

Capítulo 24

Cambio climático, epidemiología vegetal y control biológico de fitopatógenos

Chapter 24

Climate change, plant epidemiology and biological control of plant pathogens

John Fredy Hernández Nopsa¹

¹ Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA)

Contenido

Introducción.....1018

Enfermedades de plantas y cambio climático.....1020

Control biológico y cambio climático: ¿Qué podría suceder?.....1024

Modelos, cambio climático, enfermedades y control biológico.....1025

Controladores biológicos y cambio climático.....1027

Cambio climático y micotoxinas1028

Conclusiones y perspectivas1029

Referencias.....1030

Resumen

Los sistemas agrícolas se comportan y tienen características de sistemas complejos. Como sistema complejo, las respuestas a efectos y cambios que lo afecten pueden, en unos casos, ser evidentes y, en otros, enmascararse o permanecer ocultos en el sistema. El cambio climático afecta directamente múltiples sistemas en la tierra, entre ellos, los agrícolas. Se pronostica que el cambio climático causará varios efectos —positivos, negativos y neutros— en la agricultura. El control biológico, como estrategia fundamental para el manejo de plagas y enfermedades en la agricultura, puede sufrir alteraciones inesperadas como consecuencia del cambio climático. Debemos estar preparados y enfrentar problemas complejos con soluciones inteligentes, educadas e integradas, para así mitigar al máximo las consecuencias negativas del cambio climático, aprovechando las herramientas científicas y tecnológicas que tenemos hoy, tales como la epidemiología y el modelaje (en el que se encuentran los modelos de redes), para afrontar tanto las consecuencias evidentes del cambio climático en la agricultura como las que no lo son.

Palabras clave

Cambio climático, control biológico, enfermedades de plantas, epidemiología, modelos de redes, modelos epidemiológicos, sistemas complejos

Abstract

Agricultural Systems contain elements and properties —and behave as well— as Complex Systems. As a Complex System, the system response to effects and changes can be obvious in some cases or could be hidden in the system. Climate Change affects directly many, if not all systems on Earth, among those the agricultural one. Positive, negative or neutral effects could affect agricultural systems and change its outputs as a consequence of Climate Change. Biological control remains as a key strategy to Integrated Pest Management in agriculture. However, Climate Change can affect biocontrol strategies, generating unexpected and perhaps notorious consequences. The scientific community should be prepared to tackle the complex challenges that Climate Change is generating. We should come up with educated and multidisciplinary solutions to mitigate the consequences of Climate Change, combining our scientific knowledge and all scientific and technological tools available to pursue this goal. Among these tools, epidemiology, modeling, network models, among others, are key to develop strategies towards the adaptation to Climate Change and its concealed consequences in agricultural systems.

Keywords

Biological control, climate change, complex systems, epidemiology, modeling, network models, plant diseases

Introducción

La gran variedad de elementos que componen los sistemas agrícolas hace que estos se comporten como sistemas complejos. Dicha variedad de componentes —bióticos, abióticos, sociales y económicos—, así como las propiedades y características derivadas de las interacciones entre estos, generan ‘propiedades emergentes’ y características aún más complejas que las de cada componente por separado. La complejidad es una propiedad innata dentro de los componentes de varios sistemas (Meadows, 2008), incluyendo, por supuesto, los agrícolas (figuras 24.1 y 24.2).

Algunos de los componentes de los sistemas agrícolas, como las enfermedades y los insectos plaga que afectan los cultivos, poseen *per se* altos niveles de complejidad. Por ejemplo, la relación hospedero-planta-patógeno y el clima (pilares para procesos de infección de patógenos en plantas y desarrollo de epidemias) son una clara muestra de ello. Por tal razón, es apropiado analizar el desarrollo de enfermedades y epidemias en sistemas agrícolas, así como su manejo y control desde la óptica dada por los sistemas complejos.



Foro: John Fredy Hernández Nopsa

Figura 24.1. Sistema agrícola de producción de semilla de papa en los Andes colombianos. Los sistemas agrícolas poseen características típicas de sistemas complejos, en donde las interacciones entre sus diversos elementos, como clima, comunidades humanas, plantas, semillas, patógenos, plagas y ambiente, generan propiedades emergentes, típicas de un sistema complejo.



Foro: John Fredy Hernández Nopsa

Figura 24.2. Sistema de producción de papa completamente cubierto por ceniza volcánica en Tungurahua, Ecuador. La erupción del volcán Tungurahua, en noviembre del 2015, afectó todos los sistemas productivos de la región. Se espera que eventos como este sean de mayor intensidad y más frecuentes gracias al efecto del cambio climático.

El cambio climático —entendido como los cambios rápidos en el clima, debidos a la expedita liberación de gases de invernadero causantes del incremento de la temperatura promedio en la tierra y de otros problemas como la acidificación de los océanos, la alteración de los patrones del tiempo y cambios en agricultura y ecología (Zefferman, 2017)— es causado por la actividad humana y genera temibles amenazas para la vida en la tierra (Hodson, 2017). Consecuentemente, el cambio climático es de vital importancia para la agricultura por los efectos directos en los sistemas agrícolas y por las interacciones que genera con otros componentes de estos (v. g., bióticos, abióticos, sociales y económicos, entre otros). El reto generado por el cambio climático en la agricultura, al variar y alterar patrones de diversas variables (i. e., temperatura, humedad, rocío, precipitación y

circulación del viento), es el de entender estas variables climáticas y sus interacciones con los agrosistemas, para generar óptimos desarrollos en los sistemas agrícolas y alcanzar excelsos niveles de producción. Este reto se debe asumir no solo a nivel nacional y regional, como se ha venido haciendo en algunos países, sino a nivel global (Garrett, Thomas-Sharma, Forbes, & Hernández Nopsa, 2014; Helfer, 2014; Lesk, Rowhani & Ramankutty, 2016; Rosenzweig & Parry, 1994; Ruane, Winter, McDermid, & Hudson, 2015).

Es fundamental para los procesos de adaptación de la agricultura al cambio climático entender tanto sus efectos directos en los procesos agrícolas (v. g., producción, fertilización, uso de riego, sequías, inundaciones) como los indirectos, así como la

variación de los precios de los productos agrícolas (Calzadilla et al., 2013; Lesk et al., 2016), el deterioro en la calidad de vida y caídas de producto interno bruto, entre otros. De igual manera, es clave estudiar los efectos del cambio climático en patógenos, insectos plaga y epidemias, así como los efectos que estos puedan causar en los diferentes agrosistemas

global, regional y localmente. Un elemento que juega un papel crucial en el desarrollo de epidemias es el clima, ya que cumple una función fundamental en el desarrollo de enfermedades y en la dispersión del inóculo, impidiendo (o facilitando) el desarrollo de nuevas epidemias (Agrios, 2005; Hernández Nopsa, Thomas-Sharma, & Garrett, 2014).

