SISTEMAS DE PRECISIÓN EN LA PROTECCIÓN DE CULTIVOS

Aplicaciones de los sistemas de información geográfica y la teledetección para la toma de decisiones en el manejo de enfermedades de cultivos

Juan A. Navas-Cortés (Instituto de Agricultura Sostenible, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Córdoba).

El uso combinado de análisis epidemiológicos y herramientas basadas en sistemas de información geográfica se ha mostrado eficiente para el estudio de epidemias de enfermedades en cultivos agrícolas y forestales. Por otro lado, las nuevas técnicas de teledetección de muy alta resolución permiten la detección temprana de enfermedades incluso en plantas asintomáticas. La integración de estas aproximaciones en sistemas predictivos y de apoyo a la toma de decisiones se plantea como una herramienta útil para un manejo más eficiente y sostenible de enfermedades de cultivos.

Uso de los sistemas de información geográfica para el estudio de enfermedades de cultivos

Las variaciones espaciales de las poblaciones de los patógenos, los cultivos huésped, las condiciones ambientales, las estrategias de manejo o los condicionantes económicos hacen que los riesgos de enfermedades cambien no solo temporalmente sino también espacialmente. Añadir una componente espacial a la estimación de riesgo de enfermedades puede contribuir a un manejo más adecuado de éstas al permitir delimitar las recomendaciones a zonas geográficas específicas de acuerdo a su nivel de riesgo con el consecuente beneficio económico y medioambiental. Los sistemas de posicionamiento global (GPS) y de información geográfica (SIG) pueden ser utilizados para la georreferenciación de la información obtenida en prospecciones de enfermedades, modelos predictivos de éstas, o mapas de factores abióticos (ej., variables ambientales, tipo de suelo, altitud, pendiente, orientación, etc.) y bióticos (incidencia de enfermedad, supervivencia de inóculo, ocurrencia de enfermedad en años anteriores, presencia de microbiota antagonista, etc.) que influyen sobre el nivel de riesgo de enfermedad, y que pueden ser utilizados para generar mapas de riesgo de enfermedad a diferentes escalas geográficas (Nutter y col., 2010).

Las tecnologías SIG se han utilizado con éxito para el diseño de mapas de riesgo de establecimiento y expansión de agentes fitopatógenos de diversa etiología, en su mayoría causantes de enfermedades foliares como el oomiceto *Phytophthora ramorum* en roble en California (Meentemeyer y col., 2004) o del nematodo *Rhodophulus similis* en cultivos hortícolas en China (Zhou y col., 2005); así como la identificación de variables ambientales favorables para el Mildiu (*Bremia lactucae*) de la lechuga en California (Wu y col., 2005). Por otro lado, la integración de modelos de predicción con bases de datos climáticas en SIG ha permitido estimar el riesgo de infección por *Pantoea stewartii* en maíz en Iowa (Nutter y col., 2002), por *Phytophthora infestans* en patata (Hijmans y col., 2000; Zeuner y Kleinhenz, 2007), determinar la importancia y distribución de tipos de compatibilidad en este mismo patógeno en México (Jaime-García y col., 2001), o explorar cambios en el riesgo global para esta misma enfermedad bajo diferentes escenarios de cambio climático (Sparks y col., 2014). Entre las investigaciones que han abordado patógenos de suelo destacan el diseño de mapas de riesgo en función de características agronómicas como el tipo de suelo para el chancro de *Acer saccharum* causado por *Fusarium* spp. en Vermont, EE.UU. (Bergdahl y col., 2002), la influencia de la proximidad a ríos en la mayor incidencia de Verticilosis en olivares de la provincia de Granada (Rodríguez y col., 2009), la influencia de los canales de distribución y de drenaje en banana infectada por *Ralstonia solanacearum* en Colombia (Munar-Vivas y col., 2010), o la simulación del efecto de diversas medidas en el control de la marchitez causada por *Phytophthora drechsleri* f.sp. *cajani* en guandú en India (Pande y col., 2010). No obstante, salvo raras excepciones, el estudio se limita a un solo patosistema, generalmente un patógeno foliar, en relación al ambiente. La mayor complejidad del ecosistema edáfico, que dificulta por una parte la modelización de los procesos asociados a las enfermedades causadas por estos patógenos, y por otra, la mayor dificultad para la obtención de datos experimentales, puede ser responsable de este hecho (Roget, 2001).

