejo y Reflejo, del Caos al Orden*. Gedisa. Barcelona, España. 222 pp.
- Capper AL, Higgins KP (1993) Application of *Pseudomonas fluorescens* isolates to wheat as potential biocontrol agents against take-all. *Plant Pathol.* 42: 560-567.
- Capra F (1999) *La Trama de la Vida. Una Nueva Perspectiva de los Sistemas*. Trad. Sempau D. 2ª ed. Anagrama. Barcelona, España. 367 pp.
- Cook RJ (1982) Use of pathogen suppressive soils for disease control. En Schneider RW (Ed.) *Suppressive Soils and Plant Disease*. American Phytopathological Society Press. St. Paul, MN, EEUU. pp. 51-65.
- Cook RJ, Baker KF (1983) *The Nature and Practice of Biological Control of Plant Pathogens*. American Phytopathological Society Press. St. Paul, MN, EEUU. 539 pp.
- Damian CA, García ER (1994) Actinomicetos y su efecto antagonístico sobre *Phytophthora cinnamomi* Rands (Tristeza del Aguacatero) bajo la incorporación de dos mejoradores orgánicos del suelo y un fungicida. *Revista Chapingo* 1: 7-10.
- Dandurand LM, Knudsen GR (1993) Influence of *Pseudomonas fluorescens* on hyphal growth and biocontrol activity of *Trichoderma harzianum* in the spermosphere and rhizosphere of pea. *Phytopathology* 83: 265-270.
- Desai S, Reddy MS, Kloepper JW (2002) Comprehensive Testing of Biocontrol Agents. En Gnanamanickam SS (Ed.) *Biological Control of Crop Diseases*. Dekker. New York, NY, EEUU. pp 387-420.
- Erwin DC, Ribeiro OK (1996) *Phytophthora. Diseases Worldwide*. American Phytopathological Society Press. St. Paul, MN, EEUU. pp. 145-184.
- Gabriel CJ, Cook RJ (1990) Biological control, the need for a new scientific framework. *Bioscience* 40: 204-207.
- García de la Cruz R, Palma-López DJ, García-Espinosa R, Rodríguez-Guzmán MP, González-Hernández H (2005) Effect of legumes rotation on pineapple root disease in Hui-manguillo, Tabasco, México. *Acta Horticult.* 666: 247-256.
- García ER (1994) Root pathogens in the agroecosystems of Mexico. En Etcheverts-B JD (Ed.) *Trans. 15th World Cong. Soil Science.* Volume 4a. International Society of Soil Science. Acapulco, Mexico. pp. 30-44.
- García ER (2000) Algunos trabajos en México sobre caracterización e inducción de supresividad de suelos a enfermedades de la raíz. En Quintero-Lizaola R, Reyna-Trujillo T, Corlay-Chee L, Ibáñez-Huerta A, García-Calderón NE (Eds.). *La Edafología y sus Perspectivas al Siglo XXI*. Universidad Nacional Autónoma de México-Colegio de Posgraduados-Universidad Autónoma Chapingo. México. pp. 306-317.
- García ER (2007) Control biológico y supresividad En Ferrera CR, Alarcón A (Eds.) *Microbiología Agrícola para el siglo XXI*. Trillas. México. pp. 328-341.
- Gindrat D (1979) Biocontrol of plant diseases by inoculation of fresh wounds, seeds. And soil with antagonists. En Schippers B, Gams W (Eds.) *Soil-Borne Plant Pathogens*. Academic Press. New York, NY, EEUU. pp. 537-551.
- González ChMC, Ferrera-CR, García ER, Martínez GA (1990) La fijación biológica de nitrógeno en un agroecosistema de bajo ingreso externo de energía de Tamulté de la sabana, Tabasco. *Agrociencia* 1: 133-153.
- Granados AN, García ER, Zavaleta ME, Ferrera-CR, Castillo MA, Cid del Prado VI, Rodríguez GMP (1990) Pérdidas de grano por fitopatógenos del suelo en maíz monocultivo y rotado con leguminosas de cobertura en Tabasco, Mex. *Rev. Mex. Fitopatol.* 8: 135-144.
- Hornby D (1979) Take-all decline: a theorist's paradise. En Schippers B, Gams W (Eds.) *Soil-Borne Plant Pathogens*. Academic Press. New York, NY, EEUU. pp. 133-156.
- Hornby D (1983) Suppressive soils. *Annu. Rev. Phytopathol.* 21: 65-85.
- Huber DM, Schneider RW (1982) The description and occurrence of suppressive soils. En Schneider RW (Ed.) *Suppressive Soils and Plant Disease*. American Phytopathological Society Press. St. Paul, MN, EEUU. pp. 1-7.
- Jacobsen BJ, Zidack NK, Larson BJ (2004) The role of *Bacillus*-based biological control agents in integrated pest management systems: Plant diseases. *Phytopathology* 94: 1272-1275.
- Janisiewicz W (1996) Ecological diversity, niche overlap, and coexistence of antagonists used in developing mixtures for biocontrol of postharvest disease of apples. *Phytopathology* 86: 473-479.
- Kloepper JW, Leong J, Teintze M, Schroth MN (1980) Enhanced plant growth by siderophores produced by plant growth-promoting rhizobacteria. *Nature* 286: 855-886.
- Komada H (1975) Development of a selective medium for quantitative isolation of *Fusarium oxysporum* from natural soil. *Rev. Plant Protect. Res.* 8: 114-125.
- Larena I, Melgarejo P, De Cal A (2002) Production, survival, and evaluation of solid-substrate inocula of *Penicillium oxalicum*, as a biocontrol agent against *Fusarium* wilt of tomato. *Phytopathology* 92: 863-869.
- Lewin R (1992) Stability and the reality of Gaia. In: *Complexity, Life at the Edge of Chaos*. Macmillan. Nueva York, EEUU. pp. 106-129.
- Linderman RG, Moore LW, Baker KF, Cooksey DA (1983) Strategies for detecting and characterizing systems for biological control of soilborne plant pathogens. *Plant Dis.* 67: 1058-1064.
- Lovelock J (1992) *Gaia: una ciencia para curar el planeta*. Integral. Barcelona, España. pp. 57-62.
- Lumsden RD, García-ER, Lewis JA, Frías-T GA (1990) Reduction of damping-off disease in soils from indigenous Mexican agroecosystems. En Gliessman SR (Ed.) *Agroecology. Researching The Ecological Basis For Sus-*