Enfermedades de plantas y cambio climático

Los efectos del cambio climático en la dispersión de enfermedades son generalmente ignorados al realizar análisis de riesgos de enfermedades de cultivos agrícolas (Skelsey, Cooke, Lynott, & Lees, 2016). Los cultivos (hospederos) pueden ser infectados por patógenos, disminuyendo la calidad, la producción y los rendimientos de los productos cosechados. Varios mecanismos de dispersión —viento, lluvia, vectores, transporte, maquinaria, transmisión vía semilla, entre otros— le facilitan al patógeno su llegada al hospedero apropiado, dependiendo siempre de múltiples factores como el tipo de patógeno, su ecología y su biología (Buddenhagen et al., 2017; Cunniffe et al., 2015; Hernández Nopsa et al., 2015; Madden, Hughes & Van den Bosh, 2007).

El detrimento que un patógeno causa a su hospedero bajo determinadas condiciones ambientales y a través del tiempo es conocido como ‘enfermedad’ (Dixon, 2012). La variabilidad existente en la incidencia, severidad y prevalencia de las enfermedades está dada por las variaciones del patógeno (diversidad en virulencia y agresividad), del hospedero (variedades de un hospedero con diversos niveles de resistencia a determinados patógenos) y por la variación de todos los factores climáticos que se encuentran en el ambiente. Estos factores pueden afectar positiva, negativa o neutralmente a todo el patosistema, gracias al efecto en las interacciones de cada uno de los elementos: hospedero, patógeno, clima y tiempo (Hernández Nopsa et al., 2014).

El cambio climático ha generado un desplazamiento de las zonas agroclimáticas hacia los polos, que podría generar condiciones óptimas para la emergencia y el desarrollo de enfermedades en nuevas regiones y la reemergencia en otras. Igualmente, el cambio

climático generará una mayor variabilidad climática y una mayor frecuencia de eventos climáticos extremos de mayor severidad como temperaturas extremas (altas y bajas), lluvias torrenciales y sequías, con sus correspondientes consecuencias (inundaciones, ondas de calor, etc.), como se ilustra en la figura 24.3 (Lesk et al., 2016; Mirza, 2003; Peterson et al., 2013; Rosenzweig, Iglesias, Yang, Epstein, & Chivian, 2001; Vose et al., 2014).

Los efectos directos del cambio climático en la agricultura dependerán del tipo de cultivo, de la distribución geográfica y de la vegetación nativa. Una amplia y bien documentada revisión de la literatura sobre los efectos del cambio climático en agricultura, enfermedades de plantas, y fisiología, entre otros, ha sido presentada por Coakley, Scherm y Chakraborty (1999). Por ejemplo, temperaturas altas pueden ‘quebrar’ la resistencia de algunos cultivos a ciertos patógenos y afectar también la dinámica de vectores de enfermedades; por ende, pueden afectar la distribución de patógenos, incrementar estrés en las plantas y afectar la fisiología de vectores (Garrett et al., 2017; Garrett, Dendy, Frank, Rouse, & Travers, 2006; Jones & Barbeti, 2012).

De igual manera, los cambios en los patrones de precipitación (incrementos o disminuciones de las frecuencias y volúmenes de aguas lluvias) pueden alterar la ocurrencia y la frecuencia de epidemias. Por ejemplo, regiones semiáridas pueden presentar disminución de bacterias que no son transmitidas por vectores, o períodos más largos de época seca pueden incrementar la presencia de vectores (*i. e.*, *Bemisia tabaci*) con el respectivo incremento de begomovirus (Jones & Barbeti, 2012). Asimismo, se prevé que el cambio climático incrementará la severidad de

la fusariosis de la espiga del trigo (*Fusarium head blight* o FHB; figura 24.4), cuyo aumento generará una priorización de las estrategias de manejo de dicha enfermedad en el Reino Unido (Madgwick et al., 2011), así como en la China (Zhang et al.,

2014). En otro estudio, bajo diferentes escenarios de cambio climático y el efecto de FHB, se sugiere que el manejo de esta enfermedad no debe ser considerado prioritario en algunas regiones del Reino Unido (Skelsey & Newton, 2015).



Figura 24.3. Vientos fuertes generando una tormenta de arena sobre el Suroeste de los Estados Unidos en agosto del 2015. Se aprecia desde el aire la magnitud de este evento extremo, afectando la región y causando consecuencias directas sobre los sistemas agrícolas.

Foto: John Fredy Hernández Nopsa



Foto: John Fredy Hernández Nopsa

Figura 24.4. Síntomas típicos de la fusariosis de la espiga del trigo o FHB. La parte media superior de la espiga se encuentra blanca, decolorada, mostrando una falsa maduración. Esta decoloración ocurre antes del proceso fisiológico de maduración de la espiga. La parte media inferior se encuentra completamente sana. Esta sintomatología se presenta porque solo las flores de la parte media superior fueron infectadas por el hongo, mientras que las flores de la parte media inferior no lo fueron.

Entre 1997 y el 2012, la producción de trigo en los EE. UU. estuvo afectada por varias epidemias de FHB (figura 24.5), todas ellas con consecuencias económicas y sociales serísimas. Más recientemente, en el período comprendido entre el 2007 y el 2010, el Medio Oeste norteamericano —y particularmente el estado de Nebraska—, sufrió devastadoras epidemias de FHB, probablemente las peores en los últimos 22 años (Hernández Nopsa et al., 2014; McMullen et al., 2012; Wegulo, Baenziger, Hernández Nopsa, Bockus, & Hallen-Adams, 2015; Wegulo et al., 2011). Durante este período, existió una variación en la prevalencia (porcentaje de lotes afectados), incidencia (porcentaje de espigas afectadas) y severidad (porcentaje de espiguillas afectadas) de FHB, con predominancia muy alta de la enfermedad en el estado de Nebraska (Panthi, Hallen-Adams, Wegulo, Hernández Nopsa,

& Baenziger, 2014). Durante las epidemias del 2007 y 2008, cuando los niveles de la enfermedad alcanzaron su máxima expresión, estos picos fueron explicados por los patrones de lluvia y humedad relativa altos en dichos años. De igual manera, las respuestas de variedades de trigo parcialmente resistentes a FHB fueron diferentes durante esta epidemia, acumulando mayores niveles de micotoxinas (Deoxynivalenol o DON) que variedades susceptibles (Hernández Nopsa et al., 2012).

