

CAPÍTULO XXI SISTEMAS DE PRONÓSTICO DE ENFERMEDADES

Ricardo C. Moschini, Malvina I. Martínez, María G. Sepulcri

MOSCHINI R.C., MARTÍNEZ M.I., SEPULCRI M.G. 2013. Sistemas de pronóstico de enfermedades. Capítulo XXI Pag. 409-441. En “Agrometeorología”. Editores: Guillermo M. Murphy y Rafael H. Hurtado. Segunda Edición Agosto

1-Introducción

Los cultivos y las adversidades asociadas (enfermedades, plagas animales y malezas), junto a procesos interactivos modulados por el ambiente y el hombre, constituyen el agroecosistema. Pérdidas estimadas en 10 % de la producción global de alimentos por efecto de enfermedades de cultivos contribuyen a exacerbar el déficit alimentario que padecen 800 millones de personas (Strange and Scott, 2005). Además de estas pérdidas directas, algunos hongos (*Aspergillus*, *Fusarium* y *Penicillium*) producen, en pre y/o post-cosecha, metabolitos tóxicos secundarios o micotoxinas (aflatoxinas deoxinivalenol, zearalenona, fumonisinas y ocratoxinas) que contaminan la producción granaria, incrementando el riesgo sanitario cuando se destina al consumo humano y animal.

La reducción de las pérdidas de cosecha debidas a enfermedades es abordada por el concepto de manejo integrado, procurando el mínimo impacto ambiental y máximo beneficio económico (Theunissen, 1994). Para ello se incorporan elementos como umbrales de daño económico, monitoreo, sistemas de pronóstico de riesgo, los cuales constituyen herramientas valiosas para definir racionalmente estrategias de manejo y control de las enfermedades. El manejo integrado de enfermedades es una estrategia dinámica que debe generar soluciones en sistemas productivos cambiantes, por acción de la naturaleza o del hombre (March *et al.*, 2010)

El triángulo y tetraedro de la enfermedad

La interacción simultánea o sincrónica entre hospedante, patógeno y ambiente gobierna el desarrollo de una enfermedad en las plantas hospedantes (De Wolf y Scott, 2007), produciendo en las mismas alteraciones fisiológicas y morfológicas. En la naturaleza, el llamado triángulo de la enfermedad resulta de la acción combinada de un patógeno virulento, un hospedante susceptible y un ambiente favorable (Figura 1). Este sistema interactivo se modifica cuando el hombre incorpora cultivos, con sus prácticas de manejo y estrategias de control de enfermedades, conformando un tetraedro o patosistema (Figura 2). Este último es un subsistema del agroecosistema.

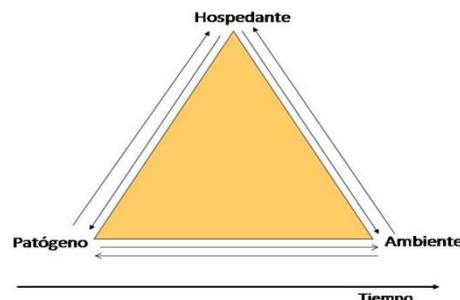


Figura1: El triángulo de la enfermedad entre un hospedante susceptible, un patógeno virulento y un ambiente favorable

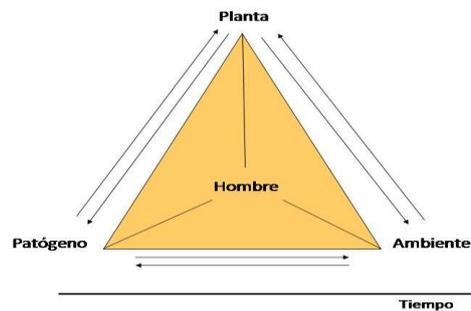


Figura 2: El tetraedro de la enfermedad o patosistema al incorporarse el hombre con sus cultivos y prácticas de manejo.

La epidemia, definida como el incremento temporal y espacial de la enfermedad, depende de los factores interactivos del tetraedro epidémico:

- **Patógeno** (hongos, bacterias y virus): algunos elementos a considerar se refieren a la disponibilidad y cantidad de inóculo, su eficacia (composición de virulencia y agresividad media) y su sobrevivencia de una estación a otra (determina el inóculo primario).

Algunas definiciones:

a) infección: establecimiento de un parásito en el hospedante, comprende la germinación (emisión de tubo germinativo por estímulos: agua, exudados, y da origen al pro-micelio y micelio), penetración (transferencia de protoplasma del patógeno al interior de los tejidos del hospedante) y establecimiento de la relación parasitaria o inicio de colonización (transferencia de nutrientes del hospedante al protoplasma del patógeno) a.1) Período crítico: es el tiempo (horas) durante el cual las condiciones meteorológicas son favorables (por ejemplo, horas de mojado a una dada temperatura) para completar la infección

b) Inóculo: cualquier estructura de un patógeno potencialmente infectiva, b.1) inóculo primario: es producido en otro lugar que no es la planta enferma (estructuras de sobrevivencia o reposo, fase saprofitica, semilla u hospedantes secundarios y/o intermediarios), origina el ciclo primario de la enfermedad, b.2) inóculo secundario: es producido durante la estación de crecimiento del hospedante enfermo, al final del ciclo primario, originando los ciclos secundarios de la enfermedad

c) Período de incubación: es el tiempo transcurrido desde la deposición del inóculo en el sitio de infección hasta el surgimiento de los primeros síntomas,

d) Período latente o período de infección: es el tiempo transcurrido desde la penetración del patógeno hasta la esporulación en pústulas o lesiones

e) Fases del ciclo de una enfermedad: esporulación (producción-maduración de esporas), diseminación (liberación a deposición de esporas) e infección (Reis, 2004).

f) Patógeno biotrófico: parásitos obligados, colonizan y esporulan en tejido vegetal vivo. Patógeno necrotrófico: parásitos facultativos, colonizan tejidos vivos pero también pueden obtener sus nutrientes y esporular en tejidos vegetales muertos.

g) Enfermedades monocíclicas (un solo ciclo durante el cultivo) y policíclicas (más de un ciclo durante el cultivo).

h) Principios de control de enfermedades de las plantas: evasión: se previene la enfermedad seleccionando el momento en el que no hay inóculo o el sitio con ambiente desfavorable a la infección; exclusión: se evita la introducción de inóculo; erradicación: eliminar, destruir o inactivar el inóculo; protección: se previene la infección por un compuesto toxico u otra barrera a la infección; resistencia: cultivares resistentes o tolerantes a la infección; terapia: curado de plantas ya infectadas (March *et al.*, 2010)

Epidemias de enfermedades causadas por virus, mollicutes y algunas bacterias se completan con un necesario transmisor (vector) del patógeno al hospedante, como el caso de *Delphacodes kuscheli* (Homóptera: Delphacidae), insecto vector del virus causante del Mal de Río Cuarto en maíz. El psílido asiático *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae), constituye una de las plagas más devastadoras para la citricultura mundial, no sólo por los daños provocados por su alimentación, sino por ser

un eficiente vector de la bacteria *Candidatus Liberibacter*, causante de la enfermedad llamada Huanglongbing (HLB), ex “Greening”, considerada como una de las más destructivas y letales de los cítricos

- **Hospedante:** es la fuente nutricional o sustrato por el cual el patógeno tiene preferencia. El sustrato puede ser la planta vegetando, planta voluntaria o guacha, restos culturales de cultivos anuales, hojas secas de plantas perennes, semillas, bulbos, tubérculos. La resistencia del hospedante a la enfermedad se relaciona con la edad y fase fenológica del cultivo o con su tipo genético que retrasa el inicio de la epidemia (resistencia vertical: se debe a uno o unos pocos genes, se puede quebrar por mutaciones en la población dominante del patógeno) o disminuye su tasa de incremento (resistencia horizontal: poligénica o cuantitativa) durante los estados susceptibles del hospedante. El conocimiento del comportamiento varietal de un cultivo (por ejemplo: trigo) respecto a enfermedades relevantes (perfil sanitario) permite el manejo eficiente de los recursos genéticos, influenciando en decisiones como la elección del lote según antecesores, considerar si el patógeno es necrotrófico (sobrevive en el rastrojo) o biotrófico (esporas pueden provenir de fuentes de inóculo alejadas o local, si hay mucho trigo voluntario) y estado nutricional de la planta (Formento *et al.*, 2013). En general los patógenos necrotróficos, como los causantes de manchas foliares en trigo, colonizan mejor a los tejidos débiles o deficitarios de nutrientes, para los biotróficos (royas en trigo) la tendencia parece ser inversa. La incidencia de *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* (pietín en trigo) se incrementa por un déficit de nutrientes, aporte de nitrógeno como nitrato, falta de fósforo y de manganeso (Carmona, 2008).

- **Ambiente:** dentro del ambiente abiótico sobresalen por su importancia los factores meteorológicos, entre los que se destacan la duración del mojado (fuente: lluvia, rocío, neblina) del tejido vegetal susceptible (sitio de infección) y la temperatura, responsables del desencadenamiento de la infección-esporulación y de la velocidad de los procesos involucrados, respectivamente. El viento y la lluvia intervienen en la diseminación de los patógenos (Kranz, 1994). Los requerimientos térmicos y de duración del período de mojado del proceso de infección, varían fuertemente entre tipos de patógenos. Los biotróficos infectan durante relativamente cortos períodos de mojado (enfermedades de rocío). Tal es el caso de las uredosporas de *Puccinia triticina* (roya anaranjada) que pueden infectar las hojas de trigo con solo 3-4 h de mojado, bajo óptimas condiciones térmicas (Roelfs, 1986). Los patógenos necrotróficos (ejemplos: *Fusarium graminearum*, *Septoria tritici*) requieren moderados a largos períodos de mojado (enfermedades de lluvia). El suelo a través de sus propiedades físicas, químicas y biológicas (pH, fertilidad, temperatura, microorganismos) también ejerce influencia sobre la incidencia de enfermedades.

- **Hombre:** determina las características del sistema de producción, seleccionando los cultivos y las prácticas culturales y definiendo las estrategias y tácticas de manejo de las enfermedades (modifica uno o más componentes del triángulo de la enfermedad). Estas últimas estrategias de manejo actúan sobre distintos parámetros epidemiológicos, como el inóculo inicial o el secundario, el proceso de infección, los períodos de incubación-latencia y las tasas de incremento. Las estrategias de exclusión, evasión y erradicación son preventivas o pro-activas, en cambio las de protección, terapia y resistencia son reactivas (March *et al.*, 2010) En los últimos años el productor agrícola ha tendido claramente a la adopción del sistema de siembra directa, caracterizado por la presencia de rastrojos en superficie y el consecuente aumento del nivel de materia orgánica en el suelo (secuestro de dióxido de carbono de la atmósfera del suelo). No obstante, esta conservación de rastrojos en superficie se asocia fuertemente al incremento de enfermedades causadas por patógenos de hábito facultativo, causantes de

enfermedades como las manchas foliares y fusariosis de la espiga en trigo (Annone y Kohli, 1996). De acuerdo a Simon *et al.*, (2010), en las rotaciones trigo/soja y trigo/trigo en siembra directa, el inóculo de hongos necrotróficos sobrevive usualmente hasta la siguiente campaña triguera. Para evitar pérdidas de rendimiento significativas en planteos de trigo sobre trigo, se deben implementar prácticas de manejo de enfermedades como el uso de variedades resistentes, aplicación de fertilizantes nitrogenados y de fungicidas. La fertilización nitrogenada incrementa la severidad de la roya anaranjada y disminuye la de mancha amarilla (*Drechslera tritici-repentis*).

El productor puede implementar una amplia gama de estrategias de manejo, entre las que se señalan: semillas y propágulos libres del patógeno, barreras físicas como cortinas rompeviento, medidas cuarentenarias, rotación y sistemas de labranza, fechas de siembra, intercultivos, aprovechamiento racional de cartografía de las áreas de riesgo respecto a las enfermedades y la introducción de cultivares resistentes. Por distintas razones algunas de estas prácticas no resultan suficientes para el control epidémico y se debe recurrir al uso de agroquímicos. La disponibilidad de sistemas de pronóstico de enfermedades es considerada clave para desarrollar múltiples aplicaciones que puedan integrarse al manejo táctico y estratégico de aquellas, además de razones económico-ecológicas.

2- Sistemas de Pronóstico de enfermedades de cultivos

2-1 Caracterización general

Como soporte al manejo estratégico y táctico de las enfermedades, se construyen sistemas de pronóstico o modelos predictivos de las mismas, fundamentados en factores ligados al hospedante, al patógeno y al ambiente, en forma individual o interaccionando. Entre los objetivos principales de los sistemas de pronóstico se citan:

- a) reducción del número de intervenciones químicas y/o aumento de su eficiencia.
- b) disminución de pérdidas económica debidas a la enfermedad.
- c) aumento de la renta del productor por racionalizar el número de aplicaciones.

Un sistema eficiente de pronóstico de una enfermedad debe ser **confiable**, basado en datos biológicos y climáticos confiables y validados, **simple**, por lo que tendrá mayor probabilidad de aceptación, para **una enfermedad de importancia**, de ocurrencia esporádica y que causa daños económicos, **útil**, para enfermedad para la cual se disponga de métodos efectivos de manejo y fungicidas eficientes, **operativo**, con tecnología apropiada y accesible, con **aplicabilidad y multiplicidad de uso** (equipos de monitoreo y software) y **económico** (Reis, 2004).

En la actualidad se disponen de modelos matemáticos cuantitativos que abarcan desde simples ecuaciones predictivas de la enfermedad basados en las condiciones meteorológicas, hasta complejos sistemas que combinan simuladores de crecimiento del cultivo con los epidémicos. Frecuentemente los sistemas predictivos disponibles sustentan el uso de fungicidas de acuerdo a su necesidad, en contraste a los tratamientos de seguridad o rutinarios. Esto ha contribuido a la reducción de costos y a la disminución de los riesgos de impacto ambiental o advenimiento de procesos de insensibilidad de los patógenos al fungicida (Royle y Shaw, 1988). Los modelos predictivos pueden brindar la información básica para desarrollar estudios de riesgo climático (geofitopatología). Para mancha en red (*Drechslera teres*) y escaldadura (*Rhynchosporium secalis*) en cebada cervecera, se delimitaron las áreas de riesgo en la región pampeana, utilizando sendos modelos de predicción de sus incidencias (Moschini *et al.*, 1996; Carmona *et al.*, 1997). También los sistemas de pronóstico se han integrado a estudios de impacto de la variabilidad climática sobre patosistemas, en

diferentes escalas espacio-temporales. Muchos sistemas de pronóstico pueden indicar el momento de la primera y de las demás aplicaciones de fungicidas. La mayoría de los sistemas predictivos pronostican la ocurrencia de la expresión de los síntomas de la enfermedad, monitoreando ciertas condiciones ambientales conducentes a la infección.

2-2 Procedimientos usados para su desarrollo

Análisis de regresión lineal: ajusta una ecuación que predice una variable respuesta o dependiente en función de variables regresoras o independientes y parámetros estimados por el método de mínimos cuadrados. Dentro de las técnicas de análisis multivariado, la regresión múltiple es la más utilizada en el campo de la fitopatología, siendo frecuentemente utilizado para establecer la relación empírica existente entre la enfermedad (variable dependiente) y variables independientes (en muchos casos meteorológicas).

En algunos casos los niveles de incidencia y/o severidad de la enfermedad son analizados sin transformar utilizando una escala porcentual para un cultivar o varios susceptibles a la enfermedad o promedios de los porcentajes observados por muchas líneas o variedades. Frecuentemente el nivel de enfermedad se analiza con una previa transformación del dato porcentual (arcoseno, raíz cuadrada, logaritmo natural) para estabilizar la varianza. Hooker *et al.* (2002) utilizaron técnicas de regresión lineal múltiple para predecir la concentración de deoxinivalenol en trigo, al igual que De la Campa *et al.* (2005) para estimar la concentración de fumonisina a cosecha en maíz. En ambos casos se transformó logarítmicamente la variable dependiente. En otros estudios con royas del trigo (Eversmeyer y Burleigh, 1970; Subba Rao *et al.*, 1990) la variable dependiente se expresó como logit^1 de la severidad a lo largo de la epidemia, siendo p la proporción de la severidad de la roya.

Establecida la fase del cultivo a monitorear, la selección preliminar de los mejores modelos de regresión se realiza utilizando el procedimiento estadístico Rcuadrado, el cual evalúa todas las posibles ecuaciones de regresión lineal, desde las simples hasta las múltiples, comparando sus coeficientes de determinación (R^2). Previa evaluación de su significado biológico, en la selección final de un modelo predictivo apropiado, Wilcox y Seen (1994) tuvieron en cuenta la significancia de parámetros y aleatoriedad de los gráficos de residuales. Eversmeyer y Kramer (1998) seleccionaron aquellos modelos con el máximo R^2 , menor número de factores independientes y mínima variación promedio entre los valores observados y predichos de la variable dependiente. Coakley *et al.* (1985) consideraron, como medida del error de predicción de los modelos, el estadístico PRESS (suma de los cuadrados de los errores para predecir observaciones faltantes mediante modelos definidos con las $n-1$ observaciones). El método de selección Stepwise (regresión lineal múltiple: Eversmeyer y Burleigh, 1970; Eversmeyer y Kramer, 1998; regresión logística: Harikrishnan y Del Río, 2008) incorpora a cada paso la variable regresora que logra el mayor ajuste del modelo, debiendo satisfacer umbrales de probabilidad tanto para entrar como para permanecer en el modelo.

Modelos lineales generalizados: por el método de mínimos cuadrados se ajustan modelos lineales de regresión para predecir la severidad de una enfermedad a partir de

¹El **logit** de un número p entre 0 y 1 es:

$$\text{logit}(p) = \log\left(\frac{p}{1-p}\right) = \log(p) - \log(1-p).$$

el logaritmo natural con base e es usado frecuentemente.

variables clasificatorias o discretas (ejemplo: grado de resistencia de los cultivares) y continuas. Las variables meteorológicas pueden evaluarse como componentes de tendencia lineal, además de analizarse su interacción con la componente clasificatoria (Moschini y Perez, 1999; Moschini *et al.*, 2002 a).

Análisis discriminante: permite clasificar a un conjunto de individuos u observaciones (por ejemplo años) en una de varias categorías posibles, sobre la base de un conjunto de variables independientes cuantitativas (supuesto de normalidad multivariada). A veces se incluye el procedimiento Stepwise para encontrar el subconjunto de variables cuantitativas que mejor revele las diferencias entre clases. Johnson *et al.* (1996) definieron dos funciones lineales discriminantes para pronosticar epidemias de tizón tardío de la papa en USA, utilizando variables independientes meteorológicas y una binaria (potencial de inóculo). También March *et al.* (1995) utilizaron esta técnica para desarrollar un modelo que predice la ocurrencia de años severos o moderados respecto a la intensidad de la virosis Mal de Río Cuarto del maíz.

