

La modelación y simulación matemáticas: una herramienta para la protección de cultivos

Elisa Duran-Peralta¹

Erik Acuayte-Valdes¹

María del Consuelo Acuayte-Valdes²

Juan Carlos Hernández-López³

Irineo Lorenzo López-Cruz^{4§}

¹Postgrado en Fitosanidad-Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56264. Tel. 55 59548371. (duranelly5@gmail.com; acuaytevaldez@gmail.com). ²Ingeniería en Agronomía-Nova Universitas. Carretera a Puerto Ángel km 34.5, Ocotlán de Morelos, Oaxaca. CP. 71513. Tel. 55 16086172. (acuayte@novauniversitas.edu.mx). ³Instituto Tecnológico Agropecuario de Puebla. Carretera Palomas- Tlapa km 20.5, Tecamatlán, Puebla. CP. 74870. Tel. 595 1085753. (carlos.hdz.3@yahoo.com.mx). ⁴Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua-Universidad Autónoma Chapingo-Edificio Efraín Hernández Xolocotzi, PB. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México. CP. 56230. Tel. 554 8445105.

§Autor para correspondencia: loci61@hotmail.com.

Resumen

Las consecuencias del cambio climático en los cultivos son motivo de preocupación, ya que éstos no pueden adaptarse rápidamente a las nuevas amenazas patógenas. En este artículo se hace una revisión sobre el uso global de modelos matemáticos en fitosanidad durante el periodo 2000-2020; a través, de Scopus y Google Académico. El objetivo del estudio es presentar la modelación y simulación como una opción en la protección de cultivos ante los riesgos meteorológicos o variaciones que se producen por el calentamiento global. La modelación matemática no es en sí un fin, sino una herramienta que ayuda en la toma de decisiones para el manejo sustentable de los cultivos. La predicción del riesgo de ocurrencia de una plaga o enfermedad favorece la reducción de uso de pesticidas disminuyendo así las pérdidas económicas y el daño al ambiente. Por otra parte, la simulación o solución numérica de los modelos matemáticos, permite la exploración de hipótesis, es un medio invaluable en la investigación, ya que permite explorar posibles escenarios futuros y encontrar opciones de sistemas de manejo que en algún momento serán necesarias. En México es necesario realizar investigaciones para la generación e implementación de modelos matemáticos que permitan un menor costo de producción y menor impacto negativo a la salud humana y al ambiente.

Palabras clave: cómputo aplicado a fitosanidad, manejo de enfermedades, toma de decisiones.

Recibido: agosto de 2022

Aceptado: septiembre de 2022

Las consecuencias del cambio climático en los cultivos son motivo de preocupación, ya que éstos no pueden adaptarse rápidamente a las nuevas amenazas patógenas (Garrett *et al.*, 2013). Para analizar el incremento de la intensidad y ocurrencia de los patógenos y plagas es necesario tomar en cuenta que históricamente las variaciones climáticas muestran fluctuaciones, principalmente de la temperatura con respecto al promedio anual (Mora *et al.* (2014). Urgen acciones que conecten la ciencia con los productores respecto a la adaptación y control de plagas en respuesta a los riesgos agrometeorológicos y climáticos (López, 2014). La modelación de sistemas dinámicos adaptativos es una herramienta útil para la creación de modelos de simulación de sistemas complejos, que permiten el diseño de escenarios compuestos por diversas estrategias, y la valoración de sus resultados en el sistema (Martínez y Vargas, 2016).

La simulación de sistemas es la solución numérica del modelo matemático dinámico de un sistema. Este modelo dinámico generalmente es un conjunto de ecuaciones diferenciales o ecuaciones en diferencias, que no tienen solución exacta sino sólo numérica. Es necesario desarrollar modelos dinámicos y simular para controlar y optimizar un sistema, así como incrementar el conocimiento científico (López, 2014) y aplicarlo para el manejo de plagas y enfermedades basado en el pronóstico. Para que una enfermedad se desarrolle, se requieren tres aspectos conocidos como triángulo fitopatológico: una planta hospedante susceptible, un ambiente propicio y un agente patógeno. Se transforma en pirámide al considerar al factor humano y su capacidad de influir en algunos aspectos de la planta, del patógeno y del tiempo (Téliz y Mora, 2007).

Modelación matemática de sistemas

Durante las décadas de los 60's-70's se resaltó la importancia de los grados días de desarrollo (GDD) para entender la fenología de la planta y su relación con las plagas (acumulación de unidades calor). Por la abundancia de datos, se realizaron análisis mediante sistemas de cómputo, se estimó, en conjunto, la dinámica de crecimiento y producción de las plantas, así como de sus plagas y los datos climatológicos del lugar, permitiendo así el desarrollo de modelos de predicción para la toma de decisiones en el manejo de prácticas culturales de la planta o en etapas precisas de la biología de la plaga (Téliz y Mora, 2007).