Al mirar la distribución de la FHB en Nebraska durante la epidemia del 2007 al 2010, los niveles de severidad e incidencia de la enfermedad fueron más intensos en el 2007 y el 2008 en la zona centro-oriental del estado, lo que concuerda con los patrones históricos de precipitación, ya que esta zona ha presentado

en los últimos treinta años altos promedios de precipitación. Por otra parte, en el 2009, la severidad de FHB fue mayor en la zona suroccidental del estado, históricamente más seca, pero que en dicho año presentó niveles de precipitación más altos que los promedios históricos. Las diferencias en intensidad y ubicación de las epidemias pueden ser explicadas

por la variación del régimen de lluvias que se dieron en el estado durante ese período. Existe evidencia de que el cambio climático y la variabilidad climática (por ejemplo, variaciones de fenómenos como El Niño o La Niña) están asociados con una mayor o menor frecuencia e intensidad de FHB (Kriss, Paul, & Madden, 2011; Wegulo et al., 2015).



Foto: John Fredy Hernández Nopsa

Figura 24.5. Campo de trigo con los síntomas típicos de la fusariosis de la espiga del trigo o FHB, durante la epidemia ocurrida en el estado de Nebraska, EE. UU., entre el 2007 y el 2010. Las espigas con los síntomas típicos de la enfermedad se observan blanqueadas, aparentemente maduras, y ubicadas aleatoriamente en el campo junto a espigas sanas, que no fueron infectadas por el hongo.

Diversos modelos proyectan panoramas diferentes para distintas enfermedades. Por ejemplo, pueden existir efectos que incrementen o que disminuyan la incidencia de goma de la papa (causada por *Phytophthora infestans*), dependiendo de la estación de siembra (Skelsey et al., 2016). Además, Aguayo, Elegbede, Husson, Saintonge y Marcais (2014) afirman que, con base en un modelo SIS (Susceptible-Infectado-Susceptible), el cambio climático puede

incrementar o disminuir la severidad de *Phytophthora alni* en diversas regiones de Europa y, por consiguiente, su efecto en el declive de las poblaciones europeas de alisos variará dependiendo del área geográfica seleccionada.

La creciente demanda de alimentos para las generaciones presentes y futuras requiere —casi que obliga— a una continua adaptación a los efectos

causados por las enfermedades que afectan cultivos (figura 24.6), así como a enfermedades emergentes, reemergentes y, por supuesto, al cambio climático (Garrett et al., 2014; Hernández Nopsa et al., 2015; Moore & Lobell, 2014). Asimismo, se requiere que los generadores de políticas cuenten con información sólida y con base en evidencia científica para desarrollar y fortalecer una política efectiva de manejo y adaptación al cambio climático, que

debe incluir desarrollo en infraestructura, manejo integrado, uso de seguros agrícolas y una evaluación de la vulnerabilidad del sistema ante eventos de clima extremo y variabilidad climática (Lesk et al., 2016), así como estrategias de adaptación, vigilancia, monitoreo, muestreo y control de enfermedades, de insectos plaga y de micotoxinas (Hernández Nopsa et al., 2015; Thomas-Sharma et al., 2017).



Foto: John Fredy Hernández Nopsa

Figura 24.6. Cultivo de papa en los Andes ecuatorianos con síntomas de virus. Se espera que enfermedades transmitidas por vectores, como los virus, sean afectadas por el cambio climático gracias a su efecto en hospederos y vectores.

Control biológico y cambio climático: ¿Qué podría suceder?

Algunos procesos biológicos pueden incrementarse, acelerarse o desacelerarse como consecuencia del cambio climático. Por ejemplo, las extinciones de diferentes grupos taxonómicos, como consecuencia directa del cambio climático, han sido numerosas,

aunque su porcentaje varía de acuerdo con la región geográfica. En Suramérica, Australia y Nueva Zelanda, el porcentaje de extinción oscila entre un 14 % y 23 % (porcentajes relativamente altos), mientras que para Europa y Norteamérica se prevé un

rango menor, con niveles del 5 % al 6 % (porcentajes relativamente bajos). Las estimaciones de estos riesgos de extinción aumentan con el incremento de temperatura, afectando todos los grupos taxonómicos, y se prevé que aumentarán con el tiempo (Pacifi et al., 2015; Urban, 2015). Esta afirmación es muy importante y debe considerarse específicamente para la agricultura, ya que poblaciones de insectos y otros organismos que actúan como biocontroladores están igualmente expuestos al riesgo de extinción generado por el cambio climático, situación que conllevaría consecuencias nefastas para la agricultura. Los efectos del cambio climático alteran directamente la biología, la ecología y la epidemiología de los insectos plaga y de los fitopatógenos, y de igual forma afectan a los biocontroladores empleados en los sistemas agrícolas para controlarlos. Los efectos del cambio climático sobre los biocontroladores son hasta el momento desconocidos, y se requiere más financiación, recursos e interés por parte del público en general, así como de legisladores y académicos para entender, analizar y generar estrategias para esta problemática.

A pesar de los esfuerzos realizados hasta la fecha, se requiere de más investigación en ciencias —tanto sociales como puras—, y específicamente en cambio climático. El comportamiento de los agricultores, la adaptación al cambio y los estudios basados en la diferencia de género, entre otros, son elementos claves a los que se les debe dar más importancia en investigación (Davidson, 2016). Adicionalmente, estudios relacionados con los efectos del cambio climático en el control biológico son necesarios. Junto a estas acciones, que deben darse prontamente,

es urgente generar una comunicación estratégica más efectiva y quizás de forma más ‘irresistible’ y menos ‘estadística o abstracta’ acerca del cambio climático, de sus efectos, consecuencias y formas de adaptación, ya que la complejidad del cambio climático, así como su naturaleza y posibles soluciones, son difíciles de entender, no solo para el común de las gentes, sino aún para expertos (Bushell, Colley, & Workman, 2015). Por supuesto, el control biológico y su relación con el cambio climático son también parte de esta complejidad y requieren la misma atención y enfoque.

El cambio climático es un problema de magnitud y complejidad sin comparación, al que nosotros como humanidad nos enfrentamos por primera vez. Simultáneamente, este reto nos ofrece oportunidades únicas. Todas las partes interesadas (gobiernos, público en general, ONG, universidades, empresas, políticos y otros sectores tanto públicos como privados) deben estar involucradas en la creación de esta narrativa en forma de documento para afrontar el cambio climático, que debe ser estratégica y adaptarse constantemente a los retos de este fenómeno (Bushell et al., 2015). Esta narrativa debe inspirar y empoderar acciones contundentes de manejo y adaptación al cambio climático; debe explicar la necesidad de cambios positivos e, igualmente, debe coordinar a todos los actores fundamentales y a los legisladores a promulgar leyes, legitimar acciones y persuadir las audiencias necesarias, con el fin de reducir la inacción frente a este problema. En definitiva, científicos y legisladores debemos priorizar el desarrollo de formas de comunicación sobre este tema (Bushell et al., 2015).