Regresión Logística: por el método de máxima verosimilitud y la función logit como nexo, se ajustan modelos lineales de regresión que relacionan la probabilidad de la variable respuesta (código binario: 1 y 0: con o sin enfermedad u ordinal: nivel de enfermedad: nulo, moderado, severo) con variables explicativas. El supuesto de normalidad multivariada no es requerido para que la regresión logística sea válida. Johnson *et al.* (1996) y Henderson *et al.* (2007) ajustaron ecuaciones de regresión logística para explicar la probabilidad de observar o no ataque de *Phytophthora infestans* en papa. Turechek y Stevenson (1998) elaboraron modelos logísticos predictivos de *Cladosporium caryigenum* en pecán. Para el patógeno *Sclerotinia sclerotiorum* afectando al poroto (moho blanco), Harikrishnan y Del Río (2008) ajustaron un modelo de regresión logística para estimar las probabilidades de ocurrencia de tener un lote sano o enfermo (código binario: 0: Incidencia \leq 20% o 1: Incidencia $>$ 20%, respectivamente) en base al total de lluvia, temperatura mínima media y número de días de lluvia en la primera mitad de Junio, Julio y Agosto, respectivamente. En Argentina, Troglia *et al.* (2004) desarrollaron modelos logísticos basados en variables térmicas e hídricas para simular la dinámica del nivel de inóculo (producción de apotecios en esclerocios del suelo) de *S. sclerotiorum* en suelos con rastrojo de girasol, expuestos al ambiente natural y a una alta cobertura de malezas. Carmona *et al.* (2010) ajustaron modelos de regresión logística binarios para estimar niveles de severidad de enfermedades de fin de ciclo en soja en función de variables ligadas a la precipitación. Martínez *et al.* (2010) encontraron una fuerte asociación entre la concentración de fumonisinas en muestras de maíz cosechadas de un híbrido susceptible a *Fusarium verticillioides* y una variable que simula el mojado de espiga. Esta variable consiste en el número de periodos de dos días consecutivos con registro simultáneo de lluvia y alta humedad relativa, cuantificando esta relación mediante modelos de regresión logística. La variable meteorológica se calcula en torno a la aparición de estigmas (7 días antes hasta 10 días después de la aparición de los mismos). La severidad de manchas foliares, ocasionadas por *Alternaria tenuissima*, fue observada en plantaciones de arándano (*Vaccinium corymbosum*) cultivar O'Neal de San Pedro, Concordia y Gualaguaychú durante tres ciclos epidémicos (2008/09 a 2010/11). En primer lugar se ajustaron modelos logísticos para explicar la variación en los niveles de tasas de incremento epidémico diario (TId%) por medio de variables meteorológicas y de un factor asociado al grado de senescencia foliar, procesadas en los 14 días previos a cada valor estimado de TId a lo largo de cada curva de progreso (Bombelli, 2011; Bombelli *et al.*, 2013). El mismo análisis realizado sobre datos observados (Moschini *et al.*, 2011 a) confirmaron el lento progreso epidémico

primaveral, contrastando con las altas tasas de incremento estivales, concordantes con la mayor frecuencia de días con precipitación (fuente de mojado para la infección), acotados por registros térmicos entre 19 y 36°C. Hojas con senescencia creciente ayudaron a incrementar las tasas de infección

Redes neuronales artificiales (RNA): simulan las propiedades observadas en los sistemas neuronales biológicos (respuestas similares a las del cerebro: generalización y robustez) a través de modelos matemáticos recreados por mecanismos artificiales. Una RNA se asemeja al análisis de regresión multivariado no lineal en que ambos evalúan variables independientes e iterativamente desarrollan coeficientes que ajustan modelos con mínimo error. Sin embargo, los modelos estadísticos deben tener una solución formal especificada inicialmente por el modelador. Con modelos de RNA se puede señalar externamente cuanta información va a ser procesada, pero la forma final del modelo se determina luego de miles de procesamientos iterativos interconectados, paralelos y de múltiples pasos. De Wolf y Francl (1997) utilizaron RNA para predecir eventos de infección causados por *Pyrenophora tritici-repentis* (mancha amarilla en trigo). Klem *et al.* (2007) ajustaron modelos de RNA para predecir el contenido de la micotoxina DON (deoxinivalenol) en trigo, analizando datos de cuatro años de un sitio. El modelo final seleccionado se basó en cinco variables de entrada: una categórica: cultivo previo y cuatro continuas meteorológicas asociadas a la formación y dispersión del inóculo y al proceso de infección. Las RNA se destacan por su buen rendimiento ante problemas no lineales o datos con mucho “ruido”, y porque se pueden usar, independientemente del cumplimiento de los supuestos teóricos. La sobreparametrización y sobre-ajuste de los datos son riesgos que se señalan al desarrollar modelos de RNA. Otra limitación, compartida con todos los métodos empíricos, es que la precisión de predicción es válida dentro del rango de las variables independientes sobre los cuales los modelos son desarrollados (De Wolf y Francl, 1997).

2-3 Clasificación de los sistemas de pronóstico de enfermedades

La Figura 3 muestra un esquema de la clasificación de los sistemas de pronóstico de enfermedades de los cultivos.

Pronósticos para una enfermedad

Simple

-Basados en el Hospedante

Kranz (1994) considera que a partir de las fases de crecimiento o de la edad de un cultivo es posible planificar su protección de enfermedades, si previamente se ha establecido la relación entre estados críticos de desarrollo del hospedante con la infección-aparición de patógenos o pérdidas en cultivos.

Frecuentemente, con medidas de control siguiendo un criterio fenológico, se logra un número reducido de intervenciones, en comparación al observado con tratamientos reglados por calendario. En ciertos casos, esta predicción basada en la fenología del cultivo, constituye un pronóstico negativo cuando se define, para una cierta fase del hospedante, la nula o escasa probabilidad de aparición de una enfermedad. Los sistemas de pronóstico basados sólo en el hospedante son escasos pues las variaciones dentro/entre ciclos son pequeñas comparadas a las del ambiente y el patógeno. Un sistema que refleja el cambio de la receptividad del hospedante con la edad, es el desarrollado contra tizón temprano de la papa (*Alternaria solani*) por Pscheidt y Stevenson (1983).

-Basados en el patógeno

La medición directa de la densidad de inóculo es la forma más simple de predecir el nivel de enfermedad. Este enfoque es adoptado en enfermedades monocíclicas, policíclicas de pocas generaciones en la estación de crecimiento o policíclicas donde el inóculo inicial es de importancia cuali-cuantitativa. Dentro de las enfermedades causadas por hongos de suelo, Campbell y Madden (1990) citan los sistemas de recuento de esclerotos para pronosticar las podredumbres causadas por *Sclerotium rolfsii* y *Sclerotium cepivorum*, en remolacha azucarera y cebolla respectivamente. Para algunas enfermedades foliares se ha encontrado una relación entre la cantidad de enfermedad y el número de esporas colectadas en trampas (Jeger, 1984)

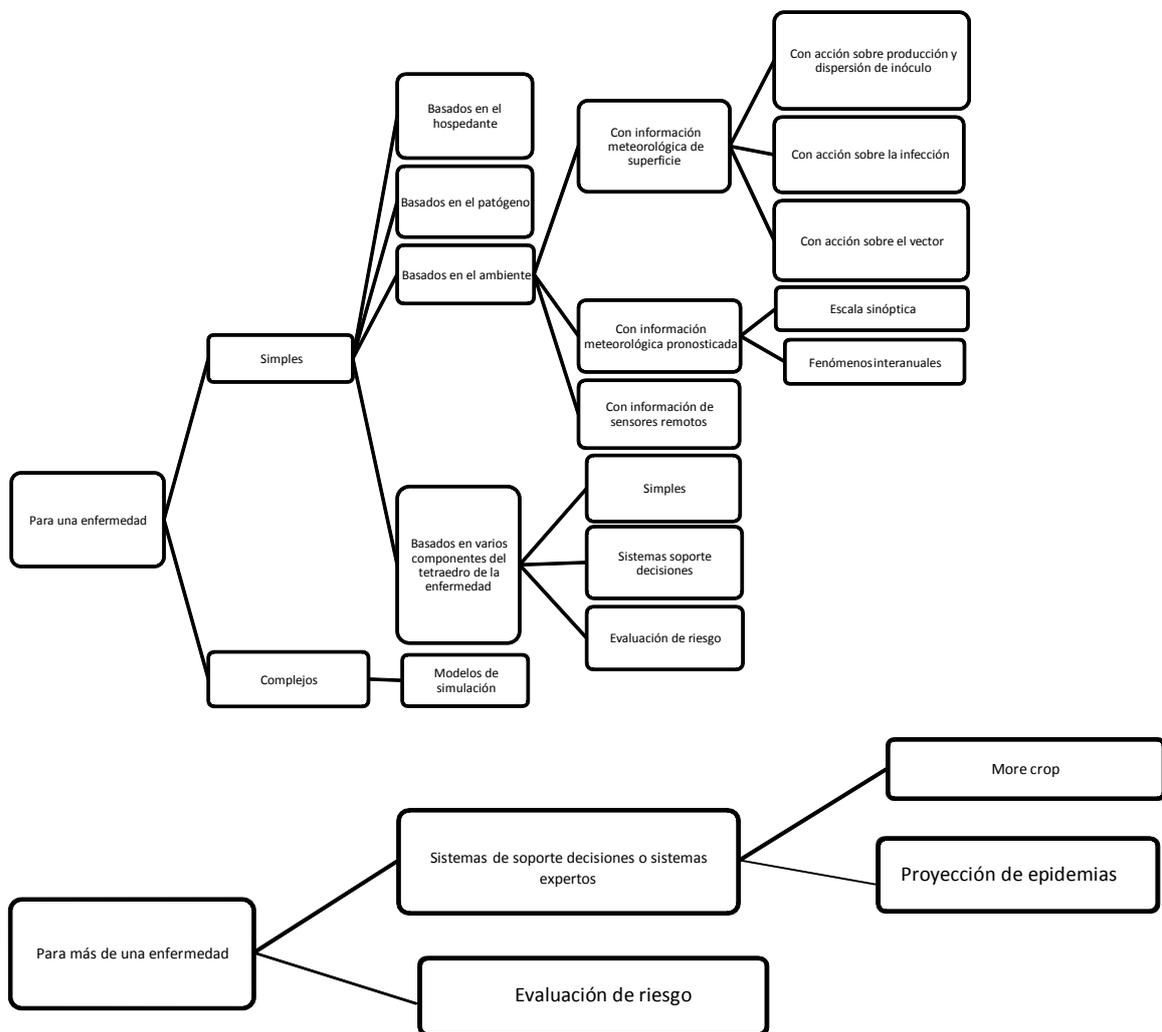


Figura 3: Clasificación de sistemas de pronósticos para una o más enfermedades

-Basados en el Ambiente

Krause y Massie (1975) reconocieron dos tipos de métodos para desarrollar sistemas de pronóstico basados en el ambiente: el **fundamental** o inductivo y el **empírico** o deductivo. El fundamental utiliza información generada en experimentos (de laboratorio, en cámara con ambiente controlado, en invernáculo o a campo) para

describir la influencia ambiental sobre uno o más aspectos de la interacción hospedante-patógeno (relaciones causa-efecto). Frecuentemente se evalúa el efecto de la duración de mojado y temperatura sobre uno o pocos componentes del ciclo de la enfermedad, por ejemplo, la infección, visualizando la relación en tablas y gráficos o ajustando ecuaciones. A veces las relaciones ambiente-patógeno establecidas bajo condiciones controladas de laboratorio pueden distorsionarse a campo (cambios en la disponibilidad de inóculo, nutrientes, microflora, edad de las hojas, condición fisiológica). Los sistemas de pronóstico empíricos o deductivos, muchos de los cuales son de gran utilidad y funcionales, surgen del análisis de datos actuales e históricos de registros de la enfermedad y de las condiciones ambientales en un área geográfica específica. Esto resulta en la formulación de reglas que deben cumplirse antes que se produzca el desarrollo de la enfermedad, por ejemplo las establecidas para el tizón tardío (*Phytophthora infestans*) de la papa por Hyre (1954). De acuerdo a Coakley (1988), un mínimo de 8-12 años de observaciones de la enfermedad en lotes de cultivo (inóculo natural) se necesitan para identificar los factores meteorológicos asociados y cuantificar sus efectos mediante el ajuste de modelos predictivos. Si esto no fuera posible, se podría utilizar información meteorológica y de la enfermedad de varios sitios pertenecientes a una región geográfica, de manera de obtener variabilidad. Del Ponte *et al.* (2006) ajustaron modelos de regresión lineal basados en variables hídricas para predecir la severidad final de la roya asiática en soja (*Phakopsora pachyrhizi*), utilizando datos de porcentaje de severidad de sólo 3 campañas pero de 34 experimentos de campo, en 21 sitios de Brasil. Moschini *et al.* (2006), utilizaron observaciones de incidencia de escudete negro (*Alternaria alternata* y *Bipolaris sorokiniana*) en trigo fideo de 5 sitios y 3 campañas para ajustar modelos predictivos de regresión lineal múltiple y logística basados en dos variables meteorológicas.

= Con información meteorológica observada en superficie

Con mucha frecuencia las variables meteorológicas consideradas por los pronósticos de enfermedades se basan en observaciones diarias u horarias de temperatura, humedad relativa, duración de mojado y precipitación, provenientes de estaciones meteorológicas estándar algo distantes del cultivo o de estaciones que miden las condiciones microclimáticas del dosel. Entre estas dos alternativas de medición meteorológica, Coakley (1988) señala que el macroclima produce el microclima, estando este último limitado en desarrollar una enfermedad cuando existe un ambiente macroclimático desfavorable. A nivel mundial, valores diarios de temperatura máxima-mínima y de precipitación son rutinariamente registrados en estaciones convencionales, disponiéndose de largas series históricas para muchas localidades. Por el contrario los registros microclimáticos, además de su limitada extensión espacial, cubren en general cortos períodos de tiempo y pocas localidades, con alta frecuencia de datos faltantes.

Todos los elementos meteorológicos mencionados tienen diversas formas de ejercer su acción sobre las enfermedades:

Con acción sobre la producción y dispersión de inóculo

Como ejemplos de esta acción pueden mencionarse la definición de los factores meteorológicos asociados con la esporulación de *Peronospora destructor* (biotrófico) (Hildebrand y Sutton, 1982) y de *Botrytis squamosa* (necrotrofico) en cebolla (Sutton *et al.*, 1983).

El hongo *Guignardia citricarpa*, causante del moteado negro en citrus, forma ascosporas en peritecios existentes en hojas muertas depositadas en el suelo de la plantación. Las ascosporas (fuente primaria de inóculo) son dispersadas por el viento,

germinando sobre la superficie de frutos y hojas y causando infecciones latentes. En Montecarlo (Misiones) se encontró que los días con simultáneo registro de precipitación ($\geq 0,2$ mm) y amplitud térmica $< 14,2^{\circ}\text{C}$, resultaron claves para explicar la dinámica del atrape semanal de ascosporas (Dummel *et al.*, 2012). En *Venturia inaequalis* (sarna del manzano), el inóculo inicial (ascosporas), presente en grandes cantidades, es muy importante para determinar el desarrollo epidémico de este patógeno policíclico con pocos ciclos secundarios. El hongo pasa el invierno como pseudotecios en hojas en el suelo, los cuales descargan las ascosporas al mojarse. Las ascosporas son dispersadas durante intervalos de mojado iniciados por lluvias, siendo éste un criterio útil para el pronóstico del ataque primario de la sarna del manzano en primavera (MacHardy y Gaudory, 1986).

Con acción sobre la infección

La mayoría de los sistemas predictivos pronostican la ocurrencia de la expresión de los síntomas de la enfermedad, monitoreando ciertas condiciones ambientales conducentes a la infección del hospedante por el patógeno. Los más frecuentes toman en cuenta la acción directa de las condiciones físicas, tales como la temperatura, humedad y duración de follaje mojado, requeridas para el proceso de infección. La duración del mojado de la superficie vegetal y la temperatura durante el lapso de mojado, definen el período crítico para la infección de un patógeno (Sutton, 1988).

El sistema de predicción de la sarna del manzano identifica “períodos de infección” durante los cuales las condiciones ambientales favorecen la inoculación y penetración de *Venturia inaequalis*. Mills (1944) estableció en un formato gráfico la superficie de respuesta del tiempo requerido para la infección por el patógeno, combinando niveles térmicos y de duración de mojado foliar variables. Se determinan así grados de infección que oscilan desde nulos a severos, a medida que se incrementan ambos factores (temperatura hasta 22°C). El hongo *V. inaequalis* coloniza el tejido uno a tres días después de la inoculación, por ello es sensible a fungicidas que penetran parcialmente la cutícula (Fry y Fohner, 1985).

Basados en la presencia de un ambiente favorable actuando sobre el inóculo secundario, suponiendo suficiente disponibilidad de inóculo inicial, se han desarrollado una serie de modelos predictivos, como el de Coakley *et al.* (1985), que predice la severidad de *Septoria tritici* en trigo 26 días después de espigazón, sobre la base del total de días consecutivos sin lluvia entre el 26/3 al 4/5 y los días consecutivos totales entre el 4/4 y 3/5 con temperatura mínima $\leq 7^{\circ}\text{C}$.

Se han llevado a cabo muchos trabajos para pronosticar la severidad del tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans*) basados en factores ambientales. En Alemania, usando mediciones de temperatura, humedad relativa y lluvia (Ullrich y Schrodter, 1966) se predice cuando es poco probable la ocurrencia de una epidemia de tizón (pronóstico negativo), estimándose el momento del primer tratamiento fungicida. El sistema BLITECAST (Krause *et al.*, 1975) es una versión computarizada de los modelos de Hyre (1954) y Wallin (Wallin y Waggoner, 1950). El programa pronostica la aparición inicial de tizón tardío 7-14 días después de la primer ocurrencia de 10 días consecutivos favorables de lluvia o tizón (Hyre: día favorable: lluvia total de los 10 días previos ≥ 30 mm, temperatura media de los 5 días previos $\leq 25,5^{\circ}\text{C}$) o la acumulación de 18 valores de severidad (Wallin asigna valores de severidad de 0 a 4 en base a las horas con registros de humedad relativa $\geq 90\%$ y la temperatura media durante esas horas). El monitoreo se inicia a partir de la emergencia del cultivo. La primera pulverización se aconseja con la primera alarma y las subsiguientes son recomendadas de acuerdo a una matriz que correlaciona días favorables de lluvia con valores de severidad durante los

últimos 7 días. Actualmente, con microprocesadores instalados dentro del cultivo, que registran y procesan información de temperatura, humedad relativa y lluvia, se ofrecen recomendaciones sobre aplicaciones de fungicidas, basados en el BLITECAST (MacKenzie, 1981).

Con acción sobre el vector

Delphacodes kuscheli Fennah (Hemiptera: Delphacidae), principal vector del *Mal de Río Cuarto virus* en maíz (MRCV), adquiere el virus en avena y trigo destinados a pastoreo durante el período invernal, desde los cuales migra al maíz, causando severas epidemias, cuando elevadas poblaciones de macrópteros coinciden con los primeros estadios de desarrollo del cultivo. Basado en datos históricos de intensidad del MRCV y en variables meteorológicas (promedio de las temperaturas máximas medias de junio, julio y agosto; promedio de las temperaturas máximas medias de julio y agosto; lluvias totales en junio, julio y agosto), se desarrolló un sistema de pronóstico de presiembra (1 de setiembre) de intensidad de la enfermedad (March *et al.*, 1995). MRCV se puede evitar realizando siembras tempranas, en función de las predicciones del modelo. Este escape a la enfermedad está en directa relación con las poblaciones de las formas macrópteras del vector en el área endémica, lo que permitió desarrollar un sistema de predicción de densidad poblacional del mismo, que puede complementar al anterior (Ornaghi *et al.*, 2011). En este trabajo, el mejor modelo lineal bivariado incluyó a la variable GDT_{nx}, que acumula lo que excede a 10°C en temperatura media en los días con registros de temperatura mínima y máxima > a 11°C y 24,5°C respectivamente, y a DPr que cuenta los días con precipitación. Estas variables se calcularon desde el 1° de julio al 19 de septiembre.