Detección remota de enfermedades de cultivos

De una forma simple, los métodos de teledetección se pueden clasificar en base a la distancia del sensor a la planta. En el nivel inferior, se sitúan aquellos cuya medida se realiza a una distancia aproximada de 2 m del cultivo. En un nivel intermedio, están los sensores que se sitúan entre 75 y 1.500 m de la cubierta vegetal, y en el nivel superior, los sensores están situados en satélites en órbita sobre la tierra (Madden y col., 2007). En la actualidad los sistemas que presentan un mayor potencial para su aplicación al estudio de enfermedades son los dos primeros, ya que son los que permiten disponer de imágenes con la resolución espectral, espacial y temporal necesarias.

La detección remota o teledetección comprende un conjunto de técnicas capaces de obtener información de un objeto sin que se tenga contacto físico

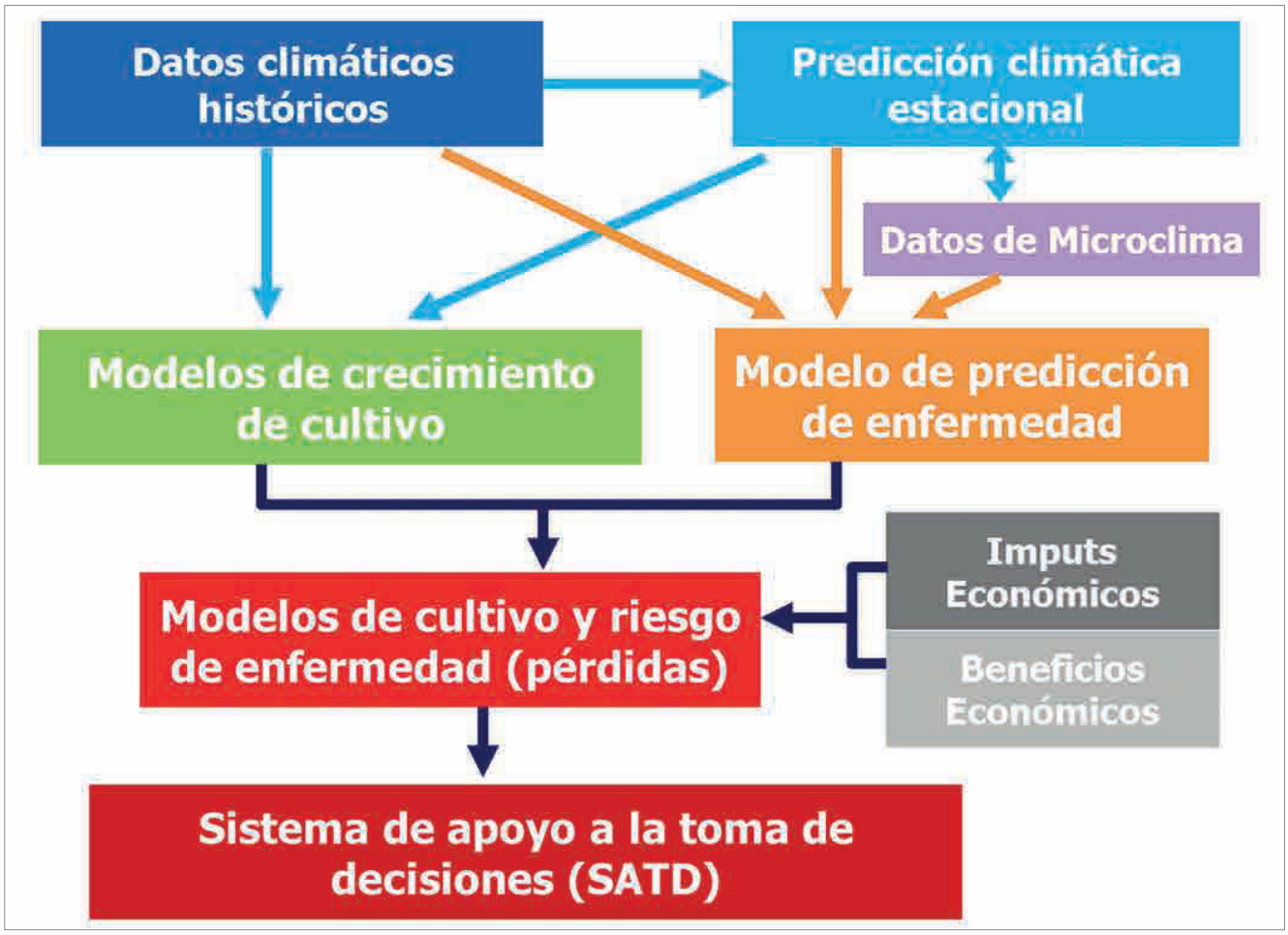

Figura 1. Esquema para la implementación de Sistemas de Apoyo a la toma de Decisiones (SATD) en enfermedades de cultivos agrícolas o forestales. Adaptado de R.P. Thakur, ICRISAT, 2010.

con el mismo (Nilsson y col., 1995). La teledetección se basa en la medida de la energía electromagnética de la radiación solar que, tras alcanzar la superficie terrestre o los objetos que se encuentran sobre ella, es absorbida, reflejada o emitida (Hatfield y Pinter, 1993; Nilsson y col., 1995; West y col., 2003). La cantidad y calidad de la radiación que es reflejada o emitida por un cultivo (reflectancia) es característica para la especie vegetal y las condiciones en que se desarrolla. De esta forma, cualquier alteración sobre la fisiología del cultivo respecto a su estado sano, ya sea de naturaleza biótica o abiótica, puede ser detectado potencialmente mediante cambios en su emisión electromagnética característica, también conocida como 'firma o signatura espectral' (Figura 1).