Modelos, cambio climático, enfermedades y control biológico

Algunos modelos han logrado dar luces sobre los efectos del cambio climático, no solo a nivel agrícola, sino también en áreas como la ecología, agroecología, control y manejo de enfermedades, y distribución de especies (Bolker et al., 2009; Clark, 2007; Logan & Wolesensky, 2009). Intento acá mostrar un panorama al respecto y, de igual forma, mostrar algunas herramientas con las que se cuenta para en-

tender, estudiar y afrontar la situación que se avecina en términos del cambio climático.

Los modelos epidemiológicos deben incluir métodos de muestreo —y mejorar los existentes— para la detección de patógenos introducidos, emergentes y reemergentes. De la misma forma, los modelos deben servir como herramientas para resolver preguntas

como: ¿cuáles son los niveles de incidencia que una epidemia puede llegar a tener una vez detectada? o ¿cómo y dónde pueden ubicarse los recursos de la manera más efectiva en el tiempo para controlar una epidemia? (Brasier, 2008; Cunniffe et al., 2015). Dentro de los múltiples retos que tienen los modeladores y epidemiólogos está la identificación de las dinámicas de patógenos y sus hospederos en hábitats tradicionales, así como en ‘nuevos hábitats’, siendo estos retos claves para el entendimiento de las epidemias.

La elaboración de modelos más realistas debe incluir variables ambientales y antropogénicas, cambios temporales de la disponibilidad del hospedero, tanto a nivel poblacional como individual, y el uso de las ‘redes’ de transporte para la dispersión de patógenos, entre otros (Cunniffe et al., 2015). Adicionalmente, el modelamiento debe ofrecer alternativas y dar luces para el manejo, monitoreo y control de enfermedades, esto es, bajo el escenario del cambio climático se debe identificar nuevas áreas de cobertura de insectos plaga y enfermedades existentes en la zona, así como aquellos que, estando ausentes, podrían potencialmente invadir dichas áreas bajo nuevos escenarios climáticos (Garrett et al., 2017; Thomas-Sharma et al., 2017). Asimismo, se deben identificar áreas en las que los controladores biológicos puedan actuar y ejercer su función. El objetivo último de los modelos es el de entender el sistema para poder predecirlo (Clark, 2007). Por ende, los modelos epidemiológicos deben ayudar al entendimiento de la complejidad de los sistemas agrícolas y de los patosistemas para así proponer soluciones prácticas a problemáticas que aquejan a los agricultores, incluidas las generadas por el cambio climático.

El cambio climático ha generado otro gigantesco reto en el sector agrícola. Las fluctuaciones generadas en temperatura, humedad, precipitación y patrones de circulación por el Cambio Climático hacen que el entendimiento de las condiciones climáticas en las que los cultivos se desarrollan sea más complejo, no solo a nivel nacional, sino a niveles regional y global (Garrett et al., 2014; Lesk et al., 2016; Rosenzweig & Parry, 1994; Ruane et al., 2015). Esta complejidad genera enormes incertidumbres acerca de las consecuencias y efectos (positivos, negativos o neutros) del cambio climático en el desarrollo de enfermedades y de epidemias en

diferentes patosistemas (Boland, Melzer, Hopkin, Higgins, & Nassuth, 2004; Helfer, 2014; Luck et al., 2011). Rosenzweig y Parry (1994) mostraron que los efectos negativos del cambio climático en la agricultura serán más fuertes en países en vía de desarrollo, siendo estos países además los más vulnerables a dichos riesgos. Además, algunos autores sugieren que el cambio climático puede afectar positivamente agricultores europeos siempre y cuando se adapten a este fenómeno, o de lo contrario serán afectados negativamente (Frost, Groves & Charkowski, 2013).

Los análisis de redes o ‘Network Analysis’ han sido empleados ampliamente en diferentes áreas del conocimiento, entre ellas la epidemiología humana y animal, la conservación, la ecología y la fitopatología (Chadès et al., 2011; Cox, Bockus, Holt, Fang, & Garrett, 2013; Margosian, Garrett, Hutchinson & With, 2009; May, 2005, 2006; Pautasso & Jeger, 2014; Suttrave, Scoglio, Isard, Hutchinson & Garrett, 2012). Con la ayuda de herramientas como los modelos de redes o ‘Network Models’ se puede abordar el estudio de la complejidad de los sistemas agrícolas, para desentrañar algunas de las características ocultas de estos sistemas. Igualmente, los modelos de redes identificando propiedades tales como la conectividad y aplicados a patosistemas y metapoblaciones, permiten predecir y rastrear posibles rutas de movimiento de epidemias y sus orígenes, así como dar luces sobre manejos más acertados de epidemias de acuerdo con las características y métricas de las redes (Hernández Nopsa et al., 2015). De la misma forma, con otros tipos de modelos se podría disminuir los niveles de incertidumbre, y se tendría más información para la toma de decisiones para el manejo, prevención y control de epidemias. Asimismo, estos modelos ayudarían a generar estrategias para una mejor adaptación al cambio climático y a sus consecuencias.

Los modelos de redes y el estudio de las interacciones entre los componentes de los patosistemas han permitido proponer diferentes estrategias de manejo, monitoreo y control de plagas y enfermedades (Hernández Nopsa et al., 2015; Pautasso & Jeger, 2014; Shaw & Pautasso, 2014), como por ejemplo en enfermedades de plantas transmitidas por semilla asexual (Buddenhagen et al., 2017), o en enfermedades, insectos plaga y micotoxinas transmitidas o movilizadas en granos almacenados

(Hernández Nopsa et al., 2015; Wu & Guclu, 2012, 2013). Las redes y sus interacciones permiten identificar nodos críticos para la dispersión de enfermedades y plagas o nodos más susceptibles o

que tengan mayor probabilidad de sufrir los efectos negativos del cambio climático. Así, se podrían establecer estrategias para el manejo, prevención y adaptación al cambio climático para dichos nodos.

Controladores biológicos y cambio climático

Se proyecta que el cambio climático afectará la epidemiología de las enfermedades y la dinámica poblacional de insectos plaga, y consecuentemente el manejo integrado de patógenos y plagas en términos de tiempo, efectividad, preferencia de hospedero y eficacia. Sin embargo, poco se conoce de los efectos potenciales del cambio climático específicamente en los métodos de control biológico (Ghini, Hamada, & Betriol, 2008; Juroszek & Von Tiedemann, 2011).