= Información meteorológica pronosticada: escala sinóptica y de fenómenos interanuales

Las condiciones meteorológicas se han usado extensamente para la toma de decisión en el control de enfermedades. La mayoría de los sistemas de alarma de enfermedades se operan con información meteorológica observada, lo cual no los hace completamente predictivos para anticiparse suficientemente en la aplicación de fungicidas. A pesar de acordar que el uso de pronósticos meteorológicos podría mejorar las técnicas predictivas de enfermedades basadas sólo en datos observados, son pocos los sistemas que los utilizan para realmente predecir la infección u otro evento epidemiológico (Vincelli y Lorbeer 1988; Royer *et al.*, 1989; Raposo *et al.*, 1993; Baker y Kirk, 2007). Bourke (1970) señaló el valor potencial de analizar la secuencia de factores meteorológicos que favorecen una enfermedad e identificar los tipos de situaciones meteorológicas recurrentes sobre cartas sinópticas, complementando el rol ejercido por modelos simples de predicción. Para identificar y clasificar patrones de circulación atmosférica se disponen de técnicas cada vez más objetivas de correlación y análisis multivariado. De Ruyver *et al.* (2010, 2011) realizaron estudios para conocer las características de la circulación atmosférica que conducen a la llegada de esporas (urediniosporas) de *Phakopsora pachyrhizi* (roya asiática de la soja) en R. Sáenz Peña y en Paraná. Se estudiaron los campos de circulación media diaria en 1000 hPa para el día 0 y los tres días previos a la captura de esporas. Los días mejor correlacionados, en base a Lund (1963), determinaron los campos medios que mejor describen la circulación observada en los días especificados. Los resultados mostraron una circulación predominante del noreste e indicarían un ingreso de urediniosporas desde el sur de Brasil.

También se pueden asociar niveles de expresión epidémica en cultivos relevantes a la variabilidad climática generada por fenómenos de crecientes escalas

espacio-temporales. Varios estudios relacionaron el fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) con las variaciones interanuales de enfermedades fúngicas en otros países (Zhao y Yao, 1989, Scherm y Yang, 1995; Wright y Hansen, 1997; Meinke y Ryley, 1997; Del Ponte *et al.*, 2009) y en Argentina (Moschini *et al.*, 1999; Moschini, 2006; Moschini y Bischoff, 2007). Otros índices correspondientes a fenómenos como el Modo Anular del Sur (MAS) u Oscilación Antártica (Garreaud *et al.*, 2009), el índice (I) zonal usado para identificar situaciones de acción bloqueante en el sur de Sudamérica (Alessandro, 2003) o los que analizan la intensidad y posicionamiento de los anticiclones Atlántico-Pacífico (Camilioni *et al.*, 2005) se han estudiado en relación a la variabilidad observada en la temperatura y precipitación de Argentina, con posibilidades ciertas de inferir efectos sobre la ocurrencia de enfermedades fúngicas en cultivos como la fusariosis de la espiga de trigo (Moschini, 2011).

= Información meteorológica originada en sensores remotos

La observación por sensores remotos comprende varios métodos no destructivos para adquirir y analizar propiedades espectrales de la vegetación desde distintas distancias (satélites a plataformas en tierra). La radiación solar, fuente de energía básica recibida por la Tierra, es responsable de los procesos de fotosíntesis, evaporación, calentamiento del suelo y aire y movimiento de la atmósfera, entre otros. Esta radiación solar, principalmente entre las longitudes de onda de 0,3 a 4 micrones, interacciona con el tejido vegetal pudiendo reflejarse, absorberse o transmitirse. Los pigmentos, tales como carotene y clorofila, y el agua de las hojas absorben la radiación del Sol en las bandas del espectro visible (Vi) de 0,4-0,7 micrones (radiación fotosintéticamente activa) y del infrarrojo medio (IRm) de 1,3-2,5 micrones por lo que tienen baja reflectancia. Para el infrarrojo cercano (IRc), entre 0,7-1,3 micrones, dominan la reflectancia, que está relacionada con la densidad foliar, y la transmitancia. Esta radiación reflejada de la región específica visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio del espectro electromagnético ha probado ser de utilidad para detectar deficiencias nutritivas e infestaciones por enfermedades, malezas e insectos. Índices de vegetación multispectrales derivados de la reflectancia del dosel vegetal puede usarse para monitorear la respuesta del crecimiento de un cultivo en relación a variables climáticas medidas o predichas (Hatfield y Pinter, 1993).

Radiómetros espectrales aéreos: el índice de vegetación de diferencia normalizada ($NDVI = \frac{IRc - Vi}{IRc + Vi}$) relaciona la radiación solar reflejada colectada por los canales de la banda del infrarrojo cercano y del visible (satélites NOAA). Una mayor biomasa verde (Índice de Área Foliar: 3-4) se asocia a máximos valores de NDVI. Grilli y Gorla (1997) produjeron mapas dinámicos con distribución espacial y temporal de la abundancia poblacional de *Delphacodes kuscheli*, vector del virus que produce el Mal de Río Cuarto del maíz. Se demostró la existencia de una significativa correlación entre valores del NDVI calculados desde satélites NOAA11 o NOAA 9 y la abundancia poblacional del insecto 36 días después, permitiendo estos resultados el desarrollo de un sistema de monitoreo y pronóstico de la abundancia del vector.

Para obtener datos de frecuencia y cantidad de lluvia a partir de la información originada en sensores remotos se han desarrollado numerosos algoritmos empíricos. En Argentina, De Ruyver *et al.* (2001) estimaron la cantidad de precipitación teniendo en cuenta la temperatura del tope de nubes (mayor a umbral: $-52^{\circ}C$), derivada del análisis de imágenes GOES-8 (canal 4: banda 10,2-11,2 μm). Irurzum *et al.* (2006) compararon el área de ocurrencia de precipitación estimada por sensoramiento remoto (canal infrarrojo del sensor AVHRR montado sobre satélites NOAA 12, 14, 15 y 16) con la observada en estaciones de superficie en el noreste de la región pampeana. Se determinó

el área de ocurrencia con y sin lluvia utilizando el umbral de 235° Kelvin (-38° C). Damiano *et al.* (2006) incorporaron esta información a los datos de superficie de temperatura y humedad, y de esta forma estimaron la incidencia regional de la fusariosis de la espiga de trigo, usando el modelo bivariado desarrollado por Moschini y Fortugno (1996). Detrixhe *et al.* (2003) definieron un modelo agrometeorológico para evaluar el riesgo de infección de la fusariosis (resolución 1 km x 1 km), simulando la duración de mojado. Esta simulación está basada en la interpolación de datos meteorológicos (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación de onda corta y larga) colectados de una red de estaciones meteorológicas y de datos de radar para estimar la precipitación. Últimamente se está utilizando un algoritmo “mixto”, que combina datos de infrarrojo térmico con microondas pasivas. Un ejemplo de esta metodología es el algoritmo 3B42 de TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission), el cual produce estimaciones de precipitación cada tres horas combinando información proveniente de los sensores del satélite TRMM y de otros satélites cuyas pasadas coincidan en el tiempo y en el espacio.

Radiómetros multiespectrales terrenos: se ha intensificado en los últimos años la utilización de estos radiómetros operados desde tierra para la detección de las enfermedades y estimación de eventuales pérdidas en cultivos. El “quemado” o “tizón” es la principal enfermedad del cultivo de arroz por su amplia distribución y por las altas pérdidas que ocasiona a nivel mundial. El agente causal es el hongo *Pyricularia grisea* y se la conoce desde hace varios años en la región litoral del país. Kobayashi *et al.* (2001) observaron un incremento de la reflectancia en las regiones espectrales de 0,43 a 0,53, de 0,58 a 0,68 y de 1,48 a 2 micrones con el aumento del porcentaje de espiguillas enfermas en panojas de arroz, tanto en laboratorio como a campo en madurez pastosa.

-Basados en varios componentes del tetraedro de la enfermedad
= Sistemas simples

Eversmeyer *et al.* (1973) ajustaron ecuaciones lineales para explicar la variación de la severidad de *Puccinia graminis f. sp. tritici* en trigo sobre la base de variables independientes ligadas al huésped (resistencia de los cultivares y estado de desarrollo), al patógeno (severidad de la enfermedad al momento de la predicción) y a las condiciones meteorológicas.

Shaw y Royle (1986) desarrollaron un sistema para decidir la aplicación de fungicida contra *Septoria tritici* en trigo, basado en dos componentes: a) nivel de inóculo inicial medido por el conteo de picnidiosporas, con el cultivo en comienzo de encañazón (la espiga a 1 cm de nudo de macollaje), b) precipitación analizando su capacidad de diseminar las esporas del hongo. Con el cultivo en hoja bandera, un aparato especial (salpicómetro: vara vertical de 20-30 cm enrollada con papel detector que se colorea al salpicarse con tintura ubicada en la base) evalúa el poder de salpicadura de las gotas de lluvia.

Para la región semiárida del Estado de Washington (USA), se definieron dos funciones discriminantes y dos modelos de regresión logística para pronosticar la ocurrencia de epidemia de *Phytophthora infestans* en papa, utilizando variables cuantitativas ligadas a la frecuencia de lluvia y una binaria (año precedente: con o sin epidemia) que evalúa el potencial de inóculo (Johnson *et al.*, 1996). Smith *et al.* (1984) desarrollaron un modelo predictivo de la incidencia de la virosis en papa (PLR) en Maine basado en el inóculo inicial (nivel de incidencia en año precedente) y la acumulación de temperaturas mayores a 21°C del 1 al 10 de agosto, que acciona sobre el crecimiento de la población del vector del virus (especies del pulgón del duraznero).

=Sistemas de soporte de decisiones

Surgen con el fin de integrar la abundante información disponible sobre la biología y control de enfermedades de los principales cultivos y presentar recomendaciones de manejo en un formato amigable al productor agrícola. Como ejemplo se cita el sistema PhytoPRE (Forrer *et al.*, 1993), modelo que simula la epidemia del tizón tardío en papa, indicando la probabilidad de infección. Se ajusta una curva sigmoidea cuyos parámetros se derivaron de una red de parcelas de papa no tratada (3 años). La simulación de la probabilidad de infección es activada con el primer ataque de tizón registrado adaptando la curva simulada a las diferentes condiciones meteorológicas regionales. Se generan mapas con pronósticos regionales de la epidemia y se aconseja el primer tratamiento con fungicida sobre la base de las probabilidades de infección locales. Los siguientes tratamientos dependen del cultivar, la lluvia local, los ataques de tizón registrados en la región y los fungicidas aplicados previamente.

=Evaluación de riesgo

Se organiza un sistema de puntuación para calificar la influencia de los factores claves relacionados con la enfermedad y a la respuesta económica del posible control químico de la misma; dichos factores son, entre otros, fecha y densidad de siembra, cultivar, sistema de labranza, rotación de cultivo, nivel de precipitación-humedad relativa-rocío, estrategia de riego, fertilidad del suelo, disponibilidad de inóculo, potencial de rendimiento etc. La persona que realiza la evaluación otorga una nota a cada factor incorporado, sobre un rango de valores posibles que van de cero a un máximo vinculado con la importancia relativa del factor considerado. Las notas parciales son totalizadas y comparadas con un valor umbral para decidir, por ejemplo, la aplicación de un fungicida. Johnson (1987) describe este sistema para dos enfermedades en leguminosas. El correspondiente a la evaluación del riesgo de una infección de *Sclerotinia sclerotiorum* (podredumbre de tallo) en colza (Twengstrom y Sigvald, 1993), estimado durante plena floración, incluye los siguientes factores: años desde el último cultivo oleaginoso e incidencia de la enfermedad, densidad del cultivo, rotación de cultivo, precipitaciones en junio y en las últimas dos semanas, pronóstico meteorológico y riesgo regional. En este estudio sueco, el punto central en la evaluación resultó la presencia de apotecios de *Sclerotinia* en el propio campo (nivel de inóculo), altamente asociado con la ocurrencia de precipitaciones en las semanas previas a la floración en julio.

Complejos

Las epidemias en cultivos pueden ser estudiadas y cuantificadas usando modelos empíricos de uso más limitado o modelos mecanísticos, los cuales pueden incrementar el entendimiento de la epidemia y la calidad de la predicción. Entre estos últimos, están los modelos de simulación, constituidos por submodelos que representan componentes de un ciclo de infección como la germinación de esporas, penetración, colonización y esporulación. La simulación es parte del análisis de sistemas, el cual es un enfoque para investigar las relaciones causa efecto. Los modelos de simulación organizan el conocimiento disponible sobre el patosistema y permiten examinar efectos de manipulaciones del sistema, tal como diferentes estrategias de manejo (Campbell y Madden, 1990). Muchos de los simuladores de enfermedades de cultivos están compuestos de modelos determinísticos (Bruhn y Fry, 1981; Benizri y Projetti, 1992), otros como el del mildew de la vid (Sall, 1980) incorpora modelos estocásticos. En los determinísticos hay una exacta predicción de cada variable, en los estocásticos un rango

de predicciones puede ser generado dependiendo de distribuciones de probabilidad por lo que se necesitan múltiples corridas para obtener salidas medias.

El modelo de simulación desarrollado por Yang *et al.* (1991) para evaluar epidemias de la roya de la soja causado por *Phakopsora pachyrhizi* incluye ecuaciones que describen el efecto ambiental sobre componentes de la enfermedad. La tasa de infección fue bien predicha usando horas de mojado y temperatura, posterior a la inoculación. Un modelo exponencial que usa días fisiológicos como variable independiente explica el 98% de la variación del período latente y senescencia de las lesiones.

Maiorano *et al.* (2008) desarrollaron en Italia un modelo de simulación dinámico (FUMAGrain) para evaluar el riesgo de fumonisinas (FB: asociado al hongo *Fusarium verticillioides*) en maíz. Establecieron tres submodelos integrados por el desarrollo del cultivo de maíz, la infección de *F. verticillioides* y la síntesis de FB y por último, el daño ocasionado al grano por el insecto “barrenador europeo”. El submodelo de infección desde aparición a secado de estigmas es el producto de dos factores, uno ligado a la dispersión del inóculo por viento y lluvia y otro asociado a la germinación (dependiente de la temperatura, humedad relativa y actividad acuosa de las barbas). La dispersión del inóculo correspondiente a las mayores contaminaciones de FB (valor 1) se produce dentro del rango 0,31-2 mm/h de intensidad de lluvia y a velocidades del viento superiores a 3,1 km/h. Las variables de entrada del modelo son fecha de siembra, datos horarios de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, intensidad de lluvia, estado del desarrollo fenológico del híbrido sembrado y tratamiento químico del insecto barrenador.

Recientemente se desarrolló en Brasil un modelo de simulación del riesgo de infección de la Fusariosis de la espiga de trigo (Del Ponte *et al.*, 2005). En este trabajo los autores estimaron el índice de infección de la Fusariosis en base a la dinámica de la floración, densidad de inóculo y frecuencia de infección. Esta última resultó una función de la temperatura durante un evento infectivo, el cual se estableció combinando registros de precipitación y humedad relativa.

Pronósticos para muchas enfermedades

- *Sistemas de soporte de decisiones o sistemas expertos*

=MoreCrop

Un buen ejemplo es el sistema experto computarizado diseñado para proveer opciones de manejo de las royas amarilla y de la hoja (*Puccinia striiformis* y *Puccinia triticina*) y otras enfermedades del trigo en diferentes zonas agronómicas de la región NO de Estados Unidos (Line y Cu, 1993). En primer lugar se establecen las variables del programa y se define un escenario de manejo del cultivo (región, agrozona, rotación de cultivos, riego, fecha de siembra, tipo de labranza, cultivar, etc). Se reconocen 7 regiones de cultivo de trigo con ocurrencia de la roya amarilla, basado en barreras geográficas, vientos prevalentes, métodos de cultivo y virulencia de razas. Las zonas agronómicas resultan de combinar 3 criterios: precipitación, grados día acumulados y profundidad de suelo. Las condiciones climáticas en cada zona son definidas sobre la base del análisis de series históricas de 30 años de temperatura (frío, fresco, templado, cálido) y precipitación (nieve, húmedo y seco) que ocurren en el otoño temprano y tardío, en el invierno y en la primavera temprana y tardía. Si las condiciones meteorológicas estacionales se desvían de la normal climática, se puede cambiar a la situación actual. La fertilidad del suelo es usada como variable si está disponible.

Al correrse el programa se remarcan las enfermedades con alta probabilidad de ocurrencia con un factor de confianza que asocia los factores predisponentes. Otros

factores usados por MoreCrop para guiar el manejo de las enfermedades son: virulencia de razas y susceptibilidad del hospedante, tipo y grado de resistencia, severidad en distintos estadios de crecimiento del cultivo, pérdidas de rinde en relación a severidad enfermedad, efectividad de fungicidas, potencial de rinde, costo vs beneficio de control.

=Proyección de epidemias

Descansa en el monitoreo de la enfermedad en el lote de cultivo, a partir del cual se puede proyectar el futuro nivel de severidad. Las enfermedades policíclicas, de monitoreo visual, con lenta tasa de incremento (al menos inicialmente) y con intensidad menor al umbral de daño económico al ser observables, son las que mejor se adaptan a este enfoque. Para algunas enfermedades, como el tizón de la papa, el monitoreo visual es difícil debido a los períodos de latencia, es decir el lapso posterior a la infección pero previo a la expresión de síntomas, y por presentar umbrales de control muy bajos que están muy cerca del nivel de percepción (Johnson, 1987).

Como ejemplo de sistema de proyección se cita al EIPRE (Epidemiology, Prediction and Prevention) (Zadoks, 1989), que fue desarrollado en Holanda con el fin de promover una protección del cultivo de trigo eficiente en costos. El sistema computarizado da recomendaciones para 6 enfermedades y varias especies de pulgones. Cada productor agrícola que entra al sistema realiza su propio monitoreo sanitario del cultivo e inmediatamente envía esta información a una central donde se proyecta el nivel de enfermedad, sobre la base de una ecuación de crecimiento exponencial

$$E_t = E_o \cdot e^{rt}$$

Donde:

E_t : nivel de enfermedad al tiempo t ,

E_o : nivel de enfermedad actual, obtenido de la observación a campo,

r t : tasa de crecimiento relativo de la enfermedad en el tiempo pronosticado.

