

'Enfoques Modernos para el Diagnóstico y Control de Enfermedades de Cultivos Hortícolas bajo Condiciones de Cambio Climático'

Автор(и): гл. ас. д-р Катя Василева, ИЗК "Марица" - Пловдив

Дата: 25.03.2026 Брой: 3/2026



Resumen

El cambio climático está alterando significativamente la dinámica de las enfermedades de los cultivos hortícolas, lo que conduce a un desarrollo más rápido de los patógenos, una mayor supervivencia del inóculo y brotes epidémicos más frecuentes. El aumento de las temperaturas, las lluvias extremas y los períodos de sequía crean condiciones que facilitan las infecciones por

virus, bacterias y hongos patógenos. En estas condiciones, los métodos de diagnóstico tradicionales suelen ser insuficientes debido a la superposición de síntomas y a los cambios inducidos por el estrés. Los enfoques modernos incluyen pruebas inmunocromatográficas rápidas, métodos moleculares, diagnóstico hiperespectral, tecnologías de drones y modelos predictivos. El manejo eficaz de las enfermedades requiere un enfoque integrado que involucre variedades resistentes, biofungicidas, bioestimulantes y prácticas agronómicas optimizadas. La combinación de herramientas de diagnóstico tradicionales y modernas, respaldada por una evaluación fitopatológica experta, es clave para una producción sostenible en condiciones de cambio climático.

Las enfermedades de las plantas siguen siendo uno de los desafíos más serios para la agricultura moderna, causando pérdidas anuales significativas en rendimiento, calidad y resiliencia del agroecosistema. Según Fang y Ramasamy (2015), las pérdidas causadas por patógenos "oscilan entre el 20% y el 40%" y representan un factor clave que amenaza la seguridad alimentaria global. En condiciones de cambio climático, sistemas de producción intensivos y flujos comerciales globalizados, el riesgo de epidemias, la aparición de nuevas razas y la propagación de patógenos invasores aumenta significativamente (Juroszek & von Tiedemann, 2011).

El manejo eficaz de enfermedades requiere dos direcciones interrelacionadas: un diagnóstico preciso y oportuno, y estrategias de control sostenibles que integren enfoques biológicos, agronómicos, químicos y digitales. En las últimas décadas, el diagnóstico ha experimentado una profunda transformación: desde la evaluación visual y la microscopía hasta los métodos moleculares, las plataformas de fenotipado de alto rendimiento, los sensores remotos y los algoritmos de aprendizaje profundo. Como señalan Balodi et al. (2017), "la ciencia del diagnóstico de enfermedades ha evolucionado desde la inspección visual hasta técnicas serológicas y moleculares altamente sensibles", aumentando significativamente la precisión y velocidad de detección.

Paralelamente, el concepto de control de enfermedades está cambiando de soluciones químicas unilaterales a un manejo integrado, ecológico y evolutivamente sólido. He et al. (2016) enfatizan que el manejo sostenible debe "crear condiciones favorables para el crecimiento de la planta y desfavorables para la reproducción y evolución del patógeno", combinando Resistencia, Evitación, Eliminación, Remediación (RAER, por sus siglas en inglés). Las nuevas tendencias incluyen

biocontrol, extractos vegetales, enfoques genéticos, modelos predictivos y sistemas digitales de apoyo a la decisión (Mukhtar et al., 2023).

En este contexto, se resumen los avances científicos contemporáneos en dos direcciones clave:

(1) diagnóstico de enfermedades de las plantas, incluyendo métodos clásicos, ópticos y basados en IA;

(2) control y manejo integrado, considerando enfoques ecológicos, biológicos, genéticos y tecnológicos.

Este doble enfoque permite rastrear cómo los avances en el diagnóstico respaldan un manejo de enfermedades más preciso, sostenible y adaptable en el contexto de agroecosistemas que cambian dinámicamente.

