

# Control de enfermedades de cultivos aplicando técnicas de agricultura de precisión

Rafael Jordán Ramírez<sup>1,2</sup> y Juan A. Navas Cortés<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Instituto de Agricultura Sostenible, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IAS-CSIC), Córdoba.

<sup>2</sup> MYCOSYM-TRITON. Bollullos de la Mitación. Sevilla.

**Las enfermedades son un componente importante en la producción agrícola ya que, junto con las malas hierbas y plagas, son un factor reductor del rendimiento que los cultivos pueden alcanzar de acuerdo con su potencial genético y las limitaciones del medio ambiente en que se desarrollan. De hecho, las enfermedades son las causantes del 12% de reducción en la producción de los cultivos. Las nuevas formas de producción agrícola que se están promoviendo en la actualidad, entre ellas la agricultura sostenible, implican entre otros aspectos una reducción en la utilización de productos fitosanitarios. En este sentido, la agricultura de precisión se presenta como una herramienta que puede contribuir a un mejor uso de las medidas empleadas para la protección de cultivos.**

**E**n este contexto, la agricultura de precisión, que persigue un manejo de los sistemas agrícolas de modo adecuado a sus variaciones espaciales y temporales, se presenta como una herramienta que puede contribuir a un mejor uso de las medidas empleadas para la protección de los cultivos frente a las enfermedades, lo que repercutirá en una mejora de su eficacia y una disminución de su impacto ambiental.

Tradicionalmente, a efectos de manejo, la distribución espacial de las poblaciones de los agentes fitopatógenos es considerada homogénea en términos de densidad media y su fluctuación en el tiempo. Sin embargo, muy frecuentemente, la distribución de agentes fitopatógenos en suelo y/o plantas es heterogénea, lo que resulta en una distribución en rodales que dificulta enormemente el diseño y desarrollo de estrategias de muestreo, modelización y empleo de herramientas para su control. La agricultura de precisión, empleando herramientas de cap-

tura de datos mediante Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y técnicas de detección remota (fotogrametría y teledetección), así como su incorporación y manejo mediante Sistemas de Información Geográfica (GIS), permitirá que la toma de decisiones tenga en cuenta la variación espacial en la distribución de los agentes y enfermedades visualizados en forma de mapas de poblaciones, incidencia o severidad de enfermedad variando en espacio y tiempo. En este sentido, nuestras investigaciones en la podredumbre blanca de la remolacha azucarera (causada por *Sclerotium rolfsii*) indican una distribución no aleatoria de la incidencia y severidad de la enfermedad que determinaron una distribución espacial de la producción y calidad de azúcar correlacionados inversamente con la cantidad de enfermedad desarrollada (**figura 1**). Además puesto que las plantas afectadas por podredumbre presentan valores de componentes no azucarados que interfieren negativamente con el proceso industrial de extracción de azúcar, esta información puede ser útil para la elaboración de mapas de recolección que cosechen separadamente las plantas afectadas y las plantas sanas.

## Detección de enfermedades

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

**Figura 1.**

**Mapas de distribución espacial de la incidencia de podredumbre blanca (*Sclerotium rolfsii*) en remolacha azucarera (A) y contenido en sacarosa (polarización) en la raíz (B), en una parcela experimental situada en Posadas, Córdoba.**



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 et al., 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.

## Fotografía de infrarrojos

La utilización de fotografía de infrarrojos ha venido utilizándose desde hace tiempo para demostrar los cambios en la vegetación debidos al estrés provocado por enfermedades (Colwell, 1956). Entre otros usos, esta tecnología permite la detección temprana de plantas de patata afectadas por mildiu (*Phytophthora infestans*) dos o tres días antes de la aparición de síntomas (Manzer y Cooper, 1982), podredumbres de raíz en algodón (Toler et al., 1981) o la marchitez del roble (*Ceratocystis fagacearum*) en los que es posible diferenciar distintos grados de severidad de síntomas en los árboles afectados (Everitt et al., 1999) (figura 2).

## Teledetección

La detección remota o teledetección comprende un conjunto de técnicas capaces de obtener información de un objeto sin que se tenga contacto físico con el mismo (Nilsson et al., 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 et al., 1995; West et al., 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 3).

El impacto de los ataques de enfermedades sobre el crecimiento de los cultivos depende del modo de interacción entre la planta y el patógeno, interacción que está determinada por las características biológicas de estos organismos y sus interacciones con las condiciones ambientales. Como consecuencia de esta interacción, dependiendo del tipo de enfermedad, éstas tienen la capacidad de reducir:

a) La densidad final de plantas establecidas en el cultivo (p. ej.: muerte de plántulas).