Para el caso de roya amarilla (*Puccinia striiformis*) se tabulan los valores de r en función del estadio fenológico, iniciando con hoja bandera visible, y la fertilización nitrogenada. El valor de r esperado usado en la ecuación exponencial resulta de multiplicar r por un coeficiente de compatibilidad que depende de la resistencia varietal y por un factor asociado a las condiciones culturales. Además se aplican factores de reducción por tipo de agroquímico usado (sistémico o de contacto). El nivel de enfermedad esperado (E_t) es multiplicado por un factor que varía con el estadio fenológico y potencial de rinde del trigo para obtener la merma de rinde estimada en kg/ha, la cual, balanceada con el costo, produce la recomendación final de aplicar o no un fungicida.

-Sistemas de Evaluación de Riesgos

Un sistema de puntuación se organiza para calificar la influencia de factores claves (fecha y densidad de siembra, cultivar, sistema de labranza, rotación de cultivos, nivel de precipitación-humedad relativa-rocío, estrategia de riego, fertilidad del suelo, disponibilidad de inóculo, potencial de rendimiento) relacionados con las enfermedades y la respuesta económica de su posible control químico. A cada factor se le otorga una nota que oscila entre cero y un valor máximo. Las notas parciales totalizadas se comparan con un valor umbral para la toma de decisión (ejemplo: aplicación de fungicida). Reis *et al.* (1999) establecieron un sistema de acumulación de puntos en cada situación del cultivo de trigo que permite estimar su potencial de rendimiento,

sustentando (económica y ecológica) la toma de decisión respecto al uso de fungicidas en los órganos aéreos. El sistema, ajustado en dos estados del SE de Brasil, da puntaje a los siguientes factores de rendimiento: disponibilidad de fósforo en suelo, fertilizante nitrogenado aplicado, cultivo previo estival: soja o maíz, años de monocultura o rotación de cultivos en planteos de siembra directa, plantas logradas por m², potencial de rinde del trigo (semana previa al uso del fungicida), comportamiento de la variedad de trigo sembrada respecto a la roya de la hoja (*Puccinia triticina*), incidencia de oidio (*Erysiphe graminis*) y roya de la hoja, de final de macollaje en adelante, y manchas foliares (*Septoria tritici*, *Drechslera tritici-repentis*) desde encañazón. Con incidencias similares a las establecidas por el umbral de acción (derivadas del umbral de daño económico según Munford y Norton, 1984), se da el puntaje máximo para este factor. El mismo sistema ajustado en Argentina (Carmona y Reis, 2001) pondera algunos de los factores que contribuyen a la generación de los rendimientos del cultivo de trigo en función de una graduación de los mismos para cada situación, zona y lote particular de producción. Para ello, se confeccionaron cuatro tablas de puntuación para las principales localidades y zonas de la Región Pampeana. El sistema se encuentra actualmente informatizado y disponible libremente.

3- Desarrollo y aplicaciones de sistemas de pronóstico de enfermedades con base meteorológica en Argentina

Las variables meteorológicas de todos los sistemas de pronóstico analizados fueron calculadas a partir de registros diarios de temperatura máxima (Tx) y mínima (Tn), humedad relativa (HR: promedio tridiurno) y precipitación (Pr). La temperatura media diaria (Td) es la semisuma de Tx y Tn. Las variables meteorológicas analizadas se calculan en el llamado período susceptible para la infección (PSI), cuya duración está expresada en grados día (GD), que acumulan las diferencias diarias de la Td y un valor umbral térmico inferior o temperatura base (Td_b).

Se consideraron los siguientes patosistemas:

3-1 Fusariosis de la espiga de trigo (FET)

La naturaleza esporádica de la FET (*Fusarium graminearum*; *Gibberella zeae*) relacionada fuertemente al factor ambiental, estimularon el desarrollo y validación de sistemas empíricos y fundamental-empírico de pronóstico. Ambos sistemas reconocen eventos infectivos por mojado de la espiga, combinando la ocurrencia de precipitación y altos registros de humedad relativa.

Enfoque empírico

En Pergamino se identificaron los factores hídricos y térmicos asociados con la incidencia de la FET (I: % de espigas afectadas) (Moschini y Fortugno, 1996).

$$I(\%) = 20,37 + 8,63 \text{ PMoj} - 0,49 \text{ GDN} \quad R^2 = 0,86 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

PMoj: número de períodos de mojado de 2 días con registro de precipitación y HR > 81% en el día 1 y una HR ≥ 78% en el día 2.

GDN: acumulación diaria del residual > 26°C en Tx y < 9°C en Tn. Las variables se calculan desde la aparición de las primeras espigas con anteras hasta acumular 530 grados día (Td_b = 0°C). El PSI tiene una duración de 26 a 32 días.

Este modelo predictivo fue validado y ajustado en otros sitios de la región pampeana. Al norte la ecuación 1 sólo cambia en la variable GDN, la cual acumula el residual diario de $T_x > 30^\circ\text{C}$ (Moschini *et al.*, 2001). En el sur, la variable GDN tiene umbrales de 11°C y 30°C para T_n y T_x respectivamente. El PSI se extiende hasta acumular 450 grados día ($T_{d_b} = 0^\circ\text{C}$) (Moschini *et al.*, 2004; Carranza *et al.*, 2007).

Enfoque Fundamental-Empírico

Estima la evolución del Índice de Fusarium (**IF**) a lo largo del PSI (Moschini *et al.*, 2002 b):

$$\mathbf{IF = incidencia\% \times severidad\%/100}$$

a) Progreso diario del % de espigas con anteras expuestas (%EspAnt) o incidencia (I%):

Se evaluó la evolución de la antesis (%EspAnt) en un lote de INTA Castelar sembrado con la variedad de trigo Klein Volcán en el año 2000. Para ello se ajustó una función polinómica entre el logit de la proporción de espigas con anteras (EspAnt, con valores de 0 a 1) y el tiempo dado en grados día (GD) que surge de acumular los valores totales de temperatura media diaria \geq a 12°C):

$$\mathbf{LogitAnt = -6,765052912 + 0,136395967 \text{ GD} - 0,000694621 \text{ GD}^2 + 0,000001384 \text{ GD}^3 - 0,000000001 \text{ GD}^4} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

LogitAnt es el logaritmo natural de (EspAnt / 1 - EspAnt).

El %EspAnt se obtiene resolviendo: $(\text{Exp}(\text{LogitAnt}) / (1 + \text{Exp}(\text{LogitAnt}))) * 100$, siendo Exp la función exponencial de base e, o sea e^{LogitAnt}

b) Cálculo de la severidad predicha (SevP%):

En cámaras de ambiente controlado, Andersen (1948) estableció los % de infección (Sev%) en espigas de trigo inoculadas con conidios de *F. graminearum* con duraciones de mojado (DM) de 18 hs a 72 hs y a temperaturas (T) de 15°C , 20°C , 25°C y 30°C . A los valores tabulados se ajustó una función polinómica:

$$\mathbf{LogitSev = 38,77166158 - 0,53815698 \text{ DM} - 6,02985565 \text{ T} + 0,26849793 \text{ T}^2 - 0,00396097 \text{ T}^3 + 0,04990941 \text{ IT} - 0,00092343 \text{ IT}^2} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

LogitSev: logaritmo natural de (Sev/1 - Sev)

T: temperatura

IT = T * DM

IT² = T² * DM.

La severidad predicha (SevP%) es:

$$\mathbf{SevP\% = \text{Exp}(\text{LogitSev}) / (1 + \text{Exp}(\text{LogitSev})) * 100}$$

siendo Exp la función exponencial de base e, o sea e^{LogitSev} .

Simulación del mojado de espiga combinando ocurrencia de precipitación con HR: para utilizar la Ec. 3 se establecieron reglas de equivalencias para definir las DM y T medias en los lapsos de mojado, a partir de los registros diarios de Pr, Tx, Tn, Tdy HR, de los observatorios de Pergamino y Marcos Juárez. A lo largo del PSI, es decir el lapso con disponibilidad de espigas con anteras, se definió que:

- 1 día con Pr ($\geq 0,2\text{mm}$) y $\text{HR} \geq 81\%$ equivale a una $\text{DM}=24\text{h}$;
- 2 días consecutivos con Pr y $\text{HR} \geq 81\%$ equivalen a una $\text{DM}=48\text{h}$;
- 3 días con Pr y $\text{HR} \geq 81\%$ equivalen a una $\text{DM}=72\text{h}$, siendo la máxima DM que se analiza.

Si a DM de 24 y 48h:

le preceden Pr y $\text{HR} \leq 77\%$ o suceden $\text{HR} > 77\%$, se agregan 3h de mojado.

le preceden Pr y $\text{HR} > 77\%$ o suceden $\text{HR} \leq 81\%$ se agregan 6h de mojado.

La temperatura en los períodos de mojado resulta del promediar las Td diarias, ponderadas por las horas de mojado de cada día involucrado. Con $\text{DM} < 48\text{h}$ y $T < 15^\circ\text{C}$ se considera 90% del valor del índice de Fusarium calculado para $\text{DM}=48\text{h}$. Moschini *et al.*, (2012 a) fijaron un umbral superior de Td para los días con registro de precipitación que inician un evento infectivo: si $T_d > 20^\circ\text{C}$ entonces $T_d = 20^\circ\text{C}$.

c) Índice de Fusarium predicho (IFP%)

Se suman los productos $(\% \text{EspAnt} * \text{SevP}\%) / 100$ calculados para los lapsos de mojado:

$$\text{IFP}\% = \sum_1^n (\% \text{EspAnt} * \text{SevP}\%) / 100,$$

Siendo:

n: número de períodos de mojado registrados en el PSI (inicio: 4 días previos a plena espigazón; fin: al acumular 530 grados día sobre 12°C en el centro-norte y 450 grados día sobre 10°C en el sur de la región pampeana (Moschini *et al.*, 2004; Carranza *et al.*, 2007).

Si bien la FET es una enfermedad monocíclica (inóculo inicial: ascosporas del hongo provenientes de restos culturales), la severidad acumulada final resulta de infecciones múltiples ocurridas a partir de varios episodios de inoculación durante el PCI del trigo. Las infecciones establecidas no pueden ser revertidas con los fungicidas actuales, razón por la cual, las aplicaciones deben realizarse en forma preventiva, antes que ocurran, o semi-preventivas, a los 2 a 3 días posteriores al evento infectivo como máximo (Annone, 2003). Las ecuaciones predictivas de la incidencia de la FET, además de no estimar la severidad de la FET, tienen limitaciones para establecer paso a paso la evolución de la epidemia y evaluar la intensidad de cada evento infectivo. No obstante, en el sur de la región pampeana, González Montaner (2004) explicó que se adoptan decisiones de manejo sanitario del trigo al verificarse al menos dos eventos infectivos o períodos de mojado de dos días definidos por la ecuación 1 (PMoj), complementado con valores promedio de humedad relativa, en los 10 días previos a antesis, superiores a 70% y 80% para trigo candeal y pan respectivamente. En Uruguay, Mazzilli *et al.*, (2011) asumieron el criterio de no aplicar fungicidas hasta que ocurran dos eventos infectivos definidos por PMoj de Ec. 1. De esta forma se evitó el control químico en 22 de las 28 fechas de floración analizadas entre 2003 y 2006, sin generar diferencias en los niveles de infección con relación al control preventivo a inicios de floración.

En el sur de Brasil la ecuación 1 se utilizó para zonificar el riesgo de la FET, con el objeto de reconocer fechas de espigazón y regiones más favorables para la ocurrencia de epidemias (Zoldan, 2008).

El sistema de pronóstico fundamental-empírico, a diferencia del empírico, puede cuantificar la evolución del proceso múltiple de infección (evento por evento). Para el lapso previo a cada evento infectivo, se esclarece la potencial acción sobre el Índice de Fusarium de una situación meteorológica pronosticada. Post inoculación, pero antes de la visualización de síntomas, se podrá realizar un control químico inmediato en función de la intensidad del último evento infectivo analizado. Sobre esta base, Martínez *et al.*, (2012) desarrollaron y validaron un nuevo sistema predictivo del índice de Fusarium utilizando información generada en ambiente controlado, con inoculaciones de conidios de *F. graminearum* provenientes de cepas del sur de la región pampeana.

3-1-1 Aplicaciones

Estimación de la distribución espacial de la incidencia de la FET usando información terrena y de sensores remotos

- Distribución espacial de la incidencia de la FET usando datos terrenos

Para la estimación de la incidencia de la FET durante la campaña 2012/13 se utilizó la ecuación 1 y sus variantes de mejor ajuste para su uso en sectores del Sur de la región pampeana (información meteorológica diaria de 37 estaciones SMN-INTA). Para correr los modelos se especificó una fecha de plena espigazón media, dada por el día en el que se alcanza una acumulación térmica de 1320 grados día ($T_{media} \text{ base}=0^{\circ}\text{C}$), a partir del 1 de julio. La Figura 4 permite visualizar niveles epidémicos muy severos en el cuadrante NE de la región pampeana. Incidencias de la FET de hasta 100% se concentraron en el centro-oeste de Entre Ríos, sectores de Santa Fé (centro en Oliveros) y el área ribereña del extremo NE de Buenos Aires (San Pedro). En alguno de estos sitios se registró una frecuencia muy alta de períodos de mojado en la espiga (días con precipitación y alta humedad), representada en la variable PMoj. Incidencias de la FET moderadas a ligeras (valores <45%) se estimaron para el cuadrante NO de la provincia de Buenos Aires. En todo el sector triguero del sur de la provincia de Buenos Aires y SE de La Pampa, se estimó un nivel de incidencia de la FET ligero a nulo (valores de incidencia <20%). Mayoritariamente no se registró o solo ocurrió un solo evento infectivo, identificado con la variable PMoj (lapso: fin de octubre-noviembre). Solo en sectores muy cercanos a la costa, como Mar del Plata, se estimaron incidencias de la FET entre 15 y 25 %, con ocurrencia de 3 períodos de mojado. Esta información está disponible antes de la cosecha, aportando elementos útiles para molinos harineros y acopiadores, al momento de tomar decisiones sobre estrategias de manejo de la producción granaria, a la cual la FET afecta en cantidad y calidad (micotoxinas asociadas como el deoxinivalenol)

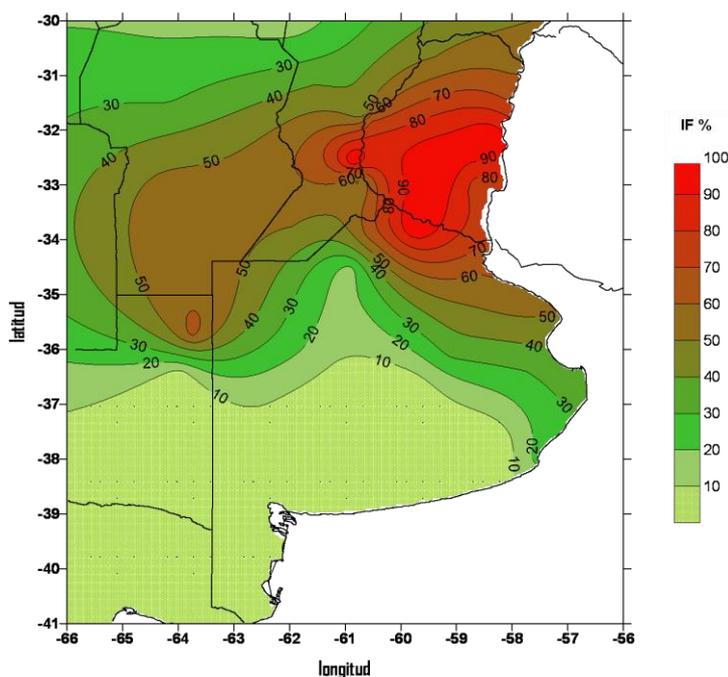


Figura 4. Distribución espacial de la incidencia de la FET. Campaña 2012/2013

-Distribución espacial de la incidencia de la FET usando datos satelitales y terrenos

Los niveles de enfermedad predichos por modelos en base a variables ambientales brindan usualmente una información puntual, correspondiente a la estación meteorológica cuyos datos alimentan al sistema de pronóstico. Para generar mapas relativos a la distribución de la enfermedad, aquellas estimaciones puntuales necesitan ser llevadas a un área extensa a través de métodos de interpolación. En consecuencia, los valores predichos en sectores donde no se dispone de información de estaciones meteorológicas, contienen imprecisiones adicionales. Esto es claramente observado en áreas donde la red de estaciones meteorológicas es dispersa y con distribución irregular. Para mejorar la distribución espacial de la incidencia de la FET en la región pampeana, Sepulcri (2010) y Sepulcri *et al.* (2010) incluyeron datos satelitales en el cálculo de la incidencia de la enfermedad por medio de la ecuación 1 (enfoque empírico). Para la campaña triguera 2007/2008, la distribución espacial de los valores predichos por el modelo usando sólo información de la red terrena de estaciones meteorológicas (Figura 5 a) fue comparada con la resultante de usar información terrena y satelital. En primer lugar, la incidencia de la FET por la ecuación 1 fue estimada usando datos de ocurrencia de precipitación del satélite Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM, producto 3B42), previamente testado con registros pluviométricos (precisión: 85%), combinado con información interpolada de temperatura y humedad relativa de estaciones meteorológicas (Figura 5 b). El producto 3B42 provee estimaciones de precipitación cada 3 h con una resolución espacial de 0,25°. Finalmente, para estimar la incidencia de la FET se usaron datos de temperatura obtenidos de una zonificación climática basada en imágenes NOAA-AVHRR, junto a estimadores satelitales de precipitación (TRMM) y de humedad relativa interpolados de estación (Figura 5 c). Evaluaciones con datos de campo indicaron que cuando la ecuación 1 utilizó información satelital, la incidencia de la FET fue representada de un modo confiable, principalmente en áreas con pocas estaciones meteorológicas terrenas.

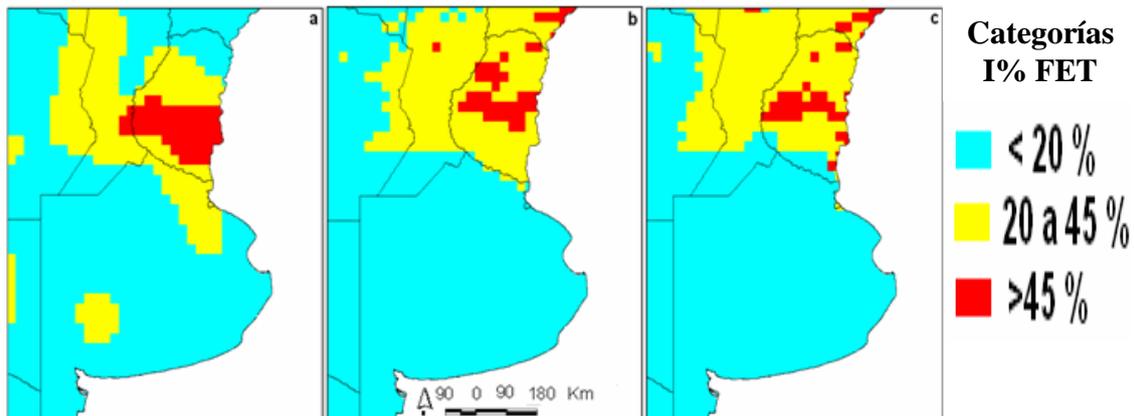


Figura 5. Distribución de la incidencia de la FET estimada mediante la ecuación 1 (a, b y c: distinto origen de la información meteorológica) en la región pampeana. Campaña 2007/2008

Situaciones sinópticas asociadas a epidemias de la FET

Moschini (2011) caracterizó para Paraná, Pergamino y Balcarce el campo medio de circulación atmosférica asociado a infecciones severas y ligeras de la FET (severidad estimada por Ec. 3, para el período 1971-2006), utilizando las alturas geopotenciales de 1000 hPa. La altura geopotencial (hgp) representa la distancia desde el nivel del mar hasta cierto nivel isobárico, en este caso 1000 hPa.