El manejo de enfermedades y plagas debe ajustarse a los cambios generados por el cambio climático, ya que se presume que la vulnerabilidad de los controladores biológicos será mayor en la medida que la variabilidad del clima se incremente. La efectividad de los controladores está probada bajo ciertas condiciones ambientales muy específicas. Cambios en temperatura y humedad podrían generar alteraciones a las poblaciones de controladores y sus dinámicas (Garrett et al., 2006; Juroszek & Von Tiedemann, 2011).

Adicionalmente, es importante tener en cuenta conceptos como el ‘escape de la enfermedad’ (Agrios, 2005), en el que áreas dejan de ser libres de enfermedades por el advenimiento de patógenos provenientes de zonas con la enfermedad. El ‘escape de enfermedades’ podría verse favorecido por el cambio climático, ya que áreas libres podrían adquirir condiciones ambientales favorables a plagas y patógenos y, por tanto, ser receptoras de estos, perdiendo su condición de áreas libres. Simultáneamente, procesos como el de ‘saturación’ y ‘difusión’ de patógenos y enfermedades (Xing et al., 2017) se vería influenciados (y quizás incrementados) por el cambio climático.

Gerard et al. (2013) señalan que los estudios de cambio climático y sus efectos en plagas y enfermedades en su mayoría apuntan al efecto sobre especies individuales, mientras que los efectos del cambio climático en el control biológico se dan en múltiples niveles, involucrando sistemas y las interacciones entre estos a diferentes niveles tróficos y no en especies individuales.

El planteamiento realizado por dichos autores es que se deben considerar seis retos causados por el cambio climático en control biológico, que se presentan a continuación:

- Cambios en la distribución de especies gracias al cambio climático y sus efectos en las distribuciones de plagas y de sus controladores. En términos de distribución de especies, se espera que las plagas y sus biocontroladores se muevan siguiendo el mismo patrón de las plantas hospederas, ya que este movimiento es un proceso gradual.
- Tiempos de hibernación más cortos y épocas de cosechas más largas. El tiempo requerido por ciertas especies de biocontroladores para adaptarse a una nueva región puede verse afectado por la capacidad nutricional de estas zonas para los biocontroladores y por las zonas de refugios invernales o de hibernación y de estivación.
- Impactos en los blancos específicos de los biocontroladores, que podrían cambiar.
- Variabilidad climática y eventos extremos del clima, ya que afectarían de manera más drástica a los biocontroladores que a las poblaciones a controlar.
- Alteración de la sincronía entre el biocontrolador y su especie blanco.
- Efectividad de los biocontroladores, ya que puede variar con el cambio climático.

De igual forma, se afirma que estos efectos van a depender de las condiciones geográficas y de las condiciones ambientales que rijan el área —islas, áreas continentales, etcétera— (Gerard et al., 2013). Como solución a los efectos del cambio climático en biocontroladores, Ghini et al. (2008) plantean que los esfuerzos de generación de controladores biológicos deben apuntar a la creación de controladores más tolerantes a la variabilidad climática.

Cambio climático y micotoxinas

Las micotoxinas, contaminantes de granos, son metabolitos secundarios producidos por hongos durante el proceso de producción de semillas y granos en campo o mientras se encuentran almacenados. Las micotoxinas afectan drásticamente múltiples cultivos mundialmente, en diferentes latitudes y altitudes, con efectos negativos directos en la salud pública y que alteran negativamente el bienestar económico y social de las regiones afligidas.

Las variables que contribuyen directamente al incremento de poblaciones fúngicas y la consecuente presencia de micotoxinas en productos y subproductos agrícolas son el aumento de temperatura, el estrés de las plantas causado por sequías, el exceso de humedad y las lluvias (Bandyopadhyay et al., 2016; Hernández Nopsa et al., 2015; Petzinger & Weidenbach, 2002; Pitt, 2000; Wegulo, 2012; Wu, 2015; Wu et al., 2011). El transporte global de granos almacenados y su comercio internacional incrementan el riesgo de dispersión de micotoxinas mundialmente (Wu & Guclu, 2012).

Las aflatoxinas —producidas principalmente por *Aspergillus flavus*, aunque otras especies del mismo género también pueden producirlas— son altamente cancerígenas; el consumo de granos contaminados produce enfermedades como la cirrosis hepática y afecta el desarrollo normal del crecimiento infantil. De igual forma, granos y productos contaminados con aflatoxinas limitan seriamente los mercados locales, regionales e internacionales. El cambio climático y la variabilidad climática podrían generar que los niveles de micotoxinas en precosecha se incrementen gracias a sequías prolongadas y altas temperaturas. Adicionalmente, estas condiciones climáticas harían que la producción y dispersión de conidios sean mayores, incrementando las áreas afectadas por este problema.

Los patrones de clima variable pueden afectar los ciclos de vida de los hongos, así como la producción de micotoxinas en varias especies de ellos, entre los que se encuentra *Fusarium* spp. Es importante considerar que los efectos del cambio climático podrían ser diferentes para cada una de las especies productoras

de micotoxinas (Bandyopadhyay et al., 2016; Wu et al., 2011) y variarían de acuerdo con las condiciones climáticas. La infección del hongo y su consecuente producción de aflatoxinas (para el caso de *A. flavus*) puede iniciarse en el campo y seguir durante el almacenamiento, o producirse directamente en el almacenamiento o en poscosecha. Una de las estrategias para el manejo de la contaminación con micotoxinas consiste en la eliminación de los granos contaminados. Infortunadamente, esta labor no es completamente efectiva o simplemente no se lleva a cabo, especialmente en países en desarrollo.

Los granos contaminados muchas veces terminan siendo consumidos por los propios agricultores, que lo hacen por desconocimiento de los efectos de las micotoxinas, mientras que los granos no contaminados son vendidos; una de las causas para que esto ocurra es que no existe otra fuente de alimento para dichos agricultores. Actualmente, la única estrategia comercialmente efectiva para el manejo de este problema es el uso de aislamientos atoxigénicos de *A. flavus*, usado como biocontrolador (Bandyopadhyay et al., 2016).

Las bioformulaciones de estas cepas atoxigénicas ofrecen ventajas reproductivas y de dispersión sobre las cepas toxigénicas. Las cepas atoxigénicas producen poblaciones que colonizan al hospedero e impiden —o desplazan— la colonización por cepas toxigénicas del hospedero, convirtiéndose de esta forma en piezas clave para el control de contaminación de productos por micotoxinas.