- tainable Agriculture*. Springer. Nueva York, NY, EEUU. pp. 83-103.
- Lumsden RD, Lewis JA, García ER, Frías TGA (1981) Suppression of pathogens in soils from traditional Mexican agricultural systems. *Phytopathology* 71: 891-892.
- Maciel ID, García ER (1986) Efecto de la siembra previa de tres leguminosas tropicales sobre el cultivo del maíz y sus fitopatógenos del suelo. *Rev. Mex. Fitopatol.* 4: 98-108.
- Marbán MN, García ER, Dicklow BM, Zuckerman BM (1992) Studies on *Paecilomyces marquandii* from nematode suppressive chinampa soils. *J. of Chem. Ecol.* 18: 775-783.
- Papavizas GC (1981) Survival of *Trichoderma harzianum* in soil and in pea and bean rhizospheres. *Phytopathology* 71: 121-125.
- Piason FJ (1999) *France: organic food report 1999*. USDA Foreign Agricultural Service. Washington, DC, EEUU. www.fao.org/DO-CREP/004/Y1669S/y1669s08.htm
- Quiroga MRR, García ER, Zavaleta ME, Rodríguez GP (1992) Impacto reducido del patosistema edáfico del maíz (*Zea mays* L.) en el sistema de rotación maíz-calabaza-frijol terciopelo (*Stizolobium deeringianum* Bort.) en Tabasco, México. *Rev. Mex. Fitopatol.* 10: 103-115.
- Real Academia Española (2001) *Diccionario de la Lengua Española*. 22ª ed. Tomo II. pp. 1222-1223.
- Rodríguez GMP, García ER, Téliz OD, Salazar GS (1992) Ecología de la enfermedad "tristeza del aguacatero" bajo manejo experimental del cultivo del aguacate en la región de Atlxco, Puebla, México. *Agrociencia, Ser. Protección Vegetal* 3: 115-135.
- Rodríguez-Kábana R, Morgan-Jones G, Chet I (1987) Biological control of nematodes: Soil amendments and microbial antagonists. *Plant Soil* 100: 237-247.
- Sarabia AA (1995) *La Teoría General de Sistemas*. 1ª ed. Gráficas Marte. Madrid, España. 171 pp.
- Scher FM, Baker R (1980) Mechanism of biological control in a *Fusarium*-suppressive soil. *Phytopathology* 70: 412-417.
- Schippers B, Bakker AW, Baker PAHM (1987) Interactions of deleterious and beneficial rhizosphere organisms and the effect of cropping practices. *Annu. Rev. Phytopathol.* 25: 339-358.
- Schneider RW (1982) *Suppressive Soils and Plant Disease*. The American Phytopathological Society Press. St. Paul, Minnesota. 88 p.
- Smit SN, Snyder WC (1972) Germination of *Fusarium oxysporum* chlamydospores in soils favorable and unfavorable to wilt establishment. *Phytopathology* 62: 273-277.
- Stotzky G, Martin RT (1963) Soil mineralogy in relation to the spread of *Fusarium* wilt of bababa in Central America. *Plant Soil* 18: 317-337.
- Suslow TV, Schroth MN (1982) Rhizobacteria in sugar beets: Effects of seed application and root colonization on yield. *Phytopathology* 72: 199-206.
- Téliz OD, García ER, Mora AG, Rodríguez GMP (1990) Manejo integrado de la tristeza (*Phytophthora cinnamomi*) del aguacate en Atlxco, Puebla. *Rev. Mex. Fitopatol.* 7: 225-230.
- Thurston HD (1992) *Sustainable Practices for Plant Disease Management in Traditional Farming Systems*. Westview. San Francisco, CA, EEUU. 282 pp.
- Weller DM (1988) Biological control of soilborne pathogens in the rhizosphere with bacteria. *Annu. Rev. Phytopathol.* 73: 1548-1553.
- Zavaleta-Mejía E (1999) Alternativas de manejo de las enfermedades de las plantas. *Terra* 17: 201-207.
- Zentmyer AG (1980) *Phytophthora cinnamomi and the Diseases it Causes*. American Phytopathological Society Press. St. Paul, MN, EEUU. USA. Monograph N° 10. pp. 74-75.
- Zuckerman BM, Dicklow MB, Coles GC, García ER, Marbán MN (1989) Suppression of plant parasitic nematodes in the chinampa agricultural soils. *J. Chem. Ecol.* 15: 1947-1955.