De Wit y de Vries (1982), propusieron la clasificación de modelos de crecimiento y desarrollo de cultivos de la escuela de modelación de Wageningen. Es una clasificación en cuatro situaciones de producción: crecimiento potencial, crecimiento limitado por agua, modelos para crecimiento limitado por nitrógeno y producción limitada en nutrientes (Bouman *et al.*, 1996). En las cuatro situaciones, las plagas, enfermedades o malezas pueden reducir aún más la producción en campo. En la práctica, las situaciones reales de producción son difíciles de asignar a cualquier de estas cuatro situaciones, pero esta simplificación práctica de esquematizar situaciones específicas permite avanzar, especialmente al inicio de un estudio (De Wit y de Vries, 1982).

El grupo Wageningen tiene una larga tradición en la modelación de cultivos en su programa de investigación agroecológica, basado en el trabajo pionero de Wit (Van Ittersum *et al.*, 2003). En la década de 1980, científicos en Wageningen se involucraron en el desarrollo y aplicación de modelos de cultivos que pudieran apoyar en la toma de decisiones racionales sobre el uso de plaguicidas. Estos incluyen el modelado de especies perennes en sistemas forestales (Kramer, 1996) y los efectos de los factores que reducen el rendimiento, como las malezas (Kropff, 1988), plagas (Fransz, 1974) y sistemas de soporte para la toma de decisiones para plagas y enfermedades (Rossing, 1993).

Investigaciones como la de Campbell y Madden (1990) resaltaron la importancia de la predicción del aumento de una enfermedad antes de rebasar el umbral que cause pérdidas económicas en el cultivo. El pronóstico de la enfermedad en días o semanas antes de que una epidemia ocurra, permite que los productores respondan de manera oportuna y eficiente en el manejo de los cultivos (Maloy, 1993). Además, una predicción de bajo riesgo de ocurrencia de la enfermedad puede reducir el uso de plaguicidas y daños ambientales (De Wolf e Isard, 2007). Los modelos matemáticos y computacionales permiten representar el avance de una enfermedad o una epidemia.

La descripción cuantitativa de las epidemias proporciona información relacionada con la cantidad de inóculo inicial, el ambiente, resistencia de la planta, el sistema de predicción y la eficiencia del manejo del cultivo (Achicanoy, 2000). Ruiz (2020), clasificó a los modelos de acuerdo con su aplicación en: a) docencia; b) investigación: prueba de hipótesis, mejoramiento genético, adaptación al cambio climático y optimización de insumos; y c) sistemas de soporte para la toma de decisiones: pronóstico de plagas y enfermedades, fechas de siembra, variedades, pronóstico de rendimiento y manejo del riego y fertilización.

Existen tres tipos de modelos matemáticos de sistemas: modelos empíricos, modelos teleonómicos y modelos mecanicistas (Thornley y France, 2007). Un modelo mecanicista es definido mediante un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias no-lineales, las cuales describen las variables de estado del sistema, aquellas variables que representan las propiedades relevantes o atributos del sistema considerado. Los modelos explicativos son más apropiados para expresar hipótesis matemáticamente y proporcionan así una descripción cuantitativa y una explicación de los procesos más importantes que ocurren en un sistema biológico. Los modelos mecanicistas, simulan sistemas como funciones de variables ambientales medidas o estimadas. Se consideran prometedores para resolver el problema, pero también son de difícil desarrollo.

La investigación en la protección de cultivos se puede agrupar en: a) investigación básica. Caracteriza el crecimiento y desarrollo de cultivos, los enemigos biológicos, factores que determinan su adaptación, y modelos predictivos del comportamiento de los organismos dañinos; y b) investigación aplicada. Se monitorean problemas fitosanitarios mediante aplicaciones que usan modelos de simulación y bases de datos climáticas. Incluye métodos y procedimientos para la evaluación del daño causado por la plaga (SIAFEG, 2010).

Los investigadores del área agrícola deben promover el conocimiento de la teoría de sistemas y control (Van Straten, 2012). Un sistema es una representación simplificada de una porción de la realidad. Es una serie de elementos seleccionados y elegidos, con límites especificados y características de tiempo predeterminada (Savary y Willocquet, 2014). Actualmente hay una gran cantidad de software disponible que puede ayudar a construir y ejecutar modelos.

Los sistemas de modelado extensible son paquetes que permiten que el usuario agregue un código específico si los métodos no son suficientes para sus propósitos (Voinov, 2008). Por ejemplo, el programa Stella[®] permite enfocarse sólo en los componentes, la estructura, las relaciones y el comportamiento del sistema, más que en el código del programa en sí (ISEE Systems, 2010). Vensim[®] posee las mismas características básicas para la modelización que Stella, con la adición de algunas funciones importantes, como la calibración (ajusta automáticamente los parámetros para obtener la mejor correspondencia entre el comportamiento del modelo y los datos), la optimización (el algoritmo eficaz), el filtro de Kalman, el análisis de Monte Carlo, el rastreo causal (un diagrama de árbol muestra una variable seleccionada y las variables que ‘causan’ su cambio) (Voinov, 2008).

Fortran simulation translator (FST[®]) es un ambiente de simulación que permite al investigador desarrollar conceptos en términos de ecuaciones matemáticas. Este sistema computacional se puede ejecutar utilizando subrutinas de bibliotecas matemáticas estándar y desarrolladas por el usuario en el lenguaje de programación Fortran, por ello es una herramienta valiosa, tanto para la investigación como para la educación (Van Kraalingen *et al.*, 2003). A nivel mundial existen modelos de crecimiento y rendimiento en escenarios de cambio climático (Noriega-Navarrete *et al.*, 2021). Modelos de simulación específicos para un cultivo; por ejemplo, en trigo el Ceres-wheat, en maíz Corngro, o pueden ser genéricos y aplicarse a diferentes especies utilizando parámetros específicos para cada cultivo: Daisy, Epic, Wofost, Cropsyst, Y Stics (Steduto, 2006).