Particularmente útil para el estudio de enfermedades se 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

Figura 2.

Imagen de infrarrojo de una parcela de robles afectados por marchitez (*Ceratocystis fagacearum*) en Texas, EE.UU.

Los valores en las flechas indican: 1: árbol afectado con síntomas leves; 2: árbol severamente afectado; 3: árbol muerto consecuencia de la enfermedad; y 4: árbol sin síntomas.

(Fuente: Everitt et al., 1999. Plant Disease 83:502-505).

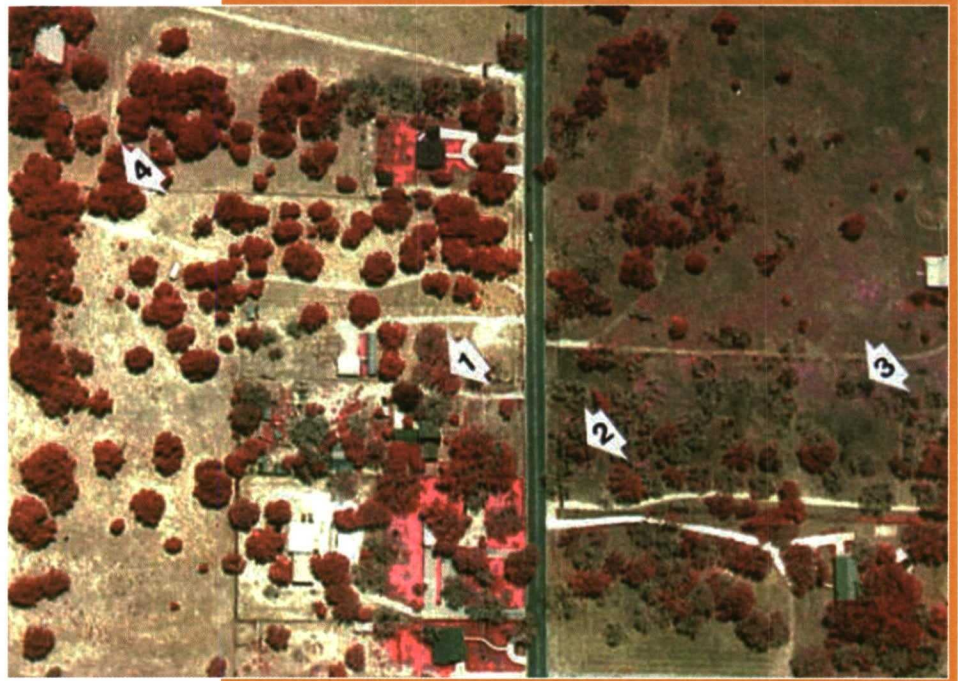
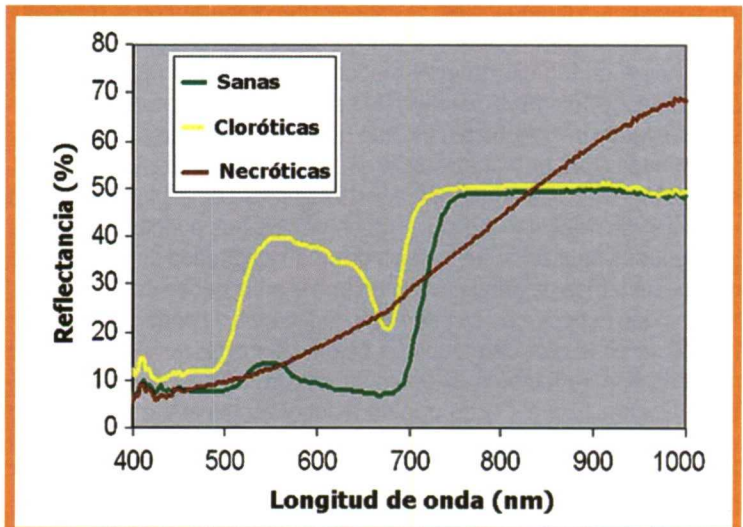


Figura 3.

Signatura espectral de plantas afectadas por síntomas frecuentes en plantas enfermas frente a plantas sanas (adaptado de: Steddom et al., 2005. APSnet Feature, abril 2005).



b) La absorción y translocación de agua y nutrientes por la planta (p. ej.: infecciones radicales y traqueomicosis).