El tipo sinóptico más frecuente ligado a eventos severos en Paraná-Pergamino (Figura 6, izquierda) se caracterizó por la fuerte actividad del anticiclón Atlántico, que permitió el ingreso de aire cálido-húmedo del N-NE sobre el centro-norte argentino, dominado por actividad ciclónica (75 hPa de hgp en Paraná-Pergamino). En Balcarce, los ataques severos de la FET coincidieron con un desarrollo ciclónico en el sur bonaerense y una fuerte anomalía negativa de hgp de 1000 hPa cubriendo la provincia de Bs As. En el tipo sinóptico asociado a eventos ligeros (Figura 6, derecha) el anticiclón Atlántico está muy debilitado, por ello es limitado el ingreso de aire húmedo del norte. La muy fuerte circulación del anticiclón del Pacífico empuja rápidamente el ciclón continental hacia el norte de Argentina. Este proceso podría explicar la ocurrencia de cortos períodos de mojado, originados por precipitación, asociados a eventos infectivos ligeros de la FET.

Pronósticos estacionales de niveles de incidencia de la FET

Mediante el ajuste de modelos logísticos, se cuantificó el efecto de numerosos índices correspondientes a fenómenos de gran escala espacial (hemisférica) sobre la probabilidad de ocurrencia de niveles de incidencia de la FET, determinados por medio de la ecuación 1, en áreas de similar variación temporal de la enfermedad de la región pampeana (Moschini, 2011). Los predictores meteorológicos se procesaron en lapsos que anteceden al período susceptible para la infección en el trigo (espigas con anteras expuestas) y/o control químico de la FET.

En el noreste y centro-este de la región pampeana, los niveles más altos de enfermedad se esperarían con valores más elevados del índice MAS (Modo Anular del Hemisferio Sur u Oscilación Antártica) en agosto, y con dominancia de circulación meridional norte-noreste en setiembre.

En el sur de la región pampeana, el IOS (índice de Oscilación del Sur) realiza un aporte significativo para explicar la variabilidad en los niveles de enfermedad. El mejor

modelo para el área costera clasificó correctamente las epifitias de 1976, 1977, 1985 y 2001, que afectaron a los trigos fideos.

Moschini *et al.* (2008 a) analizaron en Paraná y Balcarce las anomalías anuales de incidencia de la FET respecto a la media de la serie 1971-2006. En Paraná sólo 3 de 12 años El Niño superaron a la media de la enfermedad y 7 de 11 años La Niña resultaron con anomalía negativa. En Balcarce la tendencia fue firme en el sentido de presentar anomalías positivas en años El Niño (9 de 12 años) y negativas en años La Niña (9 de 11 años). El efecto estimulante de una Fase El Niño sobre el patosistema se incrementó en Balcarce, donde la variable hídrica de la ecuación 1 se calcula en noviembre.

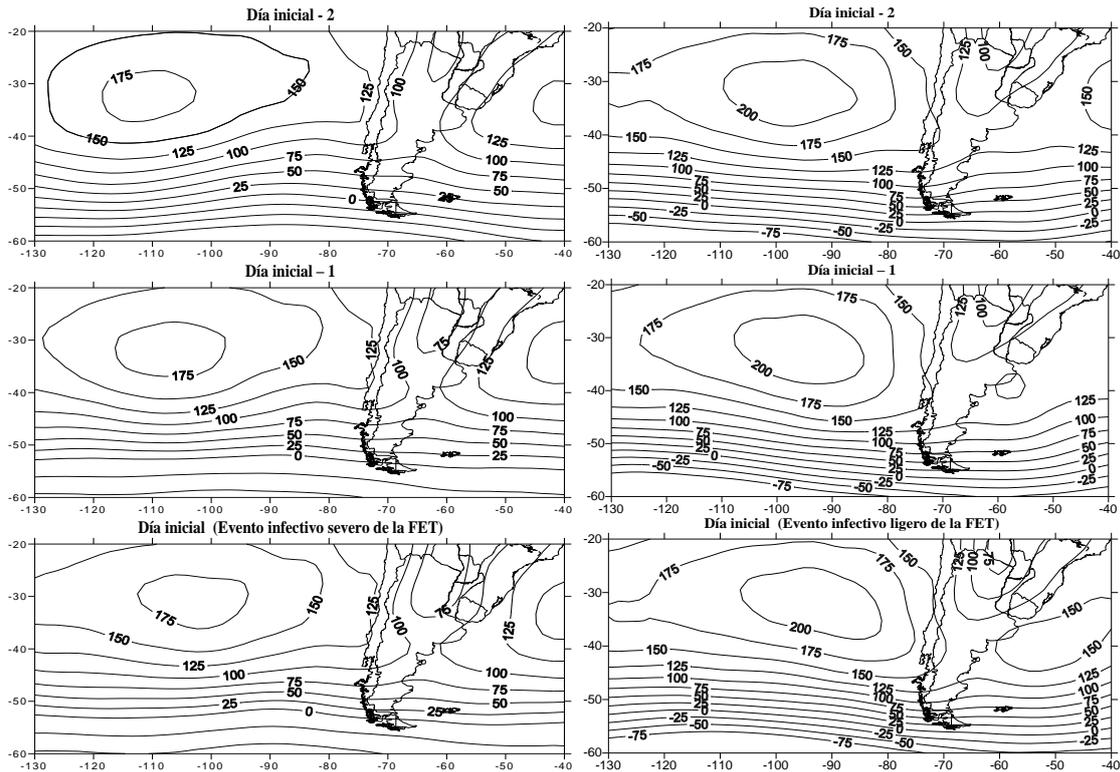


Figura 6: Tipo sinóptico medio (altura geopotencial para 1000 hPa) del día inicial y de los dos previos para eventos infectivos severos (izquierda) y ligeros (derecha) de la FET en Pergamino.

Apoyo al control químico: sistema de pronóstico del grado de riesgo de la FET

La FET afecta tanto al rendimiento y calidad de la producción granaria como a la salud humana y animal por acción de las micotoxinas asociadas. Las prácticas de control incluyen el uso de fungicidas cuyas aplicaciones pueden realizarse como máximo 2-3 días posteriores al evento infectivo. El uso combinado de sistemas de pronóstico de la FET y de pronósticos meteorológicos específicos puede ayudar a establecer la ocurrencia de eventos infectivos severos en tiempo real y/o anticipadamente. Los estudios en la escala sinóptica se conducen con la idea de aportar nuevos elementos a la toma de decisión respecto al control químico. Asimismo, la identificación y cuantificación del efecto de múltiples predictores meteorológicos de escala hemisférica sobre la variabilidad espacio-temporal epidémica es de utilidad para la elaboración de pronósticos estacionales de la intensidad esperada de la FET con antelación al período susceptible del cultivo y/o momento de posible control químico.

Los trabajos precedentes van aportando nuevos elementos para mejorar este sistema de pronóstico del grado de riesgo de la FET, que se viene operando desde la campaña 2005/06. Tres veces por semana se reciben los registros meteorológicos diarios de estaciones del SMN y del INTA de la región pampeana para tres subregiones: Norte, Centro y Sur, con los cuales se corren los modelos predictivos (Ecuación 9 y sistema fundamental-empírico), fijando una fecha de espigazón media. Además se elabora un pronóstico meteorológico específico para la enfermedad. Estos elementos permiten establecer en cada estación meteorológica el grado de riesgo de la FET, categorizarlo en alto, moderado o bajo y mapearlo. Los mapas y comentarios son volcados en la página del Instituto de Clima y Agua (<http://climayagua.inta.gob.ar>).

3-2 Royas de la Hoja

La Roya de la hoja, causada por el hongo *Puccinia triticina* es una enfermedad que se observa cada año en la región pampeana, con carácter de endémica en el centro-norte. Modelos desarrollados sobre la base de factores meteorológicos han sido reportados en la literatura para explicar la ocurrencia de la roya de la hoja en trigo (Subba Rao *et al.*, 1990). Chester (1943) resaltó la importancia de la temperatura y la precipitación invernal para la predicción de la severidad de la roya en Oklahoma. Moschini y Fortugno (1989) encontraron que la acumulación térmica de temperaturas medias diarias mayores a 10°C y las horas de rocío en agosto, explicaron el 90% de la variación de la severidad máxima anual media en Castelar (Argentina)

En Pergamino, Moschini y Pérez (1999) desarrollaron un modelo predictivo de la severidad media máxima de la roya (Sev%) basado en variables ambientales y genéticas, para trigos que emergen en junio-julio (según los autores, la asociación entre variables ambientales y la severidad de la roya de la hoja no se observó claramente en trigos con emergencias tardía: agosto):

$$\text{Sev\%} = 4,42 + 0,61 \text{ GD} + 0,57 \text{ DHR} - 30,01 \text{ IR} \quad R^2 = 0,88 \quad \text{Ec. 4}$$

El valor 4,42 es la ordenada de origen de la ecuación de regresión. Los valores 0,61, 0,57 y 30,01 son las pendientes de las variables que a continuación se describen:

GD: grados-día que diariamente se acumulan, si HR>49%, se suman los residuales de Td>12°C hasta 18°C, pero si Td>18°C se considera Td=18°C;

DHR: se cuentan los días totales sin lluvia (Pr≤0,2mm) y HR>70%;

IR: índice de resistencia, proporción de cultivares resistentes sembrados anualmente (resistencia aumenta de 0 a 1).

El PSI en el cual se calculan las variables se extiende desde el 16/8 hasta acumular 475 grados día considerando una Tdb=0°C, el final del PSI oscila entre el 15/9 y el 25/9.

Ajustes de la ecuación 4 para M. Juárez y Paraná (Moschini, 2002 c; Moschini, 2003).

En M. Juárez la variable GD fue definida como los grados día totales acumulados de Tmed diarias>12°C hasta 20°C (en c/día de acumulación la HR es >59%) y en Paraná como los grados día totales acumulados de Tmed diarias> 12°C hasta 18°C (en c/día de acumulación la HR > 59%). La variable DHR se definió como el total de días sin precipitación con HR >85% y >76% para Marcos Juárez y Paraná respectivamente. El PSI para Marcos Juárez fue: 11/8 hasta acumular 495 grados día y en Paraná desde el 2 de agosto hasta acumular 485 grados día.

3-2-1 Aplicaciones

- *Pronósticos estacionales: relación entre la enfermedad y el fenómeno ENOS*

Moschini *et al.*, (2012 b) estimaron la ocurrencia de la roya de la hoja mediante el uso de la ecuación 4 y su ajuste para Paraná, para la serie 1971-2012. La severidad media de la enfermedad se relacionó con las tres fases del fenómeno *El Niño Oscilación del Sur (ENOS)* (índice NOAA oceánico): El Niño (anomalía cálida), La Niña (anomalía fría) y Neutra. Se construyeron gráficos donde cada valor de severidad anual fue comparado con la mediana histórica en Paraná. En la figura 7 se pueden observar los desvíos anuales de severidad de la roya de la hoja con respecto a la mediana (37,58%), para la localidad de Paraná. Del total de años con fase El Niño en la serie histórica (13), ocho fueron años con severidad de la roya de la hoja mayor a la mediana, por el contrario, del total de años La Niña (14), ocho correspondieron a años con severidad de la enfermedad inferior a la mediana histórica. Entre los años que superaron en 10% el desvío con respecto a la mediana (10), cuatro corresponden a años El Niño, dos a años La Niña y cuatro a neutros.

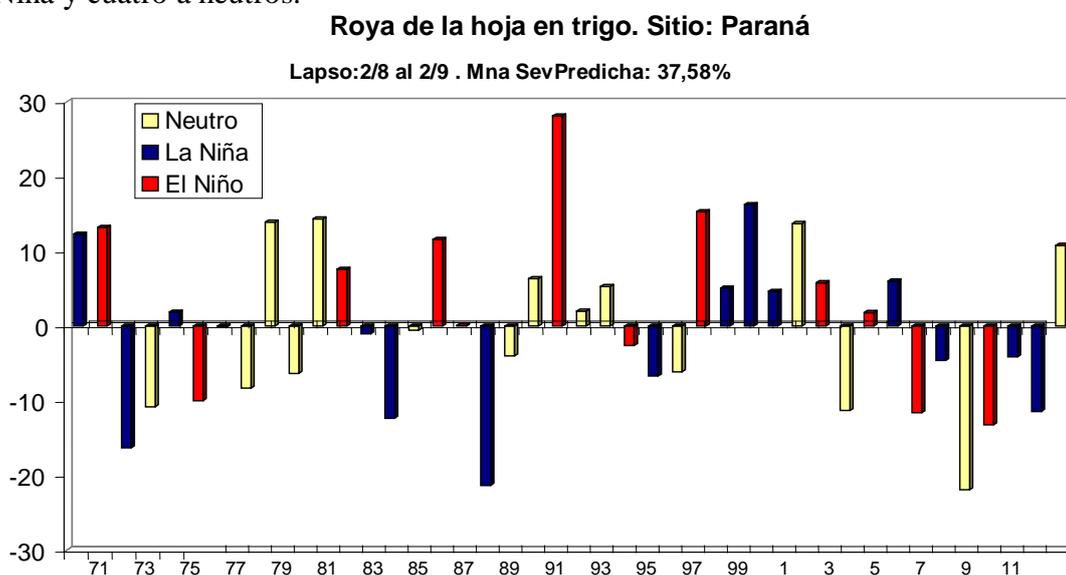


Figura 7. Desvíos de severidad predicha de roya de la hoja con respecto a la mediana histórica (37,58%) de la serie 1971-2012, para la localidad de Paraná. Barras rojas: años con fase El Niño; barras azules: años La Niña y barras amarillas: años Neutros.

- *Alerta temprana sobre la ocurrencia de condiciones ambientales propicias para la multiplicación del inóculo*

La variable térmica (GD) de la ecuación 4, procesada sobre el fin de invierno, (comprende el macollaje-principios de encañazón en el norte), es crucial para explicar la variación en la severidad máxima media de la roya de la hoja. Las pérdidas originadas por esta enfermedad policíclica aumentan con infecciones producidas en estadios tempranos del trigo. Corridas anuales de las ecuaciones predictivas descriptas y su comparación con la mediana de la serie histórica, podrían fundamentar la emisión de alarmas regionales tempranas sobre la ocurrencia de condiciones ambientales propicias para la multiplicación del inóculo y así aconsejar una vigilancia intensa de los lotes de trigo. Ante posibles quiebres de resistencia de los cultivares sembrados se estará a tiempo para implementar medidas de control químico en hoja bandera. En la campaña 2012/13, con una severidad media predicha de 48.4%, se superó en 10,8% a la mediana histórica. El alerta temprano de condiciones ambientales favorables coincidieron con desarrollos epifíticos de la roya de la hoja observados en cultivares susceptibles en

Gdor. Mansilla (Entre Ríos) (Velázquez *et al.*, 2013) No obstante, los niveles de severidad predichos en esta campaña fueron inferiores a los estimados en 1991 y 1997 (Fase El Niño fuertes), con severidades de 65,6 y 52,8% respectivamente (Figura 7).

3-3 Cancrosis de los citrus

La cancrrosis de los citrus, causada por la bacteria *Xanthomonas citri* pv. *citri* (Xcc), es una enfermedad cuarentenaria y endémica en la región nordeste de Argentina, en la cual prevalecen condiciones meteorológicas favorables para su ocurrencia. Todos los tipos de citrus son susceptibles, pero existen variaciones extremas entre especies y cultivares, siendo el pomelo (*Citrus paradisi*) la más susceptible. Algunas de las prácticas de manejo de la enfermedad recomendadas son el control químico con bactericidas conteniendo cobre, el uso de cortinas rompeviento y la poda de tejido vegetal afectado (Canteros, 1998; Canteros 2006; Canteros 2009). Xcc ingresa a través de los estomas o heridas en el tejido joven de hojas, frutos y brotes. Tejidos foliares en expansión (hojas jóvenes) son más susceptibles que hojas maduras. Luego de la infección la bacteria se multiplica para formar la clásica lesión corchosa conocida como cancro, de la cual exudan bacterias cuando son mojadas por rocío, lluvia o riego. El inóculo bacteriano es fácilmente dispersado con el salpicado del agua de lluvia, estando este proceso muy favorecido por el viento (Bock *et al.*, 2005).

Se presenta la ecuación de regresión lineal múltiple desarrollada con 14 observaciones anuales de la bacteriosis para pomelo en un lote experimental de la EEA INTA Bella Vista (Figura 8 izquierda)

$$\text{Int\%} = 1,0375 + 6,1094 \text{ DPr} - 0,4626 \text{ DTxn} \quad R^2 = 0,857 \quad \text{Ec 5}$$

Donde

Int% intensidad de la cancrrosis en media estación (no considera distancia a cortina)

DPr: total de días con ocurrencia de precipitación >12 mm

DTxn: al total de días con registros de temperaturas máximas > 31,5°C se suman los que registran temperaturas mínimas <12°C.

DPr se calcula desde que se acumulan 372 grados día (Tb=12,5°C) hasta 960 grados día y la térmica desde 930 a 1175 grados día. El inicio de la acumulación es el 10/7.



Figura 8. Plantación experimental implantada en la EEA INTA Bella Vista en 1991, con la cortina rompeviento natural en el Sur (izquierda). Misma plantación con anemómetros tipo Robinson (derecha)

3-3-1 Aplicaciones

Riesgo climático de la región NEA respecto a enfermedades de trigo
(Moschini, 2007 b; Moschini *et al*, 2008 b)

Registros meteorológicos diarios de Tx y Tn y Pr de 28 estaciones meteorológicas (SMN-INTA) del NEA para la serie 1971-2007, se dispusieron para este estudio. Por estación y año de la serie, se estimó la intensidad de la cancrrosis en media estación mediante la ecuación 5. Seguidamente se calculó y se volcó en un mapa el % de años con ocurrencia de intensidades >43,5% (percentil 70% de los 16 valores de intensidad observados) (Figura 9). Casi en la mitad de los años se esperarían epidemias severas en las áreas de producción citrícola de Bella Vista y Concordia. Hacia Misiones las condiciones climáticas (más de 6 ataques severos en 10 años) son más favorables para la ocurrencia de la enfermedad. Por esta razón en el área de Montecarlo (Misiones) se difunde la plantación de especies más resistentes a la cancrrosis como la mandarina y naranja. Hacia el sur el riesgo climático decrece gradualmente (2 ataques severos en 10 años en San Pedro).