En general, las plantas sanas presentan valores de reflectancia bajos en la región verde del espectro (~550 nm) ya que ésta es reflejada más eficientemente comparada con las bandas azul, amarillo o rojo, que son absorbidas por los pigmentos fotoactivos. Las plantas enfermas, que en muchos casos muestran lesiones discretas en las hojas, correspondientes a regiones necróticas o cloróticas, suelen presentar valores elevados de reflectancia en la región del visible (~400-700 nm), especialmente en las bandas de absorción de clorofila. Por el contrario, la reducción de biomasa unida a la senescencia prematura, reducción del crecimiento o defoliación resulta en una reducción de la reflectancia en la región del infrarrojo cercano (~700-1.200nm). Particularmente útil para el estudio de enfermedades presenta la región térmica (~8.000-12.000 nm) ya que permite estimar la temperatura superficial de la vegetación, y es bien conocido que cualquier estrés que perjudique la capacidad de transpiración del cultivo puede resultar en un incremento relativo de temperatura en la superficie de las hojas (Nilsson y col., 1995; West y col., 2003). Las enfermedades pueden afectar las propiedades ópticas de las hojas a diversas longitudes de onda, por lo que los sistemas de detección de enfermedades deben estar basados en medidas espectrales en diferentes longitudes de onda o una combinación de ellas. Por otro lado, con objeto de minimizar la variabilidad causada por los factores externos, la reflectancia espectral de la cubierta vegetal viene siendo transformada y combinada en varios índices espectrales de vegetación (Haboudane y col., 2004). Estos índices son combinaciones de dos o más bandas, que pueden calcularse a partir de la señal de reflectancia obtenida por el sensor (Haboudane y col., 2004).