El diagnóstico eficaz es la base de cualquier estrategia de manejo de enfermedades. Determina la decisión correcta, minimiza las pérdidas y permite una intervención temprana para el control. Como enfatizan Balodi et al., (2017), "la ciencia del diagnóstico de enfermedades ha evolucionado desde la inspección visual... hasta técnicas serológicas y moleculares altamente sensibles". Los enfoques modernos pueden agruparse en tres direcciones principales: métodos de laboratorio clásicos, tecnologías ópticas y remotas, e inteligencia artificial.

Las técnicas serológicas como ELISA, inmunofluorescencia y pruebas inmunocromatográficas rápidas siguen siendo ampliamente utilizadas debido a su especificidad y aplicabilidad en condiciones de campo. ELISA es uno de los métodos más extendidos, donde "el cambio de color visual permite una detección fácil" (Fang & Ramasamy, 2015). Sin embargo, la sensibilidad para patógenos bacterianos es limitada.

Los métodos moleculares, especialmente la PCR y sus variantes (anidada, múltiple, en tiempo real), ofrecen la mayor precisión. Balodi et al., (2017) señalan que los análisis basados en PCR son "específicos, sensibles, eficientes, rápidos y relativamente económicos". La PCR en tiempo real permite una evaluación cuantitativa y es particularmente valiosa para pruebas de semillas y patógenos de cuarentena.

Las plataformas de fenotipado (fluorescencia de clorofila, imágenes hiperespectrales y térmicas) proporcionan observación no destructiva y repetida. Según Balodi et al., (2017) "estos métodos

son no destructivos... y permiten la visualización de reacciones localizadas". El diagnóstico hiperespectral es particularmente prometedor para la detección temprana, ya que captura cambios fisiológicos antes de que aparezcan síntomas visibles.

Fang y Ramasamy (2015) enfatizan que las técnicas hiperespectrales "se utilizan ampliamente para identificar enfermedades a través de cambios en la reflectancia". La termografía y la fluorescencia complementan el análisis, pero son sensibles a condiciones externas y a menudo requieren combinación con otros métodos.

En los últimos años, el aprendizaje profundo se ha convertido en una herramienta clave para el reconocimiento automático de enfermedades. Li et al., (2021) señalan que "el aprendizaje profundo evita las deficiencias de la selección manual de características... y hace que la extracción de características sea más objetiva". Las arquitecturas CNN como AlexNet, GoogLeNet, ResNet y DenseNet logran precisiones superiores al 95-99% en conjuntos de datos controlados. Saleem et al., (2019) muestran que GoogLeNet supera a AlexNet en PlantVillage, y Demilie (2024) concluye que las CNN "son a menudo la opción preferida... debido a su capacidad para capturar jerarquías espaciales". Sin embargo, las condiciones reales de campo siguen siendo un desafío y requieren modelos más complejos combinados con sensores remotos y sistemas predictivos.

Las estrategias de control modernas están evolucionando desde enfoques dominados por productos químicos hacia sistemas integrados, ecológicamente orientados y evolutivamente sostenibles. El objetivo principal es reducir la presión de patógenos manteniendo la productividad y el equilibrio ecológico.

El cambio climático está alterando la epidemiología de las enfermedades y requiere estrategias adaptativas. Juroszek y von Tiedemann (2011) señalan que "las medidas preventivas... pueden volverse particularmente importantes en el futuro". Mukhtar et al., (2023) enfatizan que el MIPD (Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades) es "el método más adecuado y relevante en las circunstancias actuales". Las nuevas tendencias incluyen: extractos vegetales – por ejemplo, *Lantana camara*, cuyos extractos "suprimen el crecimiento de *Pyricularia oryzae* y *Xanthomonas* spp."; enfoques genéticos – expresión de reguladores como AtMYB12, que "aumenta los niveles de flavonoides y la resistencia a varios patógenos"; resistencia derivada de patógenos (PDR) – estrategias transgénicas contra virus.

Los sistemas de diagnóstico y basados en IA respaldan el manejo a través de: detección temprana y localización de brotes; reducción de tratamientos innecesarios; integración con modelos predictivos; monitoreo de eficacia y resistencia.

Como señala Demilie (2024), el Aprendizaje Automático y el Aprendizaje Profundo "mejoran el rendimiento y la velocidad de detección y clasificación", convirtiéndolos en un componente clave de los sistemas modernos de MIP.