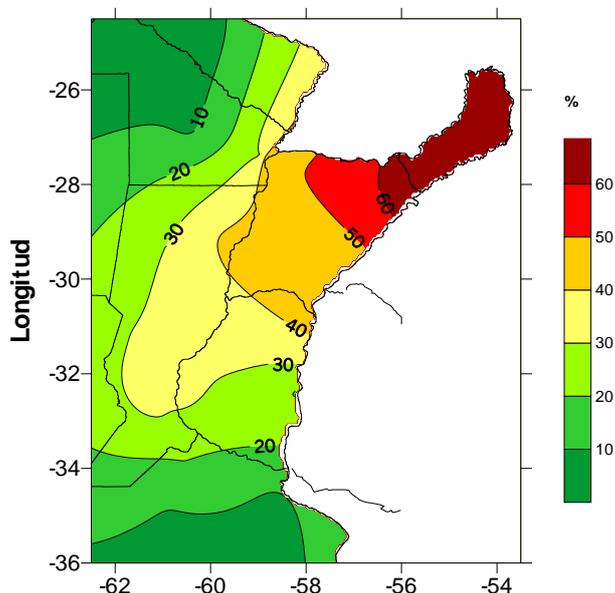


Figura 9: % años con ocurrencia de niveles severos de la cancrrosis de los citrus (Ec 5)

Análisis retrospectivo del impacto del cambio climático (CC) sobre el patosistema
(Moschini, 2007 b; Moschini *et al*, 2008 b)

El incremento en la concentración de gases efecto invernadero (GEI) antropogénico ha afectado el clima del planeta en el siglo XX y continuará modificándolo en el XXI. El aumento sostenido de los GEI en la atmósfera tiene su origen en la industrialización, deforestación, mayor población mundial y especialmente en la quema de combustibles fósiles. Hay una estrecha relación entre la concentración de GEI y la temperatura global. El IPCC en su reporte 2007 da un rango de calentamiento global hacia el final del siglo XXI de 1,1°C a 6,4°C. La predicción del impacto del CC sobre patosistemas puede hacerse mediante un análisis retrospectivo, que identifica huellas relacionadas al CC en registros de enfermedades de larga duración, o mediante el uso de modelos matemáticos o estadísticos. Para la mayoría de los patógenos no se disponen de series de tiempo conteniendo observaciones estandarizadas de enfermedades. En casos que se dispongan, las tendencias son confundidas por cambios en el manejo y factores biológicos. Los desafíos que deben enfrentarse cuando se usan modelos predictivos de enfermedades para evaluar impacto,

se originan en la incertidumbre de las variables de entrada (originadas en modelos climáticos de circulación general: MCCG), la presencia de no linealidades y umbrales definiendo las respuestas biológicas del patógeno al ambiente y la alta probabilidad de adaptación genética al cambio climático (Scherf, 2004). Procedimientos que reduzcan la escala son necesarios para trasladar las proyecciones de los MCCG (gran escala, baja resolución) a una escala temporal y espacial compatible con los procesos fisiológicos e interacciones biológicas relevantes en la dinámica de plagas. Quizás lo prioritario sea desarrollar soluciones a las dificultades asociadas con la escala y extrapolación de resultados experimentales y de modelos (cámaras de crecimiento o parcelas de campo a escalas regional y global). Establecidas estas limitaciones, en Monte Caseros se realizó un análisis retrospectivo del impacto del CC, utilizando series meteorológicas largas para correr la ecuación 5 para pomelo. De acuerdo a la Figura 10, se observó una leve y no significativa pendiente positiva (0,15) de los niveles anuales de la enfermedad a través de los años analizados. El pequeño predominio de anomalías positivas en los últimos 38 años, podría explicarse por la mayor frecuencia de eventos Niño (más de 3 eventos) registrados en este lapso en relación al período inicial (1931-69).

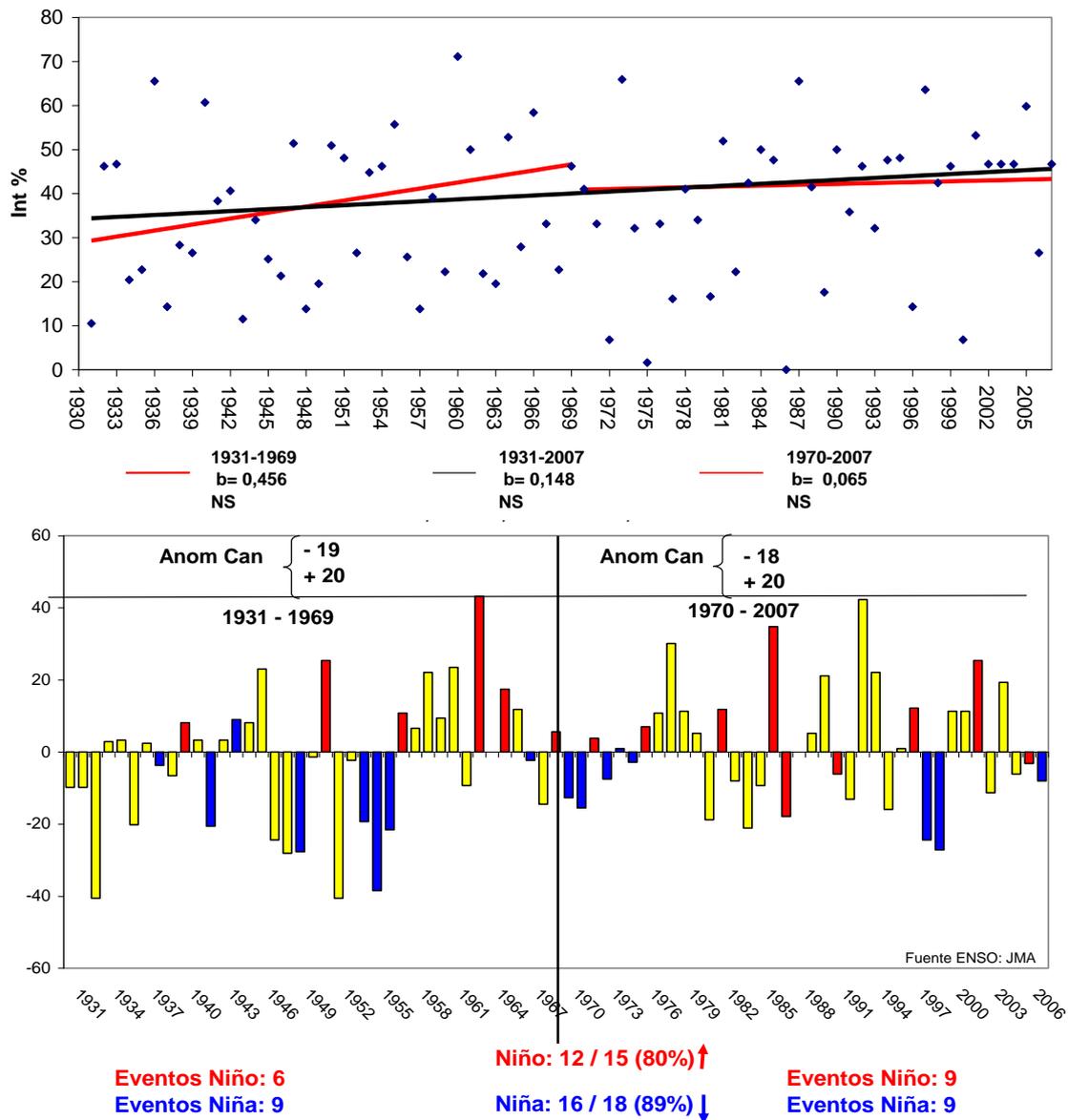


Figura 10: anomalías (Int% - 40,6%) y tendencias de valores anuales de la cancrrosis estimados por ecuación 5 en pomelo (1931-2007) en Monte Caseros (Corrientes)

Análisis del efecto de las condiciones meteorológicas del área citrícola de España (Cataluña, comunidad Valenciana, Murcia y Andalucía) sobre la cancrrosis

(Moschini *et al.*, 2010)

Observaciones (1991-2008, N=18) de intensidad de la cancrrosis en media estación en pomelo “Red Blush” realizadas en Bella Vista (lote experimental de Figura 8), fueron categorizadas binariamente y en tres categorías, en función de valores umbrales (Moschini *et al.*, 2010). A partir de elementos meteorológicos diarios se construyeron variables regresoras hídricas y térmicas, procesadas a partir de la acumulación, desde el 10/7, de 372 grados día (Tb=12,5 °C) hasta 960 GD y desde 930 a 1175 GD, respectivamente. Los mejores modelos de regresión logística de respuesta binaria y ordinal incluyeron como variable meteorológica a la interacción (producto) entre DPr (días totales con precipitación>12 mm) y DPTxn (días con temperatura máxima<= 28°C y temperatura mínima>=14°C), obteniendo precisiones de predicción de 94,4 y 83,3%, respectivamente. Se detalla la ecuación de respuesta binaria (epidemia severa: IO>=42%, moderada a nula: IO<42%):

$$\ln(\text{PrS}/1-\text{PrS}) = -6,1095 + 0,1265 * \text{It2} \quad \text{Precisión predicción: 94,4\%} \quad \text{Ec.6}$$

Donde resolviendo la expresión $\text{Exp}(\ln(\text{PrS}/1-\text{PrS})) / (1 + \text{Exp}(\ln(\text{PrS}/1-\text{PrS})))$ se obtiene el valor de PrS (probabilidad de observar una tasa epidémica severa (S)). Ln es el logaritmo natural. PrMod-Nulo=1-PrS, siendo PrMod-Nulo la probabilidad de observar una epidemia moderada a nula (Mod-Nula). It2= DPr*DPTxn, siendo DPr: días totales con precipitación >12 mm y DPTxn: total de días con Tx<= 28°C y Tn >=14°C.

Ambos modelos logísticos fueron corridos en 14 sitios de España y en Bella Vista (10/1: inicio de acumulación de grados día en España), para la serie 1980-2008. La variable DPr resultó ser la más limitante para la expresión de la bacteriosis en el sector citrícola español, alcanzando un valor mediana de cero en las zonas de alta producción (comunidad Valenciana, Murcia y Andalucía). El factor térmico fue en cambio claramente favorable para la evolución de la enfermedad. Ambas variables interaccionando (It2) hicieron decrecer predominantemente a cero la probabilidad de que la enfermedad se exprese en niveles moderados a severos en España, marcando claras diferencias con el 51,7% de los años en Bella Vista (Figura 11)

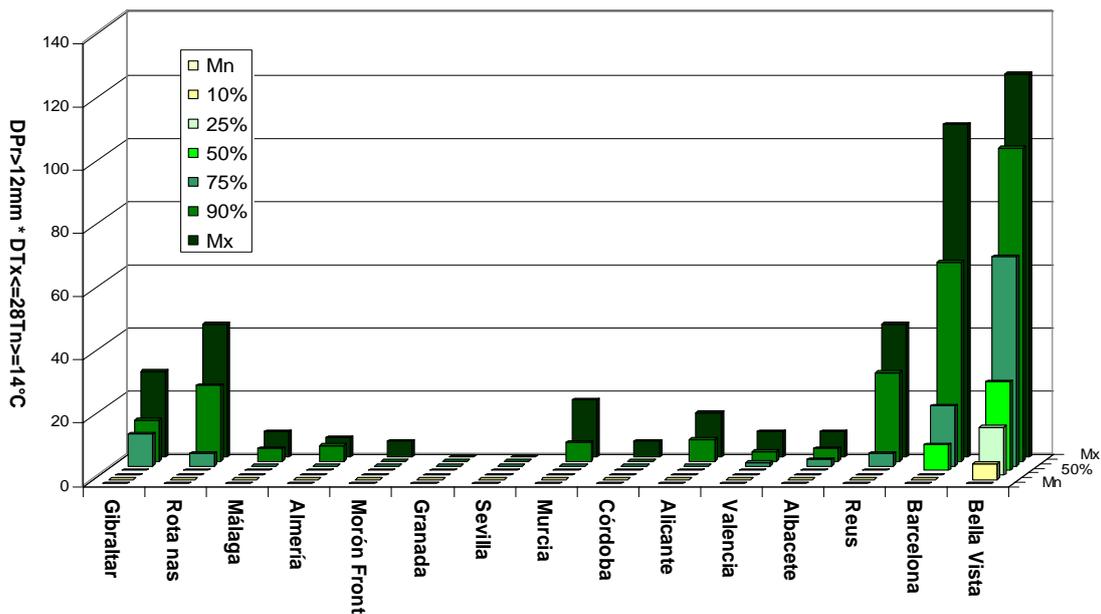


Figura 11. Valores que alcanza la componente interactiva It2 (producto de DPr por DPTxn) para los siguientes percentiles: 0 (Mn), 10, 25, 50, 75, 90 y 100 % (Mx).

Cuantificación del efecto ambiental sobre la intensidad de la cancrrosis de los cítricos a distancias crecientes de cortina rompeviento en Bella Vista (Moschini et al., 2013)

Se cuantificó el efecto ambiental sobre la intensidad de cancrrosis en media estación en pomelo (Bella Vista), bajo dos escenarios de protección del viento (fuerte y moderada), por su distancia a una cortina rompeviento natural (sur del lote cítrico experimental, Figura 8). Valores medios diarios de velocidad del viento (km h^{-1}), registrados en tres anemómetros tipo Robinson ubicados (2008-2010; $N=277$; Figura 8 derecha) en tres bloques del lote cítrico a crecientes distancias de la cortina rompeviento, se relacionaron (ajuste de ecuaciones de regresión lineal) con los medidos en la estación meteorológica de la EEA INTA Bella Vista (300 m del lote). Para el lapso 1991-2010, mediante dichas ecuaciones se estimó la velocidad diaria del viento para el sector más alejado ($dc=1$; se reduce el viento de estación a la mitad) y más cercano a la cortina ($dc=0$; se reduce a la tercera parte), y se dispusieron de observaciones de intensidad de la cancrrosis (IO%) en media estación en pomelo "Red Blush" en ambos sectores ($N=40$).

Las variables meteorológicas regresoras se calcularon a partir de la acumulación, desde el 10/7, de 372 grados día ($T_b=12,5\text{ }^\circ\text{C}$) hasta 985 grados día. La variable mejor correlacionada (r_k : coeficiente de Kendall Tau-b) con los niveles de cancrrosis (severo: $\text{IO}>45\%$; moderado: $\text{IO}\leq 45$ y $>10,6\%$; ligero: $\text{IO}\leq 10,6\%$), a las dos distancias a la cortina rompeviento, fue DPrV (días con ocurrencia simultánea de precipitación $>12\text{mm}$ y velocidad del viento $>2,6\text{ km.h}^{-1}$; $r_k=0,71$), diferenciándose del $r_k=0,60$ de DPr (días con precipitación $>12\text{mm}$). El modelo logístico integrado por DPrV y DPTxn (días con temperaturas en el intervalo $17-27^\circ\text{C}$) tuvo una precisión de predicción de 90%, requiriendo en este caso de registros de la velocidad del viento en ambos escenarios de manejo del lote.

El siguiente modelo logístico ordinal integrado por DPr y DPTxn (precisión de predicción=82,5%) cuantificó el efecto ambiental en escenarios de fuerte protección del viento ($dc=0$) y moderada ($dc=1$):

$$\text{Ec1} = -15,854 + 1,382 * \text{DPr} + 0,0685 * \text{DPTxn} + 4,4861 * \text{dc} \quad \text{Ec. 7}$$

$$\text{Ec2} = -7,8178 + 1,382 * \text{DPr} + 0,0685 * \text{DPTxn} + 4,4861 * \text{dc}$$

Donde: $\text{Ec1} = \ln(\text{PrS}/1 - \text{PrS})$; $\text{Ec2} = \ln(\text{PrMac}/1 - \text{PrMac})$. Resolviendo la expresión $\text{Exp}(\ln(\text{PrS}/1 - \text{PrS}) / (1 + \text{Exp}(\ln(\text{PrS}/1 - \text{PrS})))$ se obtiene el valor de PrS (probabilidad de observar una nivel epidémico severo (S)). Ln es el logaritmo natural. Resolviendo $\text{Exp}(\ln(\text{PrMac}/1 - \text{PrMac}) / (1 + \text{Exp}(\ln(\text{PrMac}/1 - \text{PrMac})))$ se obtiene PrMac (probabilidad acumulada de ocurrencia de un nivel epidémico igual o mayor al moderado (M)). $\text{PrM} = \text{PrMac} - \text{PrS}$. $rL = 1 - (\text{PrS} + \text{PrM})$ siendo PrL la probabilidad de observar una epidemia ligera a nula (L). **DPr**: días totales con precipitación $>12\text{ mm}$; **DPrV**: días totales con simultánea ocurrencia de precipitación $>12\text{mm}$ y velocidad del viento $>2,6\text{ km h}^{-1}$; **DPTxn**: total de días con $T_x \leq 27^\circ\text{C}$ y $T_n \geq 17^\circ\text{C}$; **dc**: distancia a cortina rompeviento, $dc=0$ (próxima, 19-47m), $dc=1$ (alejada, 89-117m) (Figura 8, derecha).

Este modelo (Ec. 7) corrido en Bella Vista (1971-2010) estimó 12,5 % de años con nivel severo ($\text{IO}>45\%$) de cancrrosis ($dc=0$) contra 40% con $dc=1$. Analizando los 20 años de observaciones de intensidad de cancrrosis en media estación, el % de años con niveles severos de enfermedad fue del 10% y del 35% para escenarios de fuerte (bloque 1) y moderada (bloque 3) protección del viento respectivamente, muy similar al estimado por el modelo en 40 años. Con este modelo, en el período primaveral, podría realizarse el seguimiento de la dinámica diaria de los valores de probabilidad de ocurrencia de los niveles epidémicos analizados y de la principal variable regresora (DPr). De esta forma se podrían dar alarmas de riesgo ambiental para escenarios de

fuerte protección y para sectores de la plantación más desprotegidos de la cortina rompeviento, sustentando la toma de decisión de control químico.

3-4 Sarna de los citrus

(Moschini et al., 2011 b)

La sarna, causada por el hongo *Elsinoe fawcettii* (sarna del naranjo agrio) y *E. australis* (sarna del naranjo dulce), produce verrugas (color marrón) superficiales y deformación en frutos y hojas de especies cítricas. La enfermedad disminuye el valor comercial de la fruta, además de provocar una caída de frutitos pequeños muy afectados. Junto con la cancrrosis y el moteado negro, son las enfermedades más importantes de los citrus en el Litoral argentino, especialmente por el carácter cuarentenario de sus agentes causales.