Existen modelos de microclima (Pohlheim y Heißner, 1996; Ruiz, 2009). Existe una nueva familia de modelos llamados modelos estructurales-funcionales (Boudon, 2012), utilizan representaciones 3D de la arquitectura de las plantas para simular diferentes tipos de procesos físicos, fisiológicos o eco fisiológicos en las plantas y permiten evaluar los efectos de estos procesos en el funcionamiento, el desarrollo y la forma de las plantas (Rongier *et al.*, 2017) y su interacción con patógenos (Hanan *et al.*, 2002).

El formalismo L-systems fue introducido por el biólogo y botánico (Lindenmayer, 1968). En los L-systems, la planta está representada por una cadena entre corchetes, cuyos elementos, llamados módulos, representan los componentes de las plantas (metámeros, meristemas, flores, etc.). Los módulos constan de un nombre simbólico y un conjunto opcional de parámetros. Un conjunto de reglas define cómo se transforma cada módulo con el tiempo (Prusinkiewicz, 2021).

Modelos dinámicos

Los modelos dinámicos predicen cómo cambian las variables de interés con el tiempo. López (2014), describe de acuerdo con la teoría de sistemas dinámicos el procedimiento general de modelación de un sistema (Rabbinge *et al.*, 1989; Van Straten, 2012; López, 2014): 1) definición de un problema y su análisis; 2) elaboración de una representación conceptual del modelo mediante diagramas relacionales o de Forrester (1971), a partir de conocimiento existente en la literatura. Esto es un modelo cualitativo del sistema; 3) el modelo cuantitativo se puede generar mediante dos opciones: los modelos de caja negra (MCN) y los modelos transparentes o mecanicistas (MTM). En los MCN se diseñan y realizan experimentos reales para obtener un modelo empírico, basado en mediciones de variables denominadas entradas y salidas del sistema.

En el caso de los MTM, se postula el conjunto de ecuaciones dinámicas (ecuaciones diferenciales o en diferencias) también llamada la estructura del modelo (Thornley y France, 2007), tomando como base el modelo conceptual, los objetivos del modelo, las teorías y datos existentes en la literatura, así como las restricciones existentes (datos, tiempo, entre otros).

Estas técnicas son útiles para describir todos los aspectos relacionados con los sistemas agrícolas, entre ellos el desarrollo de plagas y enfermedades; 4) una vez que se han generado las ecuaciones diferenciales ordinarias o ecuaciones en diferencias, no lineales, estas se resuelven numéricamente usando computadoras digitales mediante la simulación; 5) el análisis de incertidumbre permite evaluar cuantitativamente la variabilidad en los parámetros o variables de entrada del modelo, mediante la deducción de distribuciones de incertidumbre para cada variable que el modelo predice; 6) posteriormente se hace un análisis de sensibilidad del modelo para observar cómo sus

condiciones iniciales, las variables de entrada y los parámetros afectan el comportamiento de las variables de estado y variables de salida; 7) mediante un análisis de identificabilidad se puede saber si el vector de parámetros del modelo dinámico puede ser determinado en forma única a partir de las variables de entrada y variables de salida.

Los métodos usados en identificabilidad práctica de modelos son: simulación Monte Carlo, matriz de correlación o cálculo de la matriz de información de Fisher y métodos basados en análisis de sensibilidad; y 8) se realiza la estimación de parámetros o calibración del modelo usando información existente en la literatura, datos provenientes de experimentos y los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad. Esto para aproximar lo más posible las predicciones de las variables de estado y variables de salida del modelo a mediciones obtenidas del sistema real.

Tanto en los MM como en los MCN se pueden usar varios conjuntos de datos y lograr un modelo calibrado en forma satisfactoria; 9) se continúa con la etapa de evaluación (validación) del modelo, ésta consiste en usar conjuntos de datos independientes para estudiar el comportamiento del modelo, usando los valores de sus parámetros obtenidos durante la fase de calibración; y 10) una vez que se obtiene un modelo evaluado se puede usar para alguna aplicación o llevar a cabo otro análisis de incertidumbre. Una etapa crucial en el desarrollo de un modelo es el proceso de verificación, consiste en comprobar que el modelo es ‘tan real como la vida misma’ (Taylor, 2003). El procedimiento de modelación de sistemas es un proceso iterativo que permite regresar de una etapa a otra hasta que el modelo matemático sea una representación aceptable del comportamiento del sistema real.

Simulación de sistemas

Mahalanabis (1982) considera las siguientes etapas en la ingeniería de los sistemas: modelación, análisis, simulación y diseño. Simular es el acto de ejecutar un modelo matemático y obtener resultados sobre las variables de interés (Ruiz, 2020). Es necesario explorar diferentes escenarios mediante modelos de simulación, para analizar y encontrar opciones de manejo del cultivo para mantener o incrementar la productividad.