El cambio climático puede jugar un papel muy importante en el uso de esta tecnología para el control de *A. flavus*, ya que puede afectar los procesos de dispersión de cepas atoxigénicas y la adaptación de las poblaciones de las cepas atoxigénicas frente a las toxigénicas. Las cepas atoxigénicas necesitan esporular en épocas de lluvia, para así generar la cobertura del área deseada. Si el cambio climático afecta los patrones de lluvia, la efectividad de este método de control se verá comprometida, aunque existen, en todo caso, otras cepas que pueden actuar muy bien bajo condiciones secas y calientes (Bandyopadhyay et al., 2016; Wu et al., 2011).

Conclusiones y perspectivas

El cambio climático puede tener tres tipos de efectos o consecuencias en la agricultura, y específicamente en la biología, ecología y uso de controladores biológicos. Estos pueden ser negativos, positivos o neutros. Se espera que estos efectos varíen de acuerdo con el sistema agrícola, los problemas sanitarios involucrados y la región. Es claro que, como sistema complejo, el cambio climático traerá problemas complejos al sistema agrícola; problemas complejos requieren soluciones multidisciplinarias, no enfoques unidisciplinarios.

Las soluciones deben ser integrales, siendo fundamental mejorar las estrategias de manejo integrado de plagas para hacerlas más eficientes y efectivas (Howden et al., 2007). Debemos estar preparados para afrontar estos retos, con las herramientas que tenemos hoy en día, como los modelos epidemiológicos, modelos de redes y demás ayudas, para adaptarnos y mitigar los efectos del cambio climático en la agricultura.