Observaciones de incidencia de la enfermedad (IO%: porcentaje de frutos afectados) en mandarina Satsuma (*Citrus unshiu* Marc.) se realizaron en lotes experimentales (no tratados con fungicidas) de las EEA INTA Bella Vista (Corrientes) y Montecarlo (Misiones). En el sur se utilizaron observaciones de sarna en lotes comerciales cercanos a Concordia (Entre Ríos) y Mocoretá (Corrientes) Los valores de IO% se categorizaron binariamente en función de valores umbrales: epidemia severa (IO>79%) epidemia moderada a ligera (IO≤79%).

$$\text{LogitPrS} = -3,2227 + 0,00965 * \text{It1} \quad \text{Precisión predicción: 89\%} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde $\text{LogitPrS} = \ln(\text{PrS}/1-\text{PrS})$. Resolviendo la expresión $\text{Exp}(\text{LogitPrS})/(1+\text{Exp}(\text{LogitPrS}))$ se obtienen los valores de PrS (probabilidad de observar un nivel epidémico severo (S)). Ln es el logaritmo natural. $\text{PrMod-Nulo} = 1-(\text{PrS})$ siendo PrMod-Nulo la probabilidad de observar un nivel epidémico moderado a nulo. $\text{It1} = \text{DMojt} * \text{TxM}$, siendo TxM: temperatura máxima media, $\text{DMojt} = \text{DMojPr} + \text{DMojRo}$, donde DMojPr: número de días con registros de Pr>0,2 mm y HR>81 % y DMojRo: días sin Pr (Pr≤0,2 mm) y HR>81 %. Las variables se calculan en el lapso que se inicia al acumular desde el 10 de julio un total de 310 grados día (Tb=12,5 °C) y finaliza cuando se alcanzan 1200 grados día. El inicio del intervalo comienza cuando la plantación se encuentra aproximadamente en pre-floración (fin de agosto-setiembre en Montecarlo y Bella Vista y fin de setiembre-principios de octubre en Mocoretá y Concordia) y finaliza con el fruto cuajado con pocos centímetros de diámetro (diciembre-principios de enero). La fecha media de inicio y fin del lapso donde se calculan las variables meteorológicas fue 5/9-7/12, 17/9-12/12, 23/9-23/12 y 11/10-8/1 para Montecarlo, Bella Vista, Mocoretá y Concordia respectivamente

3-4-1 Aplicaciones

Apoyo a la decisión de control químico

Una estrategia de control racional puede basarse en el uso combinado de sistemas de pronóstico de la sarna de los citrus y de pronósticos meteorológicos específicos para establecer en tiempo real y/o anticipar la ocurrencia de eventos infectivos severos en base a factores ambientales, y de esta forma dar soporte a una estrategia de control químico sustentable por razones ecológica-económicas. En ensayos de control químico de la sarna, realizados en Bella Vista sobre mandarina Satsuma Okitsu (muy susceptible), se recomiendan realizar aplicaciones con fungicidas cuando el 25 % de las flores están abiertas (Agosto-Setiembre), repitiendo a los 7-10 días después de la primera (Canteros, 2000). Por ello, en cada campaña, el valor que van adquiriendo las variables meteorológicas mejor correlacionadas, puede ayudar a decidir el momento de realizar una pulverización con fungicida. El seguimiento de la evolución diaria de los valores de probabilidad de ocurrencia de niveles epidémicos severos y Moderados a Nulos (Ec. 8), junto a la evolución diaria de la principal variable regresora ($\text{DMojt} = \text{DMojPr} + \text{DMojRo}$, donde DMojPr: número de días con registros de Pr>0,2 mm y HR>81 % y DMojRo: días sin Pr (Pr≤0,2 mm) y HR>81 %) fue graficado para Concordia en dos campañas contrastantes (2008/09 y 2009/10). Claramente se observó (Figura 10) buena correspondencia

entre los valores de probabilidad y la evolución de DMOjt, explicando satisfactoriamente la variación de los niveles de incidencia observadas, categorizadas binariamente. Este tipo de seguimiento diario puede realizarse a partir de los últimos estadios vegetativos del cultivo a monitorear, pudiendo de esta forma dar alarmas de riesgo ambiental, sustentando la toma de decisión de control químico. Software amigable de libre disponibilidad se ha elaborado (http://climayagua.inta.gob.ar/modelos_inta) para la carga de los datos meteorológicos, corrida de los modelos y salidas gráficas. Otros componentes del tetraedro epidémico deberán tenerse en cuenta para la decisión de control químico como el comportamiento respecto a la enfermedad de la especie y variedad plantada, disponibilidad de cortinas rompevientos, última aplicación química.

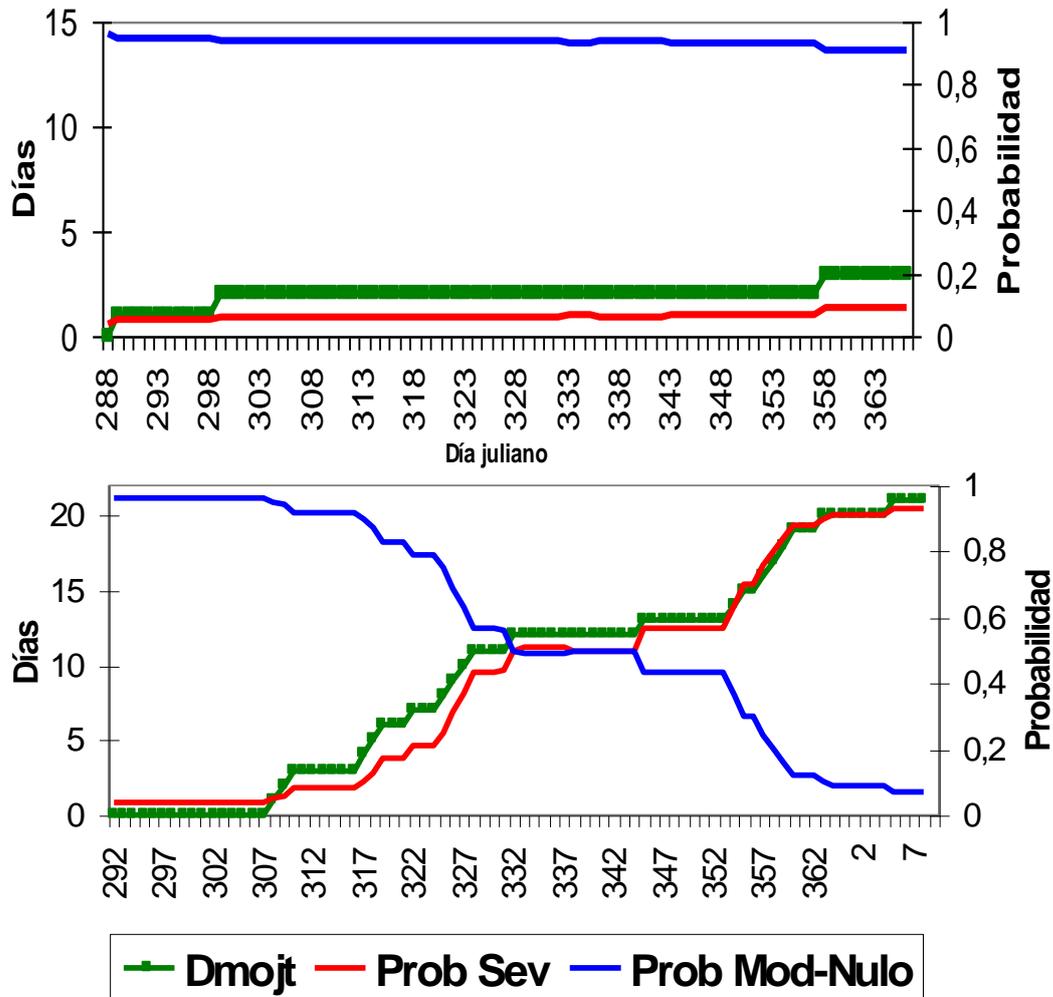


Figura 10. Evolución de las probabilidades de ocurrencia de una incidencia de sarna severa (Prob Sev) y Moderada-Nula (Prob Mod-Nula) (estimadas por Ec 8) y de los valores de la principal variable regresora DMOjt ($DMOjt = DMOjPr + DMOjRo$), para las campañas 2008/2009 (arriba) y 2009/2010 (abajo) (donde DMOjPr: número de días con registros de $Pr > 0,2$ mm y $HR > 81$ % y DMOjRo: días sin Pr ($Pr \leq 0,2$ mm) y $HR > 81$ %).

Bibliografía

Alessandro A.P., 2003. The influence of blocking events on temperature and precipitation in Argentina during the 1990s. Meteorológica Vol 28 N° 1 y 2 (2003) 39-52
 Andersen A.L., 1948. The development of Gibberella zeae headblight of wheat. Phytopathology 38:595-611.

Annone J.G., Kohli M.M. 1996. Principales enfermedades del trigo asociadas con la siembra directa en la Argentina. En: IV Congreso Nacional sw AAPRESID. Trabajos presentados. 27-30 de marzo 1996. V. Giardino, Córdoba, Argentina. Pp:79-90.

Annone J.G., 2003. Particularidades del control químico de la FET. Seminario: problemas asociados a la Fusariosis en trigo y estrategias para su prevención. Bolsa de Cereales de Buenos Aires 3-4 de julio de 2003.

Baker KM, Kirk WW (2007) Comparative analysis of models integrating synoptic forecast data into potato late blight risk estimate systems. *Comp Electron Agric* 57: 23-32

Benizri E., Projetti F. 1992. Mise au point d'un modele de simulation de la rouille brune du blé. *Agronomie* (1992) 12, 97-104.

Bock, C.H., Parker, P.E., Gottwald, T.R., 2005. The effect of simulated wind-driven rain on duration and distance of dispersal of *Xanthomonas axonopodis* pv. *citri* from canker infected citrus trees. *Plant Dis.* 89, 71-80.

Bombelli E.C. 2011 Modelado para la predicción de enfermedades en cultivos de alto valor comercial. Tesis Maestría en Ingeniería en Sistemas de Información. Ftad Regional Buenos Aires Universidad Tecnológica Nacional.

Bombelli E., Moschini R., Wright E.R., López M.V., Fabricio M.C., Barberis G., Rivera M.C. 2013 Modelización matemática con base meteorológica para predicción de epidemias vegetales. IV Congreso de Matemática aplicada, computacional e industrial Univ. Tecnológica Nacional CABA. 15-17 mayo 2013

Bourke. P.M.A.1970. Use of weather information in the prediction of plant disease epiphytotics. In *Plant disease prediction from weather data.* 345-370.

Bruhn J.A., Fry W.E. 1981. Analysis of potato late blight epidemiology by simulation modelling. *Phytopathology* 71:612-616

Camilioni I, Barros V., Escobar G., Di Luca A. 2005. Tendencias en la posición del Anticiclón del Atlántico Sur y su representación por modelos climáticos globales: impactos sobre el estuario del Río de la Plata y océano adyacente. Congremet IX 3 al 7 de octubre de 2005. Buenos Aires Argentina.

Campbell C.L., Madden L.V. 1990. *Introduction to Plant Disease Epidemiology.* John Willes & Sons, NY, 532 pp.

Canteros de Echenique, B.I.; D. Zagory and R. E. Stall. 1985. A medium for cultivation of the B-strain of *Xanthomonas campestris* pv. *citri*, cause of canker B in Argentina and Uruguay. *Plant Disease*, 69, 122-123.

Canteros, B I. 1998. Ecology of endemic citrus canker: seasonal fluctuations of disease intensity. Abstract 3.7.41. 7th Int. Congress Plant Pathol. Edinburgh. Scotland Vol 3 ISPP.

Canteros, B.I. 1999. Enfermedades: Cancrosis, Black Spot y Sarna. Curso de Actualización en Sanidad Citricola, EEA INTA Bella Vista, 1999, pp. 150

Canteros B.I. 2000. Identificación y manejo de enfermedades fúngicas y bacterianas en citrus. EEA INTA Bella Vista. Páginas 32

Canteros B I. 2004. Efecto de la ocurrencia del niño sobre la intensidad de la enfermedad bacteriana canker de los citrus en el Litoral Argentino.

Canteros, B.I. 2006. Management of citrus Canker in Argentina, a review. 2004 Proceedings International Society of Citriculture. Pag 515-523.

Canteros B. I. 2009. Guía para la Identificación y el Manejo de las Enfermedades Fúngicas y Bacterianas en Citrus 2009-2010. Programa de Fortalecimiento de la Citricultura Correntina (INTA, CFI, Pcia Corrientes, SENASA, Corp. Mercado Central Bs As). 1a edición, 94 pag. ISBN 978-987-05-6059-3.

Carmona M.A. 2008. El manejo integrado de las enfermedades del cultivo de trigo. En: Información Técnica de trigo y otros cultivos de invierno, campaña 2008. Publicación Miscelánea N° 109. INTA EEARafaela. Mayo de 2008. Pág. 44-49.

Carmona M.A., Moschini R.C. and Conti H.A. 1997. Meteorological factors influencing the incidence of barley scald and its spatial distribution over the argentine pampas region. *Journal of Plant Pathology* 79 (3):203-209.

Carmona M., Reis E.M., 2001. Sistema de puntuación para la evaluación del potencial de producción del cultivo de trigo. Su utilidad para la aplicación racional y económica de fungicidas. Ed Carmona. 24 pp.

Carmona, M., Moschini, R., Cazenave, G. & Sautua, F. 2010. Relación entre la precipitación registrada en estados reproductivos de la soja y la severidad de *Septoria glycines* y *Cercospora kikuchii*. *Tropical Plant Pathology* 35(2): 71-78.

Carranza M.R., Moschini R.C., Kraan G., Bariffi J.H., 2007. Examination of meteorology-based predictions of Fusarium head blight of wheat grown at two locations in the southern Pampas region of Argentina. *Australasian Plant Pathology* 36:305-308.

- Chester KS, 1943. The decisive influence of late winter weather on wheat leaf rust epiphytotics. *Plant Disease Rep. Suppl.* 143:133-144
- Coakley S.M, Mc Daniel L.R, Shaner G. 1985. Model for predicting severity of *Septoria tritici* blotch on winter Wheat. *Phytopathology* 75:1245-1251.
- Coakley S.M. 1988. Variation in climate and prediction of disease in plants. *Ann. Rev. Phytopathol.* 26: 163-81.
- Damiano F., Moschini R.C., Irurzum A. 2006. Estimación de la incidencia de la fusariosis de la espiga en trigo en la región pampeana usando técnicas de sensoramiento remotos. *Actas XI Reunión Argentina de Agrometeorología. V Congreso Argentino de Agrometeorología La Plata.* 6-8/9/2006.
- De la Campa R, Hooker DC, Miller JD, Schaafsma AW, Hammond B.G. 2005. Modeling effects of environment, insect damage, and Bt genotypes on fumonisin accumulation in maize in Argentina and the Philippines. *Mycopathologia* 159: 539-552.
- De Ruyver R., Velasco L., Rebella C. 2001. Una técnica satelital para estimar precipitación. *Rev. Arg. De Agrometeorología*, 1(2): 35-41.
- De Ruyver R., Bonacic Kresic I., Ojeda D., Moschini R. 2010. Detección de esporas de roya de la soja en Presidencia R. Saenz Peña (Chaco) y su relación con la circulación atmosférica. En *Actas XIII Reunión Argentina y VI Latinoamericana de Agrometeorología.* Pag 302-303. Bahía Blanca Argentina.
- De Ruyver R., De Souza J., Bischoff S.A., Formento N. 2011. Circulación atmosférica asociada a los casos de aparición de esporas de roya de la soja en Paraná, Argentina. *Meteorológica* 36 (1):19-29
- Detrixhe P., Chandelier A., Cavelier M., Buffet D., Oger R., 2003. Development of an agrometeorological model integrating leaf wetness duration estimation to assess the risk of head blight infection in wheat. *Aspects of Applied Biology* 68, 2003. Mycotoxins in food production systems.
- De Wolf E.D., Francl L.J. 1997. Neural networks that distinguish infection periods of wheat Tan spot in an outdoor environment. *Phytopathology*, 87:83-87.
- De Wolf, E.D.; A.I. Scott. 2007. Disease cycle approach to plant disease prediction. *Annu. Rev. Phytopathol.* 45:203-220.
- Del Ponte E.M., Fernandes J.M.C., Pavan, W.A. 2005 A risk infection simulation model for Fusarium Head Blight of wheat. *Fitopatologia Brasileira* 30:634-642. 2005
- Del Ponte E.M., Godoy C.V., Li X., Yang X.B. 2006. Predicting severity of Asian soybean epidemics with empirical rainfall models. *Phytopathology* 96:797-803.
- Del Ponte E.M., Fernandes J.M.C., Pavan W.A., Baethgen W.E. 2009 A model-based assessment of the impacts of climate variability on Fusarium Head Blight seasonal risk in southern Brazil. *J Phytopathol.* 157:675-681.
- Dummel D.M., Agostini J.P., Moschini R. 2012 Predictive model for ascospore release of *Guignardia citricarpa* using climatological data. XII Internacional Citrus Congress. Valencia. Spain 18-23 Noviembre 2012 S15 O02 Pag 255
- Eversmeyer M. G., Burleigh J. R. 1970. A method of predicting epidemic development of wheat leaf rust. *Phytopathology* 60:805-811.
- Eversmeyer M. G., Burleigh J. R., Roelfs. 1973. Equations for predicting wheat stem rust development. *Phytopathology* 63:348-351.
- Eversmeyer M.G., Kramer C.L., 1998. Models of early spring survival of wheat leaf rust in the central Great Plains. *Plant Dis.* 82:987-991.
- Filajdic N., Sutton J.C. 1992. Influence of temperature and wetness duration on infection of apple leaves and virulence of different isolates of *Alternaria mali*. *Phytopathology* 82:1279-1283.
- Formento A.N., Schutt L.S., Velázquez P.D. 2013. Importancia de las enfermedades foliares y la fusariosis de la espiga del trigo en la campaña 2012. Perspectivas para la próxima siembra. *Jornada Regional de Cultivos de Invierno. Campaña 2013. FCA-UNER.* P. 61-64. ISBN 978-950-698-308-6
- Forrer H.R., Gujer H.U., Fried P.M. 1993. PhytoPRE- A comprehensive information and decision support system for late blight in potatoes. SP-Report, Danish Inst. Plant and Soil Sci., 7, 173-181. From Workshop on Computer-based Decision Support System (DSS) in Crop Production. Parma, Italy, november 23-26 1993.
- Fry W.E., Fohner G.R. 1985. Construction of predictive models: Forecasting disease development. *Advance in Plan Pathology, Vol 3: Mathematical Modelling of Crop Disease.* (C.A. Gilligan, ed) Academic, NY, pp 161-178.
- Garreaud RD, Vuille M, Campagnucci R, Marengo J 2009. Present-day South American climate. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* doi: 10.1016/j.palaeo.2007.10.032.
- González Montaner J., 2004. Avances en el control de enfermedades en trigo. *Actas Congreso A Todo Trigo. Mar del Plata, Argentina* 2004: 43-54
- Grilli M.P., Gorla D.E. 1997. The spatio-temporal pattern of *Delphacodes kuscheli* (Homoptera: Delphacidae) abundance in central Argentina. *Bulletin of Entomological Research* 87, 45-53.