En la simulación del efecto de las plagas se debe considerar que estas pueden causar grandes pérdidas, cuando: la población del hospedante es susceptible y uniforme genéticamente, los hospedantes están agrupados o muy juntos, el patógeno se incrementa con rapidez por su capacidad reproductiva; el clima y otros factores son apropiados para su diseminación y desarrollo y el periodo de condiciones favorables es óptimo para sostener la epidemia (Jarvis, 2000).

Los modelos de simulación se han convertido en herramientas importantes en epidemiología, permiten la exploración de hipótesis y son un medio invaluable para guiar la investigación (APS, 2018). Ayudan a resolver preguntas específicas (Zadoks y Rabbinge, 1985) y explorar el conocimiento disponible de un sistema. Esto debido al vínculo que existe entre los niveles de integración en los sistemas biológicos (Rabbinge *et al.*, 1989). La simulación es única como enfoque científico ya que permite explorar posibles futuros. Es de particular importancia la dependencia que tiene la agricultura del clima, por su alta sensibilidad al cambio climático global y variabilidad climática, razón que hace esencial entender las interacciones entre el cambio climático y la producción agrícola para el desarrollo estable de la sociedad (Hui *et al.*, 2013).

La simulación puede proporcionar un análisis práctico e intuitivo de los sistemas de enfermedades de las plantas y permite explorar la sensibilidad de los sistemas fitopatógenos a algunos de sus componentes especificados (Savary y Willocquet, 2014). De acuerdo con Ruiz (2020), los retos de la modelación de cultivos son: 1) mejorar la calidad predictiva de los modelos (menos modelos, pero mejores); 2) generar y hacer accesible información meteorológica, suelo y cultivo, necesarios para realizar las simulaciones; 3) desarrollar modelos para manejo del riego y fertilización, considerando un público no especializado en modelación; 4) incorporar la simulación de cultivos en los programas de estudio de las carreras de ingeniería agronómica; y 5) mayor colaboración entre especialistas de diferentes áreas para el desarrollo, mejora y difusión de los modelos de simulación.

La evaluación (validación) es una demostración de que un modelo, dentro de un dominio de aplicación específico, tiene una precisión predictiva aceptable en ese dominio (Thornley, 2007). Actualmente con la ayuda de las computadoras se pueden ejecutar simulaciones de clima, crecimiento poblacional de plagas, desarrollo del cultivo, generando datos para que los fitopatólogos los utilicen en el pronóstico y manejo de enfermedades.

Modelos aplicados a la fitosanidad

Un caso de modelación con un enfoque fitosanitario es el de la palomilla del manzano, en el cual contabilizan unidades calor para conocer la diapausa de los insectos y así poder establecer momentos óptimos para un control eficiente (Jacobo *et al.*, 2005). Otros ejemplos de modelos matemáticos para la protección de cultivos de plagas (*Spodoptera frugiperda* (Yáñez *et al.*, 2019); *Meloidogyne incognita* - *Trichoderma* sp., (Miranda *et al.*, 2016); *Lobesia botrana* (Dagatti y Becerra, 2015); *Liriomiza* (Hernández *et al.*, 2009); *Aeneolamia postica* (García *et al.*, 2006); *Spodoptera exigua* y *Helicoverpha zea* (Cabello y Carreño, 2002); *H. zea*, *Helicoverpha armigera* y *bemisia tabaci* (Gámez *et al.*, 2000) y enfermedades (*Phytophthora ramorum* (Magarey, 2007); *Phytophthora infestans* (Rebellón *et al.*, 2020); *Xanthomonas campestris* (Rocha, 2020); *Cladosporium cladosporioides* (Romero *et al.*, 2016); *Altenaria tenuissima* (Moschini *et al.*, 2014); *Gibberella zae* y *Magnaporthe grisea* (Fernandes *et al.*, 2011); *Mycosphaerella fijiensis* (Freitez *et al.*, 2009); *Phytophthora infestans* (Gómez *et al.*, 2002); *Botrytis cinerea* (Vidal *et al.*, 2001)), así como modelos de nicho ecológico que se han usado al modelar la distribución de especies (*Moniliophthora roreri* (Vilchez, 2021); *Colletotrichum acutatum* (Quishpe, 2020); *Xylella fastidiosa* (Gutiérrez, 2019); *Rhagoletis* sp., (Samano, 2019); *Phyllophaga ravidia* (Aragón *et al.*, 2018), pueden ser encontrados en la literatura.

México cuenta con un Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos, el cual se encarga de ofrecer a los productores agropecuarios información meteorológica en tiempo real para la toma de decisiones en sus sistemas de producción y reducir los riesgos ocasionados por las condiciones climáticas adversas (INIFAP, 2021). En el país se han realizado algunos estudios encaminados al uso de la modelación en el área de plagas y enfermedades (Guzmán *et al.*, 1999; Jacobo *et al.*, 2005; Hernández *et al.*, 2009; Hernández *et al.*, 2013; Duran *et al.*, 2017; Hernández *et al.*, 2020). López *et al.* (2021; 2022a); López *et al.* (2022b) generaron modelos dinámicos del desarrollo de trips fitófagos y trips de control biológico en aguacate, con estos se puede simular el avance de las poblaciones de presas en sus diferentes etapas biológicas y cuantificar la cantidad de depredadores que deben introducirse para un control biológico efectivo.