Referencias

- Agrios, G. N. (2005). *Plant Pathology*. Nueva York, EE. UU.: Elsevier Science.
- Aguayo, J., Elegbede, F., Husson, C., Saintonge, F.-X., & Marcais, B. (2014). Modeling climate impact on an emerging disease, the *Phytophthora alni*-induced alder decline. *Global Change Biology*, 20(10), 3209-3221. doi:10.1111/gcb.12601.
- Bandyopadhyay, R., Ortega-Beltran, A., Akande, A., Mutegi, C., Atehnkeng, J., Kaptoge, L., ... Cotty, P. J. (2016). Biological control of aflatoxins in Africa: Current status and potential challenges in the face of Climate Change. *World Mycotoxin Journal*, 9(5), 771-789. doi:10.3920/wmj2016.2130.
- Boland, G. J., Melzer, M. S., Hopkin, A., Higgins, V., & Nassuth, A. (2004). Climate Change and plant diseases in Ontario. *Canadian Journal of Plant Pathology-Revue Canadienne De Phytopathologie*, 26(3), 335-350. doi:10.1080/07060660409507151.
- Bolker, B. M., Brooks, M. E., Clark, C. J., Geange, S. W., Poulsen, J. R., Stevens, M. H. H., & White, J.-S. S. (2009). Generalized linear mixed models: A practical guide for ecology and evolution. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(3), 127-135. doi:10.1016/j.tree.2008.10.008.
- Brasier, C. M. (2008). The biosecurity threat to the UK and global environment from international trade in plants. *Plant Pathology*, 57(5), 792-808. doi:10.1111/j.1365-3059.2008.01886.x.
- Buddenhagen, C. E., Hernández Nopsa, J. F., Andersen, K. F., Andrade-Piedra, J., Forbes, G. A., Kromann, P., ... Garrett, K. A. (2017). Epidemic network analysis for mitigation of invasive pathogens in seed systems: Potato in Ecuador. *Phytopathology*, 107(10), 1209-1218. doi:10.1094/PHYTO-03-17-0108-FI.
- Bushell, S., Colley, T., & Workman, M. (2015). A unified narrative for Climate Change. *Nature Climate Change*, 5(11), 971-973. doi:10.1038/nclimate2726.
- Calzadilla, A., Rehdanz, K., Betts, R., Falloon, P., Wiltshire, A., & Tol, R. S. J. (2013). Climate Change impacts on global agriculture. *Climatic Change*, 120(1-2), 357-374. doi:10.1007/s10584-013-0822-4.
- Chadès, I., Martin, T. G., Nicol, S., Burgman, M. A., Possingham, H. P., & Buckley, Y. M. (2011). General rules for managing and surveying networks of pests, diseases, and endangered species. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(20), 8323-8328. doi:10.1073/pnas.1016846108.
- Clark, J. S. (2007). *Models for ecological data: An introduction*. Nueva Jersey, EE. UU.: Princeton University Press.
- Coakley, S. M., Scherm, H., & Chakraborty, S. (1999). Climate Change and plant disease management. *Annual Review of Phytopathology*, 37, 399-426. doi:10.1146/annurev.phyto.37.1.399.
- Cox, C. M., Bockus, W. W., Holt, R. D., Fang, L., & Garrett, K. A. (2013). Spatial connectedness of plant species: Potential links for apparent competition via plant diseases. *Plant Pathology*, 62(6), 1195-1204. doi:10.1111/ppa.12045.
- Cunniffe, N. J., Koskella, B., E. Metcalf, C. J., Parnell, S., Gottwald, T. R., & Gilligan, C. A. (2015). Thirteen challenges in modelling plant diseases. *Epidemics*, 10, 6-10. doi:10.1016/j.epidem.2014.06.002.
- Davidson, D. (2016). Gaps in agricultural climate adaptation research. *Nature Climate Change*, 6(5), 433-435. doi:10.1038/nclimate3007.
- Dixon, G. R. (2012). Climate Change – impact on crop growth and food production, and plant pathogens. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 34(3), 362-379. doi:10.1080/07060661.2012.701233.
- Frost, K. E., Groves, R. L., & Charkowski, A. O. (2013). Integrated control of potato pathogens through seed potato certification and provision of clean seed potatoes. *Plant Disease*, 97(10), 1268-1280. doi:10.1094/pdis-05-13-0477-fe.
- Garrett, K. A., Andersen, K. F., Asche, F., Bowden, R. L., Forbes, G. A., Kulakow, P. A., & Zhou, B. (2017). Resistance genes in global crop breeding networks. *Phytopathology*, 107(10), 1268-1278. doi:10.1094/PHYTO-03-17-0082-FI.
- Garrett, K. A., Dendy, S. P., Frank, E. E., Rouse, M. N., & Travers, S. E. (2006). Climate Change effects on plant disease: Genomes to ecosystems. *Annual Review of Phytopathology*, 44(1), 489-509. doi:10.1146/annurev.phyto.44.070505.143420.
- Garrett, K. A., Thomas-Sharma, S., Forbes, G. A., & Hernández Nopsa, J. (2014). Climate Change and plant pathogen invasions. En L. H. Ziska, & J. S. Dukes (Eds.), *Invasive Species and Global Climate Change* (pp. 22-44). Wallingford, EE. UU.: Centre for Agricultural Bioscience International (CABI).
- Gerard, P. J., Barringer, J. R. F., Charles, J. G., Fowler, S. V., Kean, J. M., Phillips, C. B., ... Walker, G. P. (2013). Potential effects of Climate Change on biological control systems: Case studies from New Zealand. *Biocontrol*, 58(2), 149-162. doi:10.1007/s10526-012-9480-0.
- Ghini, R., Hamada, E., & Bettiol, W. (2008). Climate Change and plant diseases. *Scientia Agricola*, 65(N.º especial), 98-107. doi:10.1590/S0103-90162008000700015.
- Helfer, S. (2014). Rust fungi and global change. *New Phytologist*, 201(3), 770-780. doi:10.1111/nph.12570.
- Hernández Nopsa, J. F., Baenziger, P. S., Eskridge, K. M., Peiris, K. H. S., Dowell, F. E., Harris, S. D., & Wegulo, S. N. (2012). Differential accumulation of deoxynivalenol in two winter wheat cultivars varying in FHB phenotype response under field conditions. *Canadian Journal of Plant Pathology-Revue Canadienne de Phytopathologie*, 34(3), 380-389. doi:10.1080/07060661.2012.695751.
- Hernández Nopsa, J. F., Daglish, G. J., Hagstrum, D. W., Leslie, J. F., Phillips, T. W., Scoglio, C., ... Garrett, K. A. (2015). Ecological networks in stored grain: Key postharvest nodes for emerging pests, pathogens, and mycotoxins. *BioScience*, 65(10), 985-1002. doi:10.1093/biosci/biv122.
- Hernández Nopsa, J. F., Thomas-Sharma, S., & Garrett, K. A. (2014). Climate Change and Plant Disease. En N. V. Alfen (Ed.), *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems* (Vol. 2, pp. 232-243). San Diego, EE. UU.: Elsevier.
- Hernández Nopsa, J. F., Wegulo, S. N., Panthi, A., Hallen-Adams, H. E., Harris, S. D., & Baenziger, P. S. (2014). Characterization of Nebraska isolates of *Fusarium graminearum* causing head blight of wheat. *Crop Science*, 54(1), 310-317. doi:10.2135/cropsci2013.04.0229.
- Hodson, R. (2017). Climate Change. *Nature*, 550(Supl. 7675), S53. doi:10.1038/550S53a.
- Howden, S. M., Soussana, J.-F., Tubiello, F. N., Chhetri, N., Dunlop, M., & Meinke, H. (2007). Adapting agriculture to Climate Change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50), 19691-19696. doi:10.1073/pnas.0701890104.
- Jones, R. A. C., & Barbetti, M. J. (2012). Influence of Climate Change on plant disease infections and epidemics caused by viruses and bacteria. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 7(22), 1-31. doi:10.1079/PAVSNNR20127022.
- Juroszek, P., & Von Tiedemann, A. (2011). Potential strategies and future requirements for plant disease management under a changing climate. *Plant Pathology*, 60(1), 100-112. doi:10.1111/j.1365-3059.2010.02410.x.
- Kriss, A. B., Paul, P. A., & Madden, L. V. (2011). Variability in Fusarium head blight epidemics in relation to global climate fluctuations as represented by the El Niño-Southern Oscillation and other atmospheric patterns. *Phytopathology*, 102(1), 55-64. doi:10.1094/PHYTO-04-11-0125.
- Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529(7584), 84-87. doi:10.1038/nature16467.
- Logan, J. D., & Wolesensky, W. (2009). *Mathematical Methods in Biology*. Nueva Jersey, EE. UU.: Wiley.
- Luck, J., Spackman, M., Freeman, A., Trebicki, P., Griffiths, W., Finlay, K., & Chakraborty, S. (2011). Climate Change and diseases of food crops. *Plant Pathology*, 60(1), 113-121. doi:10.1111/j.1365-3059.2010.02414.x.
- Madden, L. V., Hughes, G., & Van den Bosh, F. (2007). *The Study of Plant Disease Epidemics*. St. Paul, Minnesota, EE. UU.: The American Phytopathological Society.
- Madgwick, J. W., West, J. S., White, R. P., Semenov, M. A., Townsend, J. A., Turner, J. A., & Fitt, B. D. L. (2011). Impacts of Climate Change on wheat anthesis and Fusarium ear blight in the UK. *European Journal of Plant Pathology*, 130(1), 117-131. doi:10.1007/s10658-010-9739-1.
- Margosian, M. L., Garrett, K. A., Hutchinson, J. M. S., & With, K. A. (2009). Connectivity of the American agricultural landscape: Assessing the national risk of crop pest and disease spread. *BioScience*, 59(2), 141-151. doi:10.1525/bio.2009.59.2.7.
- May, R. M. (2005). Infectious disease: Can we avert a lethal flu pandemic? *Current Biology*, 15(22), R922-R924. doi:10.1016/j.cub.2005.10.063.
- May, R. M. (2006). Network structure and the biology of populations. *Trends in Ecology and Evolution*, 21(7), 394-399. doi:10.1016/j.tree.2006.03.013.
- McMullen, M., Bergstrom, G., De Wolf, E., Dill-Macky, R., Hershman, D., Shaner, G., & Van Sanford, D. (2012). A Unified effort to fight an enemy of wheat and barley: Fusarium head blight. *Plant Disease*, 96(12), 1712-1728. doi:10.1094/PDIS-03-12-0291-FE.
- Meadows, D. (2008). *Thinking in Systems: A Primer*. Nueva York, EE. UU.: Chelsea Green Publishing.
- Mirza, M. M. Q. (2003). Climate change and extreme weather events: can developing countries adapt? *Climate Policy*, 3(3), 233-248. doi:10.1016/S1469-3062(03)00052-4.