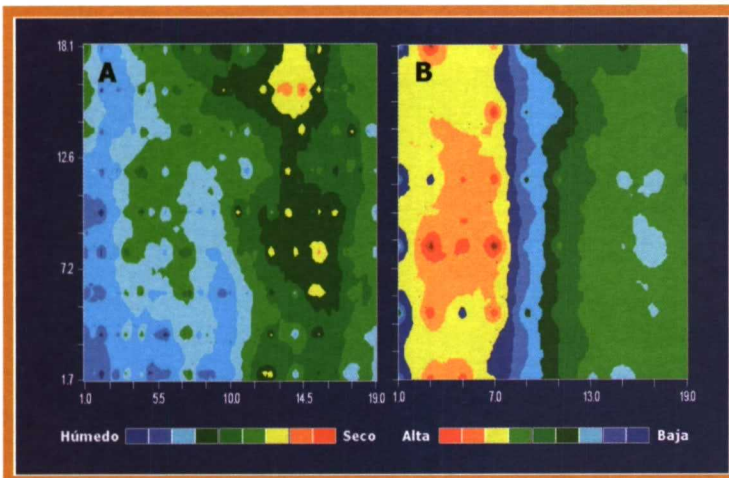
c) La absorción de radiación solar por los tejidos fotosintéticos (p. ej.: manchas necróticas).

d) La tasa de asimilación y redistribución de fotosintatos (p. ej.: virosis y fitoplasmosis) (Jiménez Díaz et al., 2003).

Estas alteraciones al desarrollo normal de un cultivo hacen que sus

## Figura 4.

Mapas de distribución espacial del contenido en agua en el suelo (A) e incidencia de lepra (*Urophlyctis leproides*) en remolacha azucarera (B) en una parcela experimental situada en Los Palacios-Villafranca, Sevilla.



propiedades espectrales sean diferentes a las que presentan las plantas sanas y por tanto permiten su detección y cuantificación mediante teledetección (Hatfield y Pinter, 1993; Nilsson *et al.*, 1995; West *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2003) (figura 3).

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 (~700-1.200 nm). 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 *et al.*, 1995; West *et al.*, 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 *et al.*, 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 *et al.*, 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 *et al.*, 1995; West *et al.*, 2003) y ser, por tanto, potencialmente utilizados con carácter de 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 sea de naturaleza biótica o abiótica. Esto hace posible la diferenciación entre carencias de nitrógeno e in-

fecciones fúngicas de roya o mildiu en trigo (Tartachnyk *et al.*, 2006) o esta misma carencia nutricional frente a remolacha azucarera afectada por el virus de la rizomanía (Steddom *et al.*, 2003).

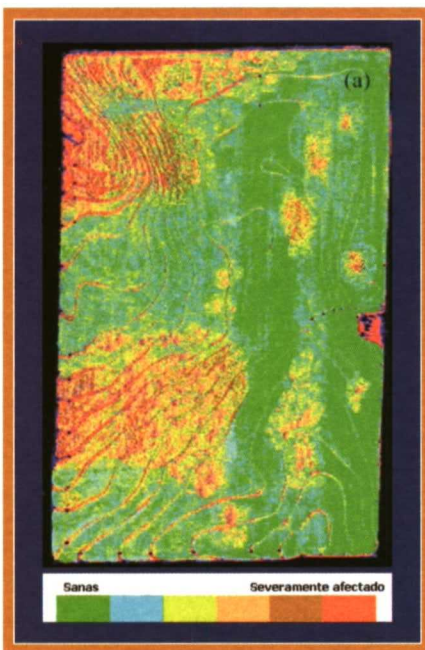
La detección de enfermedades mediante sensores ópticos y su mapeo se presenta particularmente apropiada para la aplicación de fungicidas frente a hongos foliares. Estas enfermedades son generalmente policíclicas (aquellas en que en una misma estación de cultivo se desarrollan varios ciclos de infección), con una elevada tasa de reproducción y son dinámicas, extendiéndose espacialmente en el tiempo en tanto en cuanto se den condiciones favorables para su desarrollo (Zadoks y van den Bosch, 1994). Aunque en condiciones controladas de laboratorio, la utilización de sensores ópticos permite detectar infecciones latentes con anterioridad a que las plantas presenten síntomas visibles (Chaerle *et al.*, 1999), con la tecnología y conocimiento disponibles la utilización de esos sensores no permite en general detectar infecciones no sintomáticas en condiciones de campo, siendo además capaces de detectar la enfermedad únicamente a umbrales relativamente altos. En consecuencia, el mapeo de este tipo de enfermedades subestimará el tamaño de los rodales afectados. La estimación de áreas de infección latente asintomática o infecciones por debajo de los umbrales de detección requiere del conocimiento y comprensión de la dinámica espacial y temporal del desarrollo de los focos de enfermedad, que deberá contemplar la distribución del inóculo, su expansión espacial y los factores que influyen sobre dichos procesos como son la deposición de esporas, la eficiencia de infección y períodos de latencia (Zadoks y van den Bosch, 1994). No obstante, es posible desarrollar modelos de simulación de expansión de focos para diferentes combinaciones patógeno/cultivo que permitan estimar las infecciones latentes y áreas por debajo del umbral de detección. Estos modelos podrán ser utilizados para transformar los mapas de enfermedad observados en mapas de aplicación que incluyan el área que debe ser tratada.