Es necesario transferir el conocimiento mediante las herramientas computacionales actuales y apoyar así en la toma de decisiones a los productores de los diferentes cultivos. En la Figura 1 se muestra que el uso de modelos de simulación en cultivos asociados a plagas y enfermedades va en forma creciente con el paso del tiempo. Esto se debe al fácil acceso a la información, al uso de la tecnología para el análisis de datos y al procesamiento rápido de la información que relaciona: elementos del clima, el crecimiento y desarrollo del cultivo, así como el comportamiento de las plagas y enfermedades.

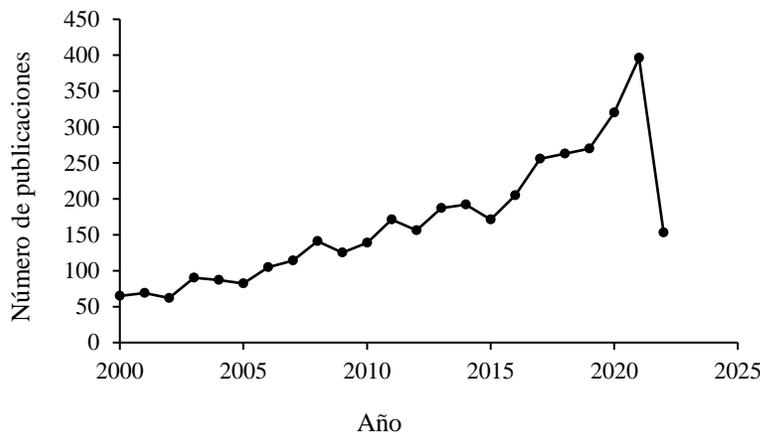


Figura 1. Número de publicaciones relacionadas a la modelación aplicada a la protección de cultivos.

Los países que más publican sobre modelación aplicada a la fitosanidad son: Estados Unidos de América, China, Inglaterra y Francia. Las instituciones que tienen más publicaciones de este tema son: United States Department of Agriculture, Wageningen University y University of Florida. Las revistas científicas que más publican modelos de plagas y enfermedades son: Pest Management Science, Journal of Economic Entomology, Applied and Environmental Microbiology, Environmental Entomology and Ecological Modelling (Scopus, 2022).

Conclusiones

El principal beneficio económico de la modelación y simulación de sistemas es el ahorro que los productores pueden tener al aplicar solo el número indispensable de aspersiones. La modelación puede favorecer un mejor manejo del cultivo, menor daño ambiental, y una producción inocua, que cumpla los estándares más exigentes de actuales y nuevos mercados de exportación para algunos productos, como es el europeo y el asiático donde existe una gran población y poder adquisitivo.

El tipo de modelo dependerá del problema que se estudie, puede ser útil para entender la dinámica de las infecciones o como instrumento de pronóstico. Por ello es necesaria una buena comprensión del sistema biológico a estudiar y definir la recolección de datos de acuerdo con los objetivos del modelo. La simulación de sistemas es una herramienta que permite la exploración de posibles escenarios futuros y la comprensión de que algunos componentes pueden tener mayor o menor efecto en el sistema planta-patógeno a través del tiempo. Puede ser útil en el análisis de la resistencia de la planta huésped, porque permite rastrear a través del tiempo procesos que no se pueden ver y que se pueden vincular con los avances actuales en el mejoramiento molecular.

La distribución espacio temporal de las plagas y enfermedades en los agroecosistemas pueden simular y evaluar escenarios para un manejo eficiente y sustentable.