La sinergia entre el diagnóstico moderno y el manejo integrado crea nuevas oportunidades para una agricultura precisa, eficaz y ecológicamente sostenible. Esta combinación permite no solo reducir las pérdidas, sino también construir agroecosistemas más resilientes capaces de responder a los desafíos futuros.

Materiales y Métodos

Los principales patógenos que afectan a los cultivos hortícolas son virus (TSWV, ToMV, PMMoV, PVY), bacterias (*Xanthomonas*, *Pseudomonas*, *Clavibacter*) y hongos patógenos como *Phytophthora*, *Fusarium*, *Verticillium*, *Alternaria* y *Botrytis* (Figura 1).



Figura 1. Síntomas de tizón tardío de la papa, marchitez por verticillium en pimiento, manchas bacterianas en pimiento, cancro bacteriano en tomate

El cambio climático conduce a "temperaturas más altas → desarrollo más rápido del patógeno" y "temporadas de crecimiento más largas → más ciclos de infección". Para fines de diagnóstico, se utilizaron tanto métodos tradicionales como modernos. La evaluación inicial fue el diagnóstico visual, que es rápido pero subjetivo, ya que "los síntomas pueden superponerse entre diferentes patógenos o factores abióticos". Se aplicó microscopía para observar estructuras morfológicas, utilizando tinción específica en algunos casos. Se utilizaron medios de cultivo para aislar bacterias y hongos, mientras que los virus se diagnosticaron mediante pruebas inmunocromatográficas.

Las pruebas inmunocromatográficas rápidas utilizadas fueron: AgriStrip® (BIOREBA), Pocket Diagnostic® y LOEWE®FAST, que permiten la detección de virus, bacterias y algunos hongos patógenos en 5-10 minutos y son "adecuadas para campo y laboratorio" (Figura 2).



Figura 2. Pruebas inmunocromatográficas rápidas: AgriStrip® (BIOREBA), Pocket Diagnostic® y LOEWE®FAST

Para la confirmación de resultados, se recomiendan métodos moleculares (PCR, qPCR, LAMP), que se distinguen por su "muy alta sensibilidad" y "alta especificidad", pero que requieren un

laboratorio especializado. Los métodos hiperspectrales para la detección temprana de infecciones y la evaluación del estrés fisiológico son ampliamente utilizados, definiéndose la tecnología como "no invasiva, rápida y escalable". Se utilizaron drones con sensores RGB, multiespectrales, hiperspectrales y térmicos para el monitoreo de campo, mapeo de enfermedades y evaluación de biomasa. Se utilizaron modelos predictivos basados en temperatura, humedad, lluvia y microclima para pronosticar el riesgo de infección y optimizar el momento del tratamiento. Son ampliamente utilizados en la producción hortícola los biofungicidas (por ejemplo, *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum*, *Pythium oligandrum*), los bioestimulantes (aminoácidos, algas, ácidos húmicos) y los fungicidas químicos (productos a base de cobre, Mancozeb, Azoxystrobin, Difenconazole, etc.).

Resultados

La influencia del cambio climático en la dinámica de los patógenos y la frecuencia de enfermedades en los cultivos hortícolas está claramente expresada. El aumento de las temperaturas acelera el desarrollo de múltiples patógenos, y los inviernos más cálidos aumentan la supervivencia del inóculo. Las lluvias extremas crean condiciones favorables para el desarrollo de enfermedades fúngicas y bacterianas, ya que "una humedad alta > 90% acelera la esporulación", y las gotas de lluvia facilitan la propagación a larga distancia de bacterias. La sequía conduce a estrés fisiológico y microgrietas en hojas y raíces, lo que facilita la penetración de patógenos – "el estrés seco causa microgrietas... puntos de entrada para bacterias". Para *Verticillium dahliae*, se encontró que los microesclerocios se activan más fácilmente después del riego tras un período seco, aumentando el riesgo de infección.

Los métodos de diagnóstico muestran una efectividad variable dependiendo de las condiciones y los objetivos del análisis. Las pruebas inmunocromatográficas