En el caso de organismos de suelo, como muchos hongos y nematodos fitopatógenos cuyas enfermedades desarrollan focos relativamente estáticos (Jiménez Díaz *et al.*, 2004), los mapas de incidencia de enfermedad pueden ser utilizados para futuros tratamientos en posteriores estaciones de cultivo, similarmente a como se viene realizando en la toma de decisiones sobre abonado basado en mapas de rendimiento. En este tipo de patógenos, 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. En este sentido nuestras investigaciones sobre el desarrollo de epidemias de lepra (*Urophlyctis leproides*) en remolacha azucarera indicaron que los valores de humedad del suelo estuvieron positiva y espacialmente correlacionados con los valores de incidencia de enfermedad (figura 4). Desde un punto de vista práctico la identificación de áreas con

Desde un punto de vista práctico la identificación de áreas con condiciones edáficas o ambientales favorables para la supervivencia y/o desarrollo de patógenos o enfermedades concretas puede ser un importante paso para la aplicación de un manejo preventivo o diferencial de éstas basado en mapas de riesgo

**Figura 5.**

**Mapas de distribución espacial de la severidad del tizón de la vaina (*Rhizoctonia solani*) en arroz obtenida mediante el sensor ADAR** (Airborne Data Acquisition and Registration) (Adaptado de: Qin, Z., and Zhang, M. 2005. International Journal of Applied Earth Observation Geoinformation 7: 115-128).



condiciones edáficas o ambientales favorables para la supervivencia y/o desarrollo de patógenos o enfermedades concretas puede ser un importante paso para la aplicación de un manejo preventivo o diferencial de éstas basado en mapas de riesgo.

Hasta el momento gran parte de las investigaciones realizadas en este campo se han centrado en la utilización de sensores terrestres multispectrales 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 (Nilsson *et al.*, 1995), información que es esencial para la posterior aplicación de esta tecnología a mayor escala espacial. En este sentido, aunque las investigaciones re-

alizadas 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 Spectrometer) (Zhang *et al.*, 2003), o el tizón de la vaina del arroz (*Rhizoctonia solani*) en Arkansas con el sensor ADAR (Airborne Data Acquisition and Registration) (Qin y Zhang, 2005).

En general las imágenes de satélite disponibles no presentan las características adecuadas para su utilización en la detección temprana de enfermedades y en el mejor de los casos pueden ser útiles sólo para la identificación de áreas relativamente grandes de cultivos afectados por la enfermedad, en cuyo caso la aplicación de medidas de control serían poco eficientes (Nilsson, 1995; West *et al.*, 2003). Estos sistemas han mostrado su eficacia en la estimación de variables biofísicas como el índice de área foliar o cobertura del suelo, pero no permiten estimar con suficiente precisión parámetros bioquímicos como contenido en clorofila, contenido de agua, o materia seca, ya que integran toda la radiación reflejada en un reducido número de bandas demasiado anchas o en regiones espectrales no sensibles a los requeridos para dichas estimaciones. Además, la necesidad de realizar un seguimiento en el tiempo del desarrollo de las epidemias y la interferencia de condiciones meteorológicas adversas en el momento de la observación pueden significar que la información no esté disponible cuando ésta sea necesaria (Broge y Leblanc, 2000). No obstante, la utilidad de estos sistemas para la detección de enfermedades no ha sido suficientemente contrastada experimentalmente, siendo muy escasos los estudios realizados. Recientemente, Franke y Menz (2007) utilizando imágenes hiperespectrales obtenidas por sensores en el satélite QuickBird pudieron diferenciar dos enfermedades foliares en trigo: oidio (*Blumeria graminis*) y roya de la hoja (*Puccinia recondita*) en Alemania y complementarlas con otras observaciones, como la generación de mapas de trata-