Literatura citada

- Achicanoy, L. H. 2000. Descripción cuantitativa de las epidemias de las plantas. Rev. Facultad Nacional Agrícola de Medellín. 1(53): 941-968.
- APS. 2018. American Phytopathological Society. Simulation Modeling in Botanical Epidemiology and Crop Loss Analysis. Encontrado. <https://www.apsnet.org/edcenter/advanced/topics/BotanicalEpidemiology/Pages/SimulationModels.aspx>.
- Aragón, G. A.; Guillen, S. D.; Juárez, L. P. y Alía, T. I. 2018. Interacción geográfica del nicho ecológico de *Phyllophaga ravidal* y dos cultivos agrícolas en México. Geographic Interaction of the *Phyllophaga ravidal* Ecological Niche and Two Crops in Mexico. Southwestern Entomologist.
- Boudon, F.; Pradal, C.; Cokelaer, T.; Prusinkisrewicz, P. and Godin, C. 2012. “L-py: an l-system simulation framework for modeling plant development based on a dynamic language,” Frontiers in Plant Science. 3(76).
- Bouman, B. A. M.; Van Keulen, H.; Van Laar, H. H. and Rabbinge, R. 1996. The ‘School of de Wit’ crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. Agricultural Systems. 52(2-3):171-198.
- Cabello, T. y Carreño, R. 2002. Modelos logísticos aplicados a la fenología de noctuidos plagas en el sur de España (Lep. Noctuidae). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España.
- Campbell, C. L. y Madden, L. V. 1990. Introduction to plant disease epidemiology. Wiley, New York. 532 p.
- Dagatti, C. V. y Cristina, B. V. 2015. Ajuste de modelo fenológico para predecir el comportamiento de *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae) en un viñedo de Mendoza, Argentina. Revista de la Sociedad Entomológica Argentina. 74(3-4):117-122.
- De Wit, C. T. and de Vries, F. P. 1982. L’analyse des systemes de production primaire. In la productivite des paturages Saheliens Pudoc. 918:20-23.
- De Wolf, E. D. and Isard, S. A. 2007. Disease cycle approach to plant disease prediction. Annual Review of Phytopathology. 45(9):1-18.
- Durán, P. E.; Téliz, O. D.; Pedroza, S. A.; Mora, A. A.; Ávila, Q. G. D. y González, H. H. 2017. Modelo de pronóstico para el control de la antracnosis del aguacate en Michoacán, México. Colegio de Postgraduados. Fitosanidad-Fitopatología. Tesis de Doctorado. 73 p.
- Fernandes, J. X. y Pavan, W. X. 2011. Sistemas de predicción para enfermedades em cereales de inverno: fusariosis y brusone. In: Embrapa Trigo-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: Pereyra, S.; Ackermann, MD de; Germán, S.; Cabrera, K. (Ed.). Manejo de enfermedades en trigo y cebada. Montevideo: INIA. 37-39 pp.
- Forrester, J. W. 1971. Principles of systems. Pegasus communications, Inc. Waltham, MA. USA. 392 p.
- Fransz, H. G. 1974. The Functional Response to Prey Density in An Acarine System. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen. The Netherlands. 143 p.
- Freitez, J. A.; Ablan, M. y Gómez, C. 2009. Propuesta de modelos predictivos del brote de la Sigatoka Negra para las plantaciones de plátano al sur del Lago de Maracaibo, Venezuela. Rev. Científica UDO Agrícola. 9(1):191-198.

- García, G. C. G.; López, C. J.; Nava, T. M. E.; Villanueva, J. J. A. y Vera, G. J. 2006. Modelo de predicción de riesgo de daño de la mosca pinta *Aeneolamia postica* (Walker) Fennah (Hemiptera: Cercopidae). *Neotropical Entomology*. 35:677-688.
- Gámez, M.; Carreño, R.; Ándujar, A. S.; Barranco, P. y Cabello, T. 2000. Modelos matemáticos de depredador-presa en cultivos hortícolas en invernadero en el sudeste de la Península Ibérica. *Bol San Veg Plagas*. 26:665-672.
- Garrett, K. A.; Forbes, G. A.; Gómez, L.; Gonzales, M. A.; Gray, M.; Skelsey, P. y Sparks, A. H. 2013. Cambio climático, enfermedades de las plantas e insectos plaga. *In: Jiménez, Z. E. (Coord.). Cambio climático y adaptación en el altiplano boliviano*. La Paz (Bolivia). CIDES-UMSA SANREM CRSP Universidad de Missouri Universidad Mayor de San Andres; Fundacion PROINPA; Universidad de la Cordillera; Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).
- Gómez, G.; Suárez, M.; Figueroa, M.; Rivero, T. y Hernández, A. 2002. Pronóstico del tizón tardío (*Phytophthora infestans* (MONT.) de BARY) de la papa en Cuba. II. evaluación de la efectividad del modelo naumova modificado. *Fitosanidad*. 6(2):35-39.
- Gutiérrez, H. O. y García, L. V. 2019. La dimensión geográfica de las invasiones biológicas en el Antropoceno: el caso de *Xylella fastidiosa*.
- Guzmán, F. A.W.; Alatorre, R. R.; Pérez, D. F. y Nolasco, Q. X. 1999. Grados día de desarrollo de *Sphenarium purpurascens* (Charpentier)(Orthoptera: Pyrgomorphidae) y su susceptibilidad a *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill. (Deuteromycotina: Hyphomycetes bajo condiciones de campo. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, *Campus* Montecillo, Instituto de Fitosanidad, Especialidad en Entomología y Acarología.
- Hanan, J.; Prusinkiewicz, P.; Zalucki, M. and Skirvin, D. 2002. Simulation of insect movement with respect to plant architecture and morphogenesis. *Computers and Electronics in Agriculture*. 35(2-3):255-269.
- Hernández, D. M. G.; Rojas, M. R. I.; Rivera, P. A.; Zavaleta, M. E.; Ochoa, M. D. L. and Carrillo, S. J. A. 2020. Evaluation of Zebra Chip Using Image Analysis. *American Journal of Potato Research*. 97(6):586-595.
- Hernández, R. E.; Vera, G. J.; Ramírez, V. G.; Pérez, E. S.; López, C. J.; Bautista, M. N. y Pinto, V. M. 2009. Pronóstico de la fluctuación poblacional del minador de la hoja de crisantemo *Liriomyza huidobrensis* Blanchard (Diptera: Agromyzidae), mediante modelos de series de tiempo. *Acta Zoológica Mexicana*. 25(1):21-32.
- Hernández, Z. M. I.; Quijano, C. J. A.; Yáñez, L. R.; Ocampo, V. R.V.; Torres, P. I.; Guevara, G. R.G. and Castro, R. A. E. 2013. Dynamic simulation model of central American locust *Schistocerca piceifrons* (Orthoptera: Acrididae). *Florida Entomologist*. 96(4):1274-1283.
- Hui, J. L.; Er-da, T.; Wheeler, A.; Challinor, P. and Shuai, J. 2013. climate change modelling and its roles to chinese crops yield. *J. Int. Agric*. 12(5):892-902.
- INIFAP, 2021. <http://www.inifap-nortecentro.gob.mx/>. <http://clima.inifap.gob.mx/lnmysr>.
- Jarvis, P. J. 2000. *Ecological principles and environmental issues*. Prentice-Hall, Nueva York, EEUU.
- Jacobo, C. J.; Mora, A. G.; Ramírez, L. M.; Vera, G. J.; Pinto, V. X.; López, C. J. y Aceves, N. L. 2005. Caracterización cuantitativa de la diapausa de palomilla de la manzana *Cydia pomonella* L. en Cuauhtémoc, Chihuahua, México. *Agrociencia*. 39(2):221-229.
- Kramer, K. 1996. Phenology and growth of European trees in relation to climate change. PhD Thesis. Wageningen University, The Netherlands. 210 p. ISBN 905485 464/2.
- Kropff, M. J. 1988. Modelling the effects of weeds on crop production. *Weed Research*. 28:465-471.