Además de estas alteraciones básicas, pueden ocurrir otros cambios en la firma espectral de una planta o cultivo debido a la infección por agentes fitopatógenos específicos (Nilsson y col., 1995; West y col., 2003) y ser, por tanto, potencialmente utilizados con carácter diagnóstico y de monitorización de la enfermedad. En este sentido, se están desarrollando investigaciones que permitan la identificación diferencial de distintos tipos de estreses, ya sean de naturaleza biótica o abiótica. Esto hace posible la diferenciación entre carencias

de nitrógeno e infecciones fúngicas de Roya o Mildiu en trigo (Tartachnyk y col., 2006), o esta misma carencia nutricional frente a remolacha azucarera afectada por el virus de la Rizomanía (Steddom y col., 2003). En el caso de organismos de suelo, como muchos hongos y nematodos fitopatógenos cuyas enfermedades desarrollan focos relativamente estáticos, la variabilidad espacial de sus poblaciones y, consecuentemente, las enfermedades que ocasionan en los cultivos, suelen estar en muchos casos determinadas, entre otros, por factores intrínsecos al propio suelo como son sus propiedades físico-químicas, las cuales pueden determinar la existencia de microclimas que favorecen de forma diferencial su supervivencia y desarrollo.

Hasta fechas recientes, gran parte de las investigaciones realizadas en este campo se han centrado en la utilización de sensores terrestres multiespectrales o hiperespectrales de diferente naturaleza que han permitido la identificación de regiones espectrales características de distintas enfermedades causadas por una gran variedad de agentes fitopatógenos en diferentes cultivos, información que es esencial para la posterior aplicación de esta tecnología a mayor escala espacial. En este sentido, aunque las investigaciones realizadas son aún escasas, la utilización de sensores aerotransportados se ha mostrado efectiva para la detección de diversas enfermedades, incluyendo a modo de ejemplo el Mildiu del tomate (*Phytophthora infestans*) en el Valle de Salinas, California, utilizando el sensor AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectometer) (Zhang y col., 2003), o Tizón de la vaina del arroz (*Rhizoctonia solani*) en Arkansas con el sensor ADAR (Airborne Data Acquisition and Registration) (Qin y Zhang, 2005).

Los nuevos métodos de teledetección basados en imágenes hiperespectrales y térmicas de alta resolución han demostrado su potencial para la detección del estrés hídrico y la estimación del funcionamiento fotosintético a través de la detección de fluorescencia clorofílica emitida por la vegetación (Zarco-Tejada y col., 2012), así como la estimación de pigmentos fotosintéticamente activos, como las xantofilas (Suárez y col., 2008; 2009), carotenos y antocianinas a través de índices espectrales (PRI, entre otros), la estimación del contenido clorofílico mediante índices espectrales de banda estrecha, y la temperatura de superficie como indicador de la transpiración de la vegetación (Berni y col., 2009a; 2009b; Zarco-Tejada y col., 2012). Esta tecnología se ha mostrado eficiente para la detección de la infección temprana por *Verticillium dahliae* en olivar y la discriminación entre niveles de severidad de la Verticilosis es viable mediante la utilización de imágenes térmicas, multiespectrales e hiperespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados a escala de parcela (Calderón y col., 2013) o tripulados a escala de comarca (Calderón y col., 2015). La temperatura de copa, CWSI, B, BG1, BR1 y FLD3 se identifican como buenos indicadores para detectar la Verticilosis en etapas tempranas del desarrollo de la enfermedad, mientras que NDVI, PRI515, R/G, HI e índices de estimación de clorofila y carotenos demuestran ser buenos indicadores para la cuantificación de daño moderado o severo causada por Verticilosis, lo que puede ser de utilidad para el diseño de estrategias de control de la Verticilosis a escala de parcela y de comarca.