INDUCTION OF SOIL-BORNE DISEASE SUPPRESSIVENESS. A HOLISTIC APPROACH TO BIOLOGICAL CONTROL

Juliana Bautista Calles, Roberto García-Espinosa, Jesús Pérez-Moreno, Emma Zavaleta-Mejía, Roberto Montes-Belmont and Ronald Ferrera-Cerrato

SUMMARY

Soil-borne disease suppressiveness, a holistic concept, has been fruitlessly treated under a reductionist approach in search of understanding and management of biological control, based on specific isolates of antagonistic microorganisms reintroduced in augmented populations against specific soil-borne plant pathogens. Under a holistic approach, soil-borne disease suppressiveness is a property that emerges out of the system complexity and can not be explained or managed by splitting the system in its elementary components. With the general systems theory and the complexity theory as philosophical guidelines, it becomes evident

that complexity is a precursor of stability and that the self-organizing property of highly complex systems could promote the emergent property of soil suppressiveness. In this review an analysis is made of soil-borne disease suppressiveness research that seems to indicate that under a reductionist approach it has been mismanaged, whereas under a holistic approach there are greater possibilities of inducing it through deep changes on the system structure, improving the biological control of the diseases. Finally, the perspectives of soil-borne disease suppressiveness studies are analyzed.

INDUÇÃO DE SUPRESSIVIDADE A FITOPATÓGENOS DO SOLO. UM ENFOQUE HOLÍSTICO AO CONTROLE BIOLÓGICO

Juliana Bautista Calles, Roberto García-Espinosa, Jesús Pérez-Moreno, Emma Zavaleta-Mejía, Roberto Montes-Belmont e Ronald Ferrera-Cerrato

RESUMO

A supressividade do solo a fitopatógenos é um conceito holístico que se tem pretendido explicar e manejar infrutuosamente sob o enfoque reducionista, na busca do controle biológico mediante o isolamento de antagonistas específicos contra certos fitopatógenos e sua reintrodução ao solo em quantidades aumentadas. Sob o enfoque holístico, revaloriza-se o conceito de supressividade como uma propriedade emergente do sistema, que resulta de sua própria complexidade e que não pode explicar-se, e menos manejar-se, desintegrando ao sistema em seus componentes elementares. Sua guia filosófica é a teoria geral de sistemas e da

complexidade. A complexidade é precursora da estabilidade e, em ecologia do solo, a propriedade de auto-organização dos sistemas complexos pode conduzir ao surgimento da supressividade. São analisados, na presente revisão, trabalhos relacionados com a supressividade de solos, que em geral parecem indicar que sob o enfoque reducionista aquela não há sido manejada com sucesso. Com o enfoque holístico existem maiores possibilidades de manejá-la mediante mudanças profundas na estrutura do sistema e assim melhorar o controle biológico. Finalmente, se analisam as perspectivas de estudo da supressividade de solos.