miento, aunque sólo fue útil para fases de desarrollo avanzado de la enfermedad (Franke y Menz, 2007) (figura 5). Sin embargo, los sistemas aerotransportados no presentan esta restricción y además pueden ser utilizados en el momento en que se precisen. De particular interés para el estudio y monitorización de estreses de distinta naturaleza presentan los sensores montados en robots no tripulados a baja altura actualmente en desarrollo.

## Tecnología de aplicación variable

De las metodologías para afrontar las aplicaciones localizadas y con dosis variable son fundamentalmente dos: la que se basa en mapas elaborados previamente y la que utiliza sensores que obtienen la información a tiempo real y permite realizar la aplicación variable a medida que se va realizando la operación (West *et al.*, 2003).

En la aplicación de fitosanitarios para el control de enfermedades sería deseable disponer de sensores a tiempo real para detectar la enfermedad y controlar el aplicador en la misma operación. Los sistemas de aplicación y detección requerirían, no obstante, no sólo de sensores sino también del soporte informático conveniente para el cálculo preciso que regulase los actuadores sobre los dispensadores con una adecuada y rápida respuesta (Giles *et al.*, 2002). Esta tecnología, ha sido desarrollada con éxito para el control de malas hierbas (Slaughter *et al.*, 1999). La tecnología disponible actualmente para la detección de enfermedades no permite detectar rodales de plantas enfermas en tiempo real. Por ello, los sistemas de aplicación variable para el tratamiento de enfermedades deben estar basados en mapas elaborados con antelación que identifiquen la localización de las áreas afectadas por las mismas (West *et al.*, 2003). ■

### Agradecimientos

Los autores son miembros del Grupo de Investigación AGR136 'Sanidad Vegetal' del Plan Andaluz de Investigación. Las investigaciones referidas de los autores en este artículo han sido financiadas por los proyectos AGL2002-01418 y AGL2005-00751.

### Bibliografía

- Broge, N. H., y Leblanc, E. 2000. Remote Sensing and Environment 76:156-172.
- Chaerle, L., *et al.* 1999. Nature Biotechnology 17:813-816.
- Colwell, R.N. 1956. Hilgardia 26:223-86
- Everitt, J. H. *et al.* 1999. Plant Disease 83:502-505.
- Franke, J., y Menz, G. 2007. Precision Agriculture 8:161-172.
- Giles, D.K., *et al.* 2002. Pp. 129-38 en: Aspects of Applied Biology 66, International Advances in Pesticide Application, Wellesbourne, UK.
- Haboudane *et al.*, 2004. Remote Sensing of Environment 90: 337-352.
- Hatfield, P. L. y Pinter, P. J. 1993. Crop Protection 12: 403-413.
- Jiménez-Díaz *et al.* 2003. Phytoma-España 148:16-27.
- Jiménez-Díaz *et al.* 2004. Phytoma-España 164:138-142.
- Madden, L. V., *et al.*, 2007. The Study of Plant Disease Epidemics. St. Paul, MN: APS Press, The American Phytopathological Society.
- Manzer, F.E., y Cooper, G.R. 1982. Plant Disease 66:665-67.
- Nilsson, H. E. 1995. Annual Review of Phytopathology 29: 489-527.
- Oerke, E.-C., y Dehne, H.-W. 1997. European Journal of Plant Pathology 103:203-215.
- Qin, Z., y Zhang, M. 2005. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 7: 115-128.
- Slaughter, D.C., *et al.* 1999. J. Transport. Eng. Asce 125:364-371.
- Steddom, K. *et al.* 2003. Phytopathology 93:720-726.
- Tartachnyk, I. *et al.*, 2006. Precision Agriculture 7: 281-293.
- Toler, R. W. *et al.* 1981. Plant Disease 65: 24-31.
- West, J.S. *et al.* 2003. Annual Review of Phytopathology 41: 593-614.
- Zhang, M., *et al.* 2003. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 4: 295-310.
- Zadoks, J.C., y van den Bosch, F. 1994. Annual Review of Phytopathology 32:503-21.