- Lindenmayer, A. 1968. Mathematical models for cellular interactions in development I. Filaments with one-sided inputs. *Journal of Theoretical Biology*. 18(3):280-299.
- López, C. I. L. 2014. Metodología de modelación matemática dinámica de ambientes agrícolas controlados: avances y retos. Universidad Autónoma Chapingo.
- López, C. I. L.; Duran, P. E.; Salazar, M. R. y Fitz, R. E. 2022a. Modelo dinámico depredador-presa para *Franklinothrips* y *Scirtothrips* en aguacate: simulación y análisis de sensibilidad. *In: información, estabilidad y dinámica en los modelos económicos*. Asociación Mexicana de Investigación Interdisciplinaria. Pérez, S. F.; Figueroa, H. E.; Salazar, M. R.; Sepúlveda, J. D.; Escamilla, G. P. y Jiménez, G. M. (Comps). ASMIA AC. Ciudad de México, México. ISBN: 978-607-99921-2-5. 27-42 pp.
- López, C. I. L.; Duran, P. E.; Salazar, M. R.; Fitz, R. E. y Sosa, C. J. O. 2021. Dynamic modeling of thrips population in avocado trees. *Computación y sistemas*.
- López, C. I. L.; Duran, P. E.; Fitz, R. E.; Salazar, M. and Rojano, A. A. 2022b. Predator-prey dynamic model for *Franklinothrips* and *Scirtothrips* in avocado trees (*Persea americana* Mill.): simulation and sensitivity analyses.
- Magarey, D. R.; Fowler, A. G.; Borchert, M. D.; Sutton, B. T.; Colunga, G. M. and Simpson, A. J. 2007. NAPFAST: An Internet System for the Weather-Based Mapping of Plant Pathogens. *Plant Disease*. 91(4):336-345.
- Mahalanabis, A. K. 1982. *Introductory System Engineering*. Wiley, New York. 3-4 pp.
- Maloy, O. C. 1993. *Plant Disease Control*. Wiley, New York. 351-356 pp.
- Martínez, A. P. F. y Vargas, H. A. 2016. Modelo dinámico adaptativo para la gestión del agua en el medio urbano. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 7(4):139-154.
- Miranda, C. I.; Hernández, O. D.; Hernández, A. Y.; Martínez, C. B. y Rodríguez, H. M. G. 2016. Modelación de la interacción *Meloidogyne incognita* (Kofoid y White) Chitwood *Trichoderma asperellum* Samuels, Lieckfeldt & Nirenberg en garbanzo (*Cicer arietinum* L.). *Revista Protección Vegetal*. 31(3):194-200.
- Mora, A. G.; Acevedo, S. G.; Calderón, E. G.; Flores, S. J.; Domínguez, M. S.; Baker, P. X. y González, G. R. 2014. Consideraciones epidemiológicas del cambio climático en la Fitosanidad de cultivos tropicales. *Rev. Mexicana de Fitopatología*. 32(2):147-167.
- Moschini, R. C.; Bombelli, E. C.; Wright, E. R.; López, M. V.; Perez, C. H. I.; Carmona, J. D. y Rivera, M. C. 2014. Ajuste de modelos logísticos a la tasa de incremento de severidad de manchas foliares ocasionadas por *Alternaria tenuissima* en arándano= Logistic models adjustment to growth rate of severity of blueberry leaf spot caused by *Alternaria tenuissima*. Asociación Argentina de Horticultura.
- Noriega, N. J. L.; Salazar, M. R. y López, C. I. L. 2021. Revisión: modelos de crecimiento y rendimiento de maíz en escenarios de cambio climático. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 12(1):127-140.
- Pohlheim, H. and Heißner, A. 1996. Optimal Control of Greenhouse Climate using Genetic Algorithms. in MENDEL'96-2nd International Conference on Genetic Algorithms. Technical University of Brno, Czech Republik. 112-119 pp.
- Prusinkiewicz, P. 2021. Algorithmic Botany, Website of the Biological Modeling and Visualization research group in the Department of Computer Science at the University of Calgary. <http://algorithmicbotany.org/>.
- Quishpe, D. N. T. 2020. Modelo de nicho ecológico para predecir la distribución potencial de Antracnosis (*Colletotrichum acutatum*) en el cultivo de chocho (*Lupinus mutabilis* Sweet) en Ecuador. (Bachelor's thesis, Ecuador, Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi UTC).