- Moore, F. C., & Lobell, D. B. (2014). Adaptation potential of European agriculture in response to Climate Change. *Nature Climate Change* 4(7), 610-614. doi:10.1038/nclimate2228.
- Pacifici, M., Foden, W. B., Visconti, P., Watson, J. E. M., Butchart, S. H. M., Kovacs, K. M., ... Rondinini, C. (2015). Assessing species vulnerability to climate change. *Nature Climate Change*, 5(3), 215-224. doi:10.1038/nclimate2448.
- Panthi, A., Hallen-Adams, H., Wegulo, S. N., Hernández Nopsa, J., & Baenziger, P. S. (2014). Chemotype and aggressiveness of isolates of *Fusarium graminearum* causing head blight of wheat in Nebraska. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 36(4), 447-455. doi:10.1080/07060661.2014.964775.
- Pautasso, M., & Jeger, M. J. (2014). Network epidemiology and plant trade networks. *AoB plants*, 6(0), plu007. doi:10.1093/aobpla/plu007.
- Peterson, T. C., Jr., R. R. H., Hirsch, R., Kaiser, D. P., Brooks, H., Diffenbaugh, N. S., ... Wuebbles, D. (2013). Monitoring and understanding changes in heat waves, cold waves, floods, and droughts in the United States: State of knowledge. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(6), 821-834. doi:10.1175/bams-d-12-00066.1.
- Petzinger, E. & Weidenbach, A. (2002). Mycotoxins in the food chain: The role of ochratoxins. *Livestock Production Science*, 76(3), 245-250. doi:10.1016/S0301-6226(02)00124-0.
- Pitt, J. I. (2000). Toxigenic fungi and mycotoxins. *British Medical Bulletin*, 56(1), 184-192. doi:10.1258/0007142001902888.
- Rosenzweig, C., Iglesias, A., Yang, X., Epstein, P. R., & Chivian, E. (2001). Climate change and extreme weather events; implications for food production, plant diseases, and pests. *Global change & human health*, 2(2), 90-104.
- Rosenzweig, C., & Parry, M. L. (1994). Potential impact of Climate Change on world food supply. *Nature*, 367(6459), 133-138. doi:10.1038/367133a0.
- Ruane, A. C., Winter, J. M., McDermid, S. P., & Hudson, N. I. (2015). AgMIP Climate Data and Scenarios for Integrated Assessment. En A. Rosenzweig, & D. Hillel (Eds.), *Handbook of Climate Change and Agroecosystems* (pp. 45-78). Londres, Reino Unido: Imperial College Press.
- Shaw, M. W., & Pautasso, M. (2014). Networks and plant disease management: Concepts and applications. *Annual Review of Phytopathology*, 52, 477-493. doi:10.1146/annurev-phyto-102313-050229.
- Skelsey, P., Cooke, D. E. L., Lynott, J. S., & Lees, A. K. (2016). Crop connectivity under Climate Change: Future environmental and geographic risks of potato late blight in Scotland. *Global Change Biology*, 22(11), 3724-3738. doi:10.1111/gcb.13368.
- Skelsey, P., & Newton, A. C. (2015). Future environmental and geographic risks of Fusarium head blight of wheat in Scotland. *European Journal of Plant Pathology*, 142(1), 133-147. doi:10.1007/s10658-015-0598-7.
- Sutrave, S., Scoglio, C., Isard, S. A., Hutchinson, J. M. S., & Garrett, K. A. (2012). Identifying highly connected counties compensates for resource limitations when evaluating national spread of an invasive pathogen. *PLoS One*, 7(6), 1-12. doi:10.1371/journal.pone.0037793.
- Thomas-Sharma, S., Andrade-Piedra, J., Carvajal Yepes, M., Hernández Nopsa, J. F., Jeger, M. J., Jones, R. A. C., ... Garrett, K. A. (2017). A Risk assessment framework for seed degeneration: Informing an integrated seed health strategy for vegetatively propagated crops. *Phytopathology*, 107(10), 1123-1135. doi:10.1094/PHYTO-09-16-0340-R.
- Urban, M. C. (2015). Accelerating extinction risk from Climate Change. *Science*, 348(6234), 571-573. doi:10.1126/science.aaa4984.
- Vose, R. S., S. Applequist, M. A. Bourassa, S. C. Pryor, R. J. Barthelmie, B. Blanton, ... Young, R. S. (2014). Monitoring and understanding changes in extremes: Extratropical storms, winds, and waves. *Bulletin of America Meteorology Society*, 95, 377-386. doi:10.1175/BAMS-D-12-00162.1.
- Wegulo, S. N. (2012). Factors influencing deoxynivalenol accumulation in small grain cereals. *Toxins*, 4(11), 1157-1180. doi:10.3390/toxins4111157.
- Wegulo, S. N., Baenziger, P. S., Hernández Nopsa, J., Bockus, W. W., & Hallen-Adams, H. (2015). Management of Fusarium head blight of wheat and barley. *Crop Protection*, 73(0), 100-107. doi:10.1016/j.cropro.2015.02.025.
- Wegulo, S. N., Bockus, W. W., Hernández Nopsa, J., De Wolf, E. D., Eskridge, K. M., Peiris, K. H. S., & Dowell, F. E. (2011). Effects of integrating cultivar resistance and fungicide application on Fusarium head blight and deoxynivalenol in winter wheat. *Plant Disease*, 95(5), 554-560. doi:10.1094/PDIS-07-10-0495.
- Wu, F. (2015). Global impacts of aflatoxin in maize: trade and human health. *World Mycotoxin Journal*, 8(2), 137-142. doi:10.3920/wmj2014.1737.
- Wu, F., Bhatnagar, D., Bui-Klimke, T., Carbone, I., Hellmich, R., Munkvold, G., ... Takle, E. (2011). Climate Change impacts on mycotoxin risks in US maize. *World Mycotoxin Journal*, 4(1), 79-93. doi:doi:10.3920/WMJ2010.1246.
- Wu, F., & Guclu, H. (2012). Aflatoxin Regulations in a Network of Global Maize Trade. *PLoS One*, 7(9). doi:10.1371/journal.pone.0045151.
- Wu, F., & Guclu, H. (2013). Global Maize Trade and Food Security: Implications from a Social Network Model. *Risk Analysis*, 33(12), 2168-2178. doi:10.1111/risa.12064.
- Xing, Y., Hernández Nopsa, J., Andrade-Piedra, J., Beed, F., Blomme, G., Carvajal Yepes, M., ... Garrett, K. A. (2017). Global cropland connectivity: A risk factor for invasion and saturation by emerging pathogens and pests. *bioRxiv, Article 106542*. doi:10.1101/106542.
- Zefferman, M. R. (2017). Cultural multilevel selection suggests neither large or small cooperative agreements are likely to solve Climate Change without changing the game. *Sustainability Science*, 13(1), 109-118 doi:10.1007/s11625-017-0488-3.
- Zhang, X., Halder, J., White, R. P., Hughes, D. J., Ye, Z., Wang, C., ... Fitt, B. D. L. (2014). Climate change increases risk of Fusarium ear blight on wheat in central China. *Annals of Applied Biology*, 164(3), 384-395. doi:10.1111/aab.12107.