- Harikrishnan R., Del Río L.E. 2008. A logistic regression model for predicting risk of White mold incidence on dry bean in North Dakota. *Plant Dis.* 92: 42-46.
- Hatfield J.L. and Pinter P.J.Jr. 1993. Remote sensing for crop protection. *Crop Prot.* 12: 403-413.
- Henderson D., Williams C.J., Miller J.S. 2007 Forecasting late blight in potato crops of southern Idaho using logistic regression analysis. *Plant Dis.* 91: 951-956.
- Hildebrand P.D., Sutton J.C. 1982. Weather variables in relation to an epidemic of onion downy mildew. *Phytopathology* 72:219-224.
- Hyre R.A. 1954. Progress in forecasting late blight of potato and tomato. *Plant Disease Reporter.* 38:245-253.
- Hooker D.C., Schaafsma A.W., Tamburinc-Illincic L. 2002. Using weather variables pre and post-heading to predicting deoxinivalenol content in winter wheat. *Plant Disease* 86:611-619.
- Irurzum A, Damiano F., Moschini R.C 2006. Comparación entre el área de ocurrencia de precipitación medida por sensoramiento remoto y estaciones de superficie en el noreste de la región pampeana. *Actas XI Reunión Argentina de Agrometeorología. V Congreso Argentino de Agrometeorología La Plata. 6-8/9/2006.*
- Jeger M.J. 1984. Relating disease progress to cumulative numbers of trapped spores: Apple powdery mildew and scab epidemics in sprayed and unsprayed orchards. *Plant Path.* 33:517-523.
- Johnson, K.B. 1987. The role of predictive systems in disease management. In *Crop Loss Assessment and Pest management*. Edited by Teng, P. S..
- Johnson D.A., Alldredge J.R., Vakoch D.L. 1996. Potato late blight forecasting models for the semiarid environment of south-central Washington. *Phytopathology* 86:480-484.
- Klem K., Vanová M., Hajslová J., Lancová K., Schnalová 2007. A neural network model for prediction of deoxinivalenol content in wheat grain based on weather data and preceding crop. *Plant Soil Environ.*, 53 (10):421-429.
- Kobayashi T., Kanda E., Kitada K., Ishiguro K., Torigoe Y. 2001. Detection of rice panicle blast with multispectral radiometer and the potential of using airborne multispectral scanners. *Phytopathology* 91:316-323.
- Kranz, J. 1994. Vigilancia y pronósticos en la protección vegetal. Material informativo para un curso. ZEL. Compiladores: Kranz J., Theunissen J. y Becker-Raterink S.
- Krause R.A., Massie L.B. 1975. Predictive systems: Modern approaches to disease control. *Annu. Rev. Phytopathol.* 13: 31-47.
- Krause R.A., Massie L.B, Hyre R.A. 1975. BLITECAST, a computerized forecast of potato late blight. *Plant Disease Reporter* 59:95-98.
- Line R.F., Cu R.M. 1993. MoreCrop. Managerial options for reasonable economical control of rusts and other pathogens. An expert system for managing wheat diseases in the Pacific Northwest. USDA. Version 1.3.
- Lund, I.A. 1963. Map pattern classification by statistical methods. *Journal of Applied Meteorology* 2: 56-65.
- MacHardy W.E., Gadoury D.M. 1986. Patterns of ascospore discharge by *Venturia inaequalis*. *Phytopathology* 76: 985-990.
- MacKenzie D. 1981. Scheduling fungicide applications for potato late blight with Blitecast. *Plant Disease* 65.
- Maiorano A, Reyneri A., Sacco D., Magni A., Ramponi C. 2008. A dynamic risk assessment model (FUMAGrain) of fumonisin synthesis by *Fusarium verticillioides* in maize grain in Italy. *Crop Protection* 28: 243-256.
- March G.J., Balzarini M., Ornaghi J.A., Beviacqua J.E., Marinelli A. 1995. Predictive model for "Mal del Río Cuarto" disease intensity. *Plant Dis.* 79: 1051-1053.
- March G.J, Oddino C.M., Marinelli A.D. 2010. Manejo de enfermedades de los cultivos según parámetros epidemiológicos. *Ira Edición Córdoba.* 193 p.
- Martínez, M.I., Moschini R.C., Barreto D., Bodega J.L., Comerio R., Forjan H., Piatti F., Presello D.A. & Valentinuz O.R. 2010. Factores ambientales que afectan el contenido de fumonisinas en granos de maíz. *Tropical Plant Pathology* Vol 35, 5, 277-284
- Martínez M., Moschini R., Barreto D., Comerio R., 2012. Effect of environment on *Fusarium* head blight intensity and deoxynivalenol content in wheat grains: development of a forecasting system. *Cereal Research Communications* 40(1): 74-84.
- Mazzilli S., Pérez C., Ernst O., 2011. Una alternativa para optimizar el uso de fungicidas para controlar fusariosis de espiga en trigo. *Agrociencia*, 15, 2:60-68.
- McLaren N.W., Flett B.C., 1998. Use of weather variables to quantify sorghum ergot potential in South Africa. *Plant Dis.* 82:26-29.

- Meinke H., Ryley M. 1997. Effects of sorghum ergot on grain sorghum production: a preliminary climatic analysis. *Aust. J. Agr. Res.* 48 (en prensa)
- Mills W.D. 1944. Efficient use of sulfur dusts and sprays during rain to control apple scab. *N Y Agric. Etn. Ithaca Bull.* 630.
- Moschini RC, Fortugno C, 1989. Relación entre elementos meteorológicos del mes de Agosto y la intensidad de ataque de la roya de la hoja en trigo. *Actas IV Reunión Argentina de Agrometeorología.* Pág.:14-17.
- Moschini R.C., Fortugno C. 1996. Predicting wheat head blight incidence using models based on meteorological factors in Pergamino, Argentina. *European Journal of Plant Pathology* 102: 211-218.
- Moschini R.C., Carmona M., Barreto D., Conti H.A. 1996. Modelos de predicción de la incidencia de la mancha en red en cebada cervecera basados en variables meteorológicas: evaluación del potencial climático de la región pampeana respecto a la enfermedad. *Fitop. Bras.* 21 (3).
- Moschini R.C., Carmona M., Grondona M. 1999. Wheat head blight incidence variations in the argentinian pampeana region associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Actas Simposio en Israel Julio 1999.*
- Moschini R.C., Perez B.A. 1999. Predicting wheat leaf rust severity using planting date, genetic resistance, and weather variables. *Plant Dis.* 83:381-384.
- Moschini R.C., Pioli R., Carmona M., Sacchi O. 2001. Empirical predictions of wheat head blight in the northern Argentinean Pampas region. *Crop Sci.* 41: 1541-1545 .
- Moschini R.C., Escande A.R, Pereyra V.R, Pedraza V., Quiroz F., Troglia C., Iriarte L. 2002 a. Predicción de la incidencia de la podredumbre blanda del capítulo de girasol en base a factores ambientales y genéticos. *Rev. Arg. de Arometeorología*, 2(1):51-57, 2002
- Moschini, R.C, Galich, M.T.V. de, Annone, J.G., Polidoro, O. 2002 b: Enfoque Fundamental-Empírico para estimar la evolución del Índice de *Fusarium* en trigo. *Revista RIA*, 31(3):39-53
- Moschini RC, 2002 c. Modelos de predicción para Roya de la Hoja y Fusariosis de la espiga. En: Fraschina J., Saavedra A., Segura L.(Eds.). *Trigo. Actualización 2002. Información para extensión N°71.* M. Juárez. Córdoba. Argentina
- Moschini RC, 2003. Sistemas predictivos de enfermedades relevantes del trigo, con base meteorológica.137-149. En *Estrategias y metodologías utilizadas en el mejoramiento de trigo: un enfoque interdisciplinario.* Editores: MM Kohli, M Díaz de Ackermann, M. Castro. CIMMYT- INIA Uruguay. 8-11 octubre 2001.
- Moschini R.C., Carranza M.R., Carmona M., 2004 Meteorological-based predictions of wheat head blight epidemic in the southern argentinean pampas region. *Cereal Research Communications* 32: 45-52.
- Moschini R.C., M.N. Sisterna, M.A. Carmona. 2006 Modelling of wheat black point incidence based on meteorological variables in the southern Argentinean Pampas Region. *Australian Journal of Agricultural Research* 57 (11) 1151-1156.
- Moschini R.C. 2007 a. Los cultivos de Soja y Trigo: Herramientas para la Predicción y Manejo de enfermedades en la Argentina. Pag. 39-48 . En "Mundo Agro 2007. Intensificación de los sistemas de producción y el manejo del riesgo en agricultura. Incorporando nuevas tecnologías al manejo de los cultivos". Simposio 26-27 de junio 2007. Buenos Aires
- Moschini R.C. 2007 b. Clima y Enfermedades de cultivos relevantes en Argentina. Simposio taller: El cambio climático y su impacto en las plagas de los vegetales. Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria SENASA Buenos Aires. En CD
- Moschini, R.C., Bischoff S. 2007. Meteorological-based systems for predicting and managing Fusarium head blight epidemics in the wheat growing area of Argentina. *Proceeding 5th Canadian Workshop on Fusarium Head Blight.* Winnipeg Canadá.
- Moschini R.C, Bischoff S., Martínez M.I., 2008 a. Variabilidad climática y enfermedades. Caso de estudio: Fusariosis de la espiga de trigo. *Horizonte A*, Año 5, 21: 10-15.
- Moschini R.C.; B.I. Canteros; M.I. Martínez. 2008 b. Modelos basados en variables meteorológicas para predecir la intensidad en media estación de la cancrrosis en citrus y analizar el impacto de la variabilidad climática en el NE argentino. Informe 2008 proyecto INTA PNFRU 2183.
- Moschini, R. C.; B.I. Canteros; G. Marcó; G. Cazenave. 2010 Modelos logísticos predictivos de la cancrrosis de los cítricos en Bella Vista y su uso en el área citrícola española. VI Congreso Argentino de Citricultura. 0033-PV. Pag.79. Trabajo completo en CD.
- Moschini R.C. 2011. Desarrollo y uso de sistemas de pronóstico de epidemias de la Fusariosis de la Espiga de Trigo (*Triticum aestivum* L.) para identificar situaciones sinópticas y predictores meteorológicos en diferentes escalas asociados a la enfermedad en la región pampeana. Tesis Doctorado. Universidad de Buenos Aires. Argentina

- Moschini, R, Bombelli, E., Wright E.R., López M.V., Perez Canone H.I., Carmona, J.D., Varsallona B., Barberis G., Fabrizio M.C., Rivera M.C. 2011 a. Ajuste de modelos logísticos a observaciones de tasa de incremento diario de severidad de manchas foliares en arándano. Actas XXXIV Congreso Argentino de Horticultura, Buenos Aires, 27 al 30 de Setiembre 2011. Pág. 187.
- Moschini R.C.; Canteros B.I.; Agostini J.P.; Acuña L.; Garrán S.; Olinuk J.; Banchemo S. 2011 b. Modelos empíricos basados en factores meteorológicos para predecir la incidencia de sarna de los citrus. 2do Congreso Argentino de Fitopatología. 1-3 junio 2011. Mar del Plata.
- Moschini R.C., Castellarín J.M.; Martínez M.I., Ferraguti F. 2012 a Análisis de la Fusariosis de la espiga de trigo en Oliveros en la campaña 2011/12. Sistemas de pronóstico basados en variables meteorológicas para estimar su distribución anual y el riesgo climático en la región pampeana Serie Para Mejorar la Producción. Cultivos Invernales N°47. EEA Oliveros-Centro Reg. Santa Fe. ISSN 1850-163X.
- Moschini R.C., Martínez M.I., Aban C. 2012 b. El ambiente y la Roya de la Hoja en Trigo en la región pampeana argentina. Publicado el: 17/09/2012 Engormix: www.engormix.com
- Moschini Ricardo C.; Canteros Blanca I.; Martínez Malvina I. 2013 Cuantificación del efecto ambiental sobre la intensidad de la canchosis de los cítricos a distancias crecientes de cortina rompeviento en Bella Vista. En actas VII Congreso Argentino de Citricultura Sección 4, pag 18. 15-17/5 Pto Iguazú.
- Munford J.D., Norton G.A. 1984. Economics of decision making in pest management. *Ann. Rev. Entomol.* 29:157-174.
- Ornaghi, J.A, March G.J.; Moschini R.C.; Martínez M.I.; Boito G.T. 2011. Predicting population level of *Delphacodes kuscheli*, vector of Mal de Río Cuarto virus, and climate risk in the Argentine Pampas using meteorological models. *Tropical Plant Pathology* 36 (3) 160-168
- Pscheidt J.W., Stevenson W.R. 1983. Forecasting and control of potato early blight, caused by *Alternaria solani*, in Wisconsin. (Abstract). *Phytopathology* 73:804.
- Raposo, R.; D.S. Wilks and W.E. Fry. 1993. Evaluation of potato late blight forecasts modified to include weather forecasts: A simulation analysis. *Phytopathology* 83: 103-108.
- Reis E. M. 1987. Biología y epidemiología de *Gibberella zeae* en trigo. In M M Kohli (ed). Taller sobre la fusariosis de la espiga en América del Sur, CIMMYT, México, D.F., 144 pp.
- Reis E. M. 1990. Control of diseases of small grains by rotation and management of crop residues, in southern Brazil. Pages 140-146. In Proceeding of the International Workshop on Conservation Tillage Systems. Passo Fundo. Brazil.
- Reis E.M., Carmona M.A., Moschini R.C. 1999. Sistema de avaliaçao do potencial de rendimento de lavouras de trigo com vistas a tomada de decisao para a aplicacao de fungicidas para o controle economico de doencas foliares. Universidade de Passo Fundo. Brasil. 28 pp.
- Reis E.M. 2004 Previsao de doencas de plantas Universidade de Passo Fundo 316 p.
- Roelfs A.P., 1986. Development and impact of regional cereal rust epidemics. Pages 129-150 in: Plant Disease Epidemiology Population Dynamics and Management. Volume I.K.J. Leonard and W.E. Fry, eds Macmillan Publishing Co., N.Y.
- Royer M.H., Russo J.M., Kelley J.G.W. 1989. Plant disease prediction using a mesoscale weather forecasting technique. *Plant Dis.* 73:618-624.
- Royle, D.J. and Shaw, M.W., 1988. The costs and benefits of disease forecasting in farming practice In: B.C. Clifford and E. Lester (Editors), Control of Plant Diseases: Costs and Benefits. Blackwell Scientific, Palo Alto, CA, pp. 231-246.
- Sall M.A. 1980. Epidemiology of grape powdery mildew: A model. *Phytopathology* 70:338-342.
- Scherm H 2004. Climate change: can we predict the impacts on plant pathology and pest management ? *Can J Plant Pathol* 26: 267-273
- Scherm, H., Yang, X.B. 1995. Interannual variations in wheat rust development in China and the United States in relation to the El Niño/Southern Oscillation. *Phytopathology* 85: 970-976.
- Sepulcri M.G (2010) Predicción de la Fusariosis de la espiga de trigo a partir de modelos que incorporan información satelital. Tesis Magister área Producción Vegetal. Universidad de Buenos Aires. Argentina
- Sepulcri M.G, Moschini R.C., Di Bella C.M. 2010. Estimación de Fusariosis incorporando información satelital. *Horizonte A. Magazine de las Ciencias Agrarias.* Año 6 N°30: 32-33
- Shaw M. W. and Royle D.J. 1986. Saving *Septoria* sprays: the use of disease forecasts. *Proc. Brit. Crop Protect. Conf.*, 1193-1200.
- Simón M.R., Fleitas M.C., Schalamuk S. 2013 Recent Advances on Integrated Foliar Disease Management with Special Emphasis in Argentina Wheat Production. Chapter 1 INTECH. <http://dx.doi.org/10.5772/51950>
- Smith O.P., Storch R.H., Hepler P.R., 1984. Prediction of potato leafroll virus disease in Maine from thermal unit accumulation and an estimate of primary inoculum. *Plant Disease* Vol 68 N°10 863-865.

- Strange R.N., Scott P.R., 2005. Plant disease: a threat to global food security. *Annu. Rev. Phytopathol.* 43: 83–116.
- Subba Rao K.V., Berggren G.T., Snow J.P. 1990. Characterization of wheat leaf rust epidemics in Louisiana. *Phytopathology* 80:402-410.
- Sutton JC, James TDW, Rowell PM, 1983. Relation of weather and host factors to an epidemic of botrytis leaf blight in onions. *Canadian Journal of Plant Pathology* 5,256–65.
- Sutton J.C. 1988. Predictive value of weather variables in the epidemiology and management of foliar diseases. *Fitopatol. bras.* 12 (4). Dezembro 1988.
- Theunissen, J. 1994. Vigilancia y pronósticos en la protección vegetal. Material informativo para un curso. ZEL. Compiladores: Kranz J., Theunissen J. y Becker-Raterink S.
- Trogliá C.; A.R. Escande; R.C. Moschini; F. Damiano; F. Quiroz. 2004. Modelos logísticos basados en variables térmicas e hídricas para simular la dinámica de la producción de inóculo de *Sclerotinia sclerotiorum* en suelos con rastrojo de girasol. Actas X Reunión Nacional de Agrometeorología. 13-15 de octubre 2004. Mar del Plata.
- Turechek W.W., Stevenson K.L. 1998. Effects of host resistance, temperature, leaf wetness duration and leaf age on infection and lesion development of pecan scab. *Phytopathology* 88:1294-1301.
- Twengstrom E., Sigvald R. 1993. Forecasting *Sclerotinia* stem rot using meteorological and field specific data. SP-Report, Danish Inst. Plant and Soil Sci. 7, 211-216. From Workshop on Computer-based Decision Support System (DSS) in Crop Production. Parma, Italy, november 23-26 1993.
- Ullrich J., Schrodter H., 1966. Das problem der vorhersage des aufretens der kartoffelkrautfaule (*Phytophthora infestans*) und die möglichkeit seiner losung durch eine negativprognose. *Nachrichtenblatt Dt. Pflanzenschutzdienst (Braunschweig)* 18:33-40.
- Velazquez P.D., Formento A.N., Schult L.S., Velazquez J.C. 2013. Comportamiento de cultivares de trigo implantados en tres fechas de siembra frente a la fusariosis de la espiga. *Revista Agromercado. Cuadernillo Clásico de Trigo N°174.* pp. 17-20. ISSN 1515-223X.
- Vincelli P.C., Lorbeer J.W. 1988. Relationship of precipitation probability to infection potential of *Botrytis squamosa* on onion. *Phytopathology* 78: 1078-1082.
- Wallin J.R., Waggoner P.E. 1950. The influence of climate on the development and spread of *Phytophthora infestans* in artificially inoculated potato plots. *Plant Disease Reporter Suppl.* 190:19-33.
- Wilcox W.F., Seen R.C. 1994. Relationship between strawberry gray mold incidence, environmental variables and fungicide applications during different periods of the fruiting season. *Phytopathology* 84:264-270.
- Wright, G., Hansen B. 1997. Climatic effects on aflatoxin incidence and management in Peanut. 2nd Australian Peanut Conference. Handbook and Proceedings. July 1997.
- Zhao S., Yao C., 1989. On the sea temperature prediction models of the prevailing level of wheat scab. *Acta Phytopathologica Sinica*, 19: 229-234.
- Zadoks, J. C. 1989. EPIPPE, a computer-based Decision Support System for pest and disease control in wheat: its development and implementation in Europe. *Plant Disease Epidemiology*, Vol. 2: Genetics, Resistance, and Management. (K.J. Leonard and W.E.Fry, eds.). MacGraw-Hill, Inc. , pp 3-29.
- Yang, X.B., Dowler, W.M., Royer, M.H. 1991. Assessing the risk and potential impact of an exotic plant disease. *Plant Dis.* 75: 976-982.
- Zoldan S.M., 2008. Regioes de risco, caracterizacao da antese em cereais de inverno e sistema de alerta para a Giberela, em trigo. Tesis Doctor en Agronomía, área de Fitopatología. Universidad de Passo Fundo. Brasil.