Aplicación de los Sistemas de Apoyo a la Toma de Decisiones (SATD) en el manejo de enfermedades de cultivos

Los SATD en enfermedades de cultivos son herramientas que recopilan, organizan e integran la información relacionada con el cultivo y el riesgo de enfermedad, para una vez analizada e interpretada, recomendar las acciones más apropiadas para su manejo (Magarey y col., 2002). Los elementos a considerar en un SATD son: i) variables relativas a las características del patógeno, de las condiciones ambientales, de la enfermedad y del huésped; ii) variables relacionadas con la historia previa del lugar de cultivo; iii) variables relacionadas con las características de la epidemia, como inóculo primario, inóculo secundario, tasa de infección, período de incubación, etc. Los SATD, no obstante, se han desarrollado fundamentalmente para el manejo de enfermedades causadas por agentes que infectan la parte aérea de los cultivos, en los que, combinando la información procedente de sistemas de predicción previamente desarrollados, realizan recomendaciones para la aplicación de productos químicos para su control (Figura 1). Entre los SATD disponibles para el manejo de patógenos de suelo destacan el implementado para el manejo de la Muerte temprana de la patata causada por *V. dahliae* en Israel para la elección del lugar de siembra, en función del riesgo de infestación por el patógeno y el tipo de suelo (Goldstein y col., 2009), y los propuestos para la predicción del mal del pie del trigo causado por *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* en Francia, basado en las prácticas de cultivo, tipo de suelo y condiciones climáticas (Ennaïfar y col., 2007) o en función del ambiente e historia de cultivos previos en Australia (Roget, 2001). Por otro lado, otros SATD incluyen estreses bióticos y abióticos, como WebGro, implementado para el manejo en soja de daños por pedrisco y por dos importantes patógenos de suelo, el nematodo del quiste de la soja (*Heterodera glycines*) y la podredumbre de raíz (*Rhizoctonia solani*) (Paz y col., 2004). En particular, varios SATD contemplan la estimación del perjuicio ocasionado por nematodos, incluyendo el nematodo dorado de la patata (*Globodera rostochiensis*) basado en la cuantificación del inóculo en suelo (Evans y col., 2003), para *Rodopholus similis* en banana, en base al uso de clones resistentes y rotación con cultivos no huésped (Riséde y col., 2009), o para el nematodo nodulador *Meloidogyne incognita* en algodón, cuyo efecto reductor del crecimiento del cultivo en función de la densidad de inóculo se integra en el modelo de simulación del crecimiento del cultivo "CROPGRO-cotton" (Ortiz, y col., 2009).

Agradecimientos: Financiación: proyecto P08-AGR-03528 de la Consejería de Economía, Innovación y Ciencia de la Junta de Andalucía y el Fondo Social Europeo, y los proyectos AGL-2012-37521 y AGL2016-75606-R del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad y el Fondo Social Europeo.

BIBLIOGRAFÍA

Bergdahl, D. R., Sendak, P. E., Tobi, D. R., Bove, J. R., Tritton, L. M. 2002. Incidence of annual canker of sugar maple studied with the aid of a geographic information system. Northern Journal of Applied Forestry 19:73-79.

Berni, J.A.J., Zarco-Tejada, P.J., Sepulcre-Cantó, G., Fereres, E., Villalobos, F.J. 2009a. Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. Remote Sensing of the Environment 113: 2380-2388.

Berni, J.A.J., Zarco-Tejada, P.J., Suárez, L., Fereres, E. 2009b. Thermal and narrow-band multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. IEEE T. Geosci. Remote. 47:722-738.

Calderón, R., Navas-Cortés, J.A., Lucena, C., Zarco-Tejada, P.J. 2013. High-resolution airborne hyperspectral and thermal imagery for early detection of Verticillium wilt of olive using fluorescence, temperature and narrow-band spectral indices. Remote Sensing of Environment 139:231-245.

Calderón, R., Lucena, C., Trapero-Casas, J.L., Zarco-Tejada, P.J., Navas-Cortés, J.A. 2014. Soil temperature determines the reaction of olive cultivars to *Verticillium dahliae* pathotypes. PLoS ONE 9: e110664.