- Rabbinge, R.; Ward, S. A. and Van Laar, H. H. 1989. Simulation and systems management in crop protection, PUDOC, Wageningen. 420 p.
- Rebellón, J. D. S.; Rodríguez, D. A. L. y Arias, D. G. 2020. Estudio bioinformático del gen CRN8 en *Phytophthora infestans* causante de la enfermedad tizón tardío en plantas. Microciencia. 9:57-81.
- Rocha, C. C. E. y Leal, L. D. D. 2020. Modelo para la detección de la enfermedad *Xanthomonas campestris* en hojas de judía aplicando algoritmos de optimización genéticos y de gradiente.
- Romero, C. T.; López, P. P. A.; Ramírez, L. M. y Cuervo, P. J. A. 2016. Modelado cinético del micoparasitismo por *Trichoderma harzianum* contra *Cladosporium cladosporioides* aislado de frutos de cacao (*Theobroma cacao*). Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences. 32(1):32-45.
- Rongier, G.; Collon, P.; Renard, P. 2017. Stochastic simulation of channelized sedimentary bodies using a constrained L-system. Computers & Geosciences. 105(2017):158-168. ISSN: 0098-3004.
- Rossing, W. A. H. 1993. On damage, uncertainty, and risk in supervised control: aphids and brown rust in winter wheat as an example. PhD Thesis, Wageningen University, The Netherlands. 202 p. ISBN 90-5485-137-6.
- Ruiz, G. A. 2009. Modelos para simulación y control del clima de un invernadero con ventilación natural. Tesis de Maestría en Ingeniería. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 126 p.
- Ruiz, G. A. 2020. La modelación del crecimiento de cultivos: conceptos, aplicaciones y retos. Serie de Seminarios Virtuales 2020. Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación (COMIIR). México. 30 p.
- Scopus. 2022. <http://www.scopus.com>.
- Samano, A. L. L. 2019. Nicho ecológico potencial de ocho especies de Rhagoletis (díptera, tephritidae) de importancia agrícola para México.
- Savary, S. and Willocquet, L. 2014. Simulation modeling in botanical epidemiology and crop loss analysis. Plant Health Instructor. 147 pp.
- SIAFEG, 2010. <http://www.siafeg.com/siafeg/siafeg.htm>.
- Steduto, P. 2006. Biomasa Water-Productivity. Comparing the growth-engines of crop models. 1-16 p. In: WUEMED Training course. "Integrated approaches to improve drought tolerance in crops". Department of Agroenvironmental Sciences and Technology, University of Bologna. Bologna.
- Taylor, N. 2003. Review of the use of models in informing disease control policy development and adjustment. School of Agriculture, Policy and Development.
- Téliz, O. D. y Mora, A. A. 2007. El aguacate y su manejo integrado. Mundiprensa. México. 319 p.
- Thornley, J. H. M. and France, J. 2007. Mathematical models in agriculture: quantitative methods for the plant, animal, and ecological sciences. CABI.
- Van Ittersum, M. K.; Leffelaar, P. A.; Van Keulen, H.; Kropff, M. J.; Bastiaans, L. y Goudriaan, J. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. Eur. J. Agron. 18(3-4):201-234.
- Van Kraalingen, D. W. G.; Rappoldt, C. y Van Laar, H. H. 2003. The Fortran simulation translator, a simulation language. Eur J Agron. 18(3-4):359-361.
- Van Straten, G. X. 2012. Systems dynamics for bioengineers. Lectures Notes. University of Chapingo, Chapingo, México. 146 p.

- Vidal, D. C. I. y Ortega, F. S. 2001. Validación de un modelo de predicción de la enfermedad pudrición gris de la vid, causada por el hongo *Botrytis cinerea*, en un viñedo de la séptima región (Doctoral dissertation, Universidad de Talca, Chile).
- Vilchez, P. C. R. 2021. Potenciales efectos del cambio climático sobre la distribución del hongo (*Moniliophthora roreri* Cif & Par) en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) en Ecuador (Bachelor's thesis, Quevedo: UTEQ).
- Voinov, A. 2008. Systems science and modeling for ecological economics.
- Yáñez, L. R.; Vázquez, O. A.; Arreguín, C. J. H.; Soria, R. J. y Quijano, C. J. Á. 2019. Sistema de alerta contra el gusano cogollero *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) (Insecta: Lepidoptera: Noctuidae). Rev. Mex. Cienc. Agríc. 10(2):405-416.
- Zadoks, J. C. and Rabbinge, R. 1985. Modelling to a purpose. In: Advances in plant pathology, mathematical modelling of crop diseases. CA. Gilligan, (Ed). Academic Press, London. 231-244 pp.