Calderón, R., Navas-Cortés, J.A., Zarco-Tejada, P.J. 2015. Early detection and quantification of Verticillium wilt in olive using hyperspectral and thermal imagery acquired by manned platforms at large scale. Remote Sensing 7: 5584-5610.

Ennaïfar, S., Makowski, D., Meynard, J.M., Lucas, P. 2007. Evaluation of models to predict take-all incidence in winter wheat as a function of cropping practices, soil, and climate. European Journal of Plant Pathology 118:127-143.

Evans, K., Webster, R., Barker, A., Halford, P., Russell, M., Stafford, J., Griffin, S. 2003. Mapping infestations of Potato cyst nematodes and the potential for spatially varying application of nematicides. Precision Agriculture 4:149-162.

Goldstein, E., Hetzroni, A., Cohen, Y., Tsror, L., Zig, U., Lensky, I. 2009. A decision support system to predict plot infestation with soil-borne pathogens in potato production systems. In: Bregt, A., Wolfert, S., Wien, J.E., Lokhorst, C. (Eds.), EFITA conference '09. Proceedings of the 7th EFITA Conference, Wageningen, The Netherlands, 6-8 July 2009, Wageningen Academic Publishers, Wageningen, pp. 365-372.

Haboudane, D., Miller, J.R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P.J., Strachan, I.B. 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. Remote Sensing of Environment 90: 337-352.

Hatfield, P.L., Pinter, P.J. 1993. Remote sensing for crop protection. Crop Protection 12: 403-413.

Hijmans, R.J., Forbes, G.A., Walker, T.S. 2000. Estimating the global severity of potato late blight with GIS-linked disease forecast models. Plant Pathology 49: 697-705.

Jaime-Garcia, R., Orum, T. V., Felix-Gastelum, R., Trinidad-Correa, R., VanEtten, H. D., and Nelson, M. R. 2001. Spatial analysis of *Phytophthora infestans* genotypes and late blight severity on tomato and potato in the Del Fuerte Valley using geostatistics and geographic information systems. Phytopathology 91:1156-1165.

Madden, L. V., y col., 2007. The Study of Plant Disease Epidemics. St. Paul, MN: APS Press, The American Phytopathological Society.

Magarey, R.D., Travis, J.W., Russo, J.M., Seem, R.C., Magarey, P.A. 2002. Decision Support Systems: Quenching the Thirst. Plant Disease 86:4-14.

Meentemeyer, R., Rizzo, D., Mark, W., Lotz, E. 2004. Mapping the risk of establishment and spread of sudden oak death in California. Forest Ecology and Management 200:195-214.

Munar-Vivas, O., Morales-Osorio, J. G., Castañeda-Sánchez, D. A. 2010. Use of field-integrated information in GIS-based maps to evaluate Moko disease (*Ralstonia solanacearum*) in banana growing farms in Colombia. Crop Protection 29:936-941.

Nilsson, H.E. 1995. Remote sensing and image analysis in plant pathology. Annual Review of Phytopathology 15:489-527.

Nutter, F.W.Jr., Byamukama, E.Z., Coelho-Netto, R.A., Eggenberger, S.K., Gleason, M.L., Gougherty, A., Robertson, A.E., van Rij, N. 2010. Integrating GPS, GIS, and Remote Sensing Technologies with Disease Management Principles to Improve Plant Health. Págs. 55-90 in: Applications in Agriculture: Invasive Species. S. Clay, ed. Taylor & Francis Press, UK.

Nutter, F. W.Jr., Rubsam, R. R., Taylor, S. E., Harri, J. A., Esker, P. D. 2002. Use of geospatially-referenced disease and weather data to improve site-specific forecasts for Stewart's disease of corn in the US corn belt. Computers and Electronics in Agriculture 37:7-14.

Ortiz, B.V., Hoogenboom, G., Vellidis, G., Boote, K., Davis, R.F., Perry, C. 2009. Adapting the CROPGRO-cotton model to simulate cotton biomass and yield under southern root-knot nematode parasitism. Transactions of the ASABE 52:2129-2140.

Pande, S., Desai, S., Sharma, M. 2010. Impact of climate change on rainfed crop diseases: current status and future research needs. Pages 55-59 in: National Symposium on Climate Change and Rainfed Agriculture, February 18-20, 2010. Indian Society of Dryland Agriculture, Central Research Institute for Dryland Agriculture, Hyderabad, India.

Paz, J.O., Batchelor, W.D., Pedersen, P. 2004. WebGro: A web-based soybean management decision support system. Agronomy Journal 96:1771-1779.

Qin, Z., Zhang, M. 2005. Detection of rice sheath blight for in-season disease management using multispectral remote sensing. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 7:115-128.

Risède, J.M., Chabrier, C., Dorel, M., Rhino, B., Lakhia, K., Jenny, C., Quénéhervé, P. 2009. Recent and up-coming strategies to counter plant-parasitic nematodes in banana cropping systems of the French West Indies. Acta Horticulturae 828:117-128.

Rodríguez, E., García-Garrido, J.M., García, P.A., Campos, M. 2009. Large-scale epidemiological study and spatial patterns of Verticillium wilt in olive orchards in southern Spain. Crop Protection 28: 46–52.

Roget, D.K. 2001. Prediction modelling of soilborne plant diseases. Australasian Plant Pathology 30:85-89.

Sparks, A.H., Forbes, G.A., Hijmans, R.J., Garrett, K.A. 2014. Climate change may have little effect on global risk of potato late blight. Global Change Biology 20: 3621-3631.

Steddom, K., Heidel, G., Jones, D., Rush, C. M. 2003. Remote detection of *Rhizomania* in sugar beets. Phytopathology 93: 720-726.

Suárez, L., Zarco-Tejada, P.J., Berni, J.A.J., González-Dugo, V., Fereres, E. 2009. Modelling PRI for water stress detection using radiative transfer models. Remote Sensing of Environment 113: 730-740.

Suárez, L., Zarco-Tejada, P.J., Sepulcre-Cantó, G., Pérez-Priego, O., Miller, J.R., Jiménez-Muñoz. J.C., Sobrino, J. 2008. Assessing canopy PRI for water stress detection with diurnal airborne imagery. Remote Sensing of Environment 112: 560-575.

Tartachnyk, I., Rademacher, I., Kühbauch, W. 2006. Distinguishing nitrogen deficiency and fungal infection of winter wheat by laser-induced fluorescence. Precision Agriculture 7:281-293.

West, J.S., Bravo, C., Oberti, R., Lemaire, D., Moshou, D., McCartney, H.A. 2003. The potential of optical canopy measurement for targeted control of field crop diseases. Annual Review of Phytopathology 41: 593-614.

Wu, B. M., Subbarao, K.V., Van Bruggen, A.H.C. 2005. Analyses of the relationships between lettuce downy mildew and weather variables using geographic information system techniques. Plant Disease 89:90-96.

Zarco-Tejada, P.J., González-Dugo, V., Berni, J.A.J. 2012. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV for water stress detection using a hyperspectral imager and a thermal camera. Remote Sensing of Environment 117:322-337.

Zhang, M., Qin, Z., Liu, X., Ustin, S.L. 2003. Detection of stress in tomatoes induced by late blight disease in California, USA, using hyperspectral remote sensing. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 4:295-310.

Zeuner, T., Kleinhenz, B. 2007. Use of geographic information systems in warning services for late blight. EPPO Bulletin 37:327-334.

Zhou, L., Xie, B., Shen, W., Yang, Y., Li, D. 2005. Prediction of suitable establishment areas of dangerous horticultural crop nematode, *Radopholus similis* in China using GIS. Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 21(SUPPL. 2):28-31.