

FRUTICULTURA

Ajuste de modelos logísticos a la tasa de incremento de severidad de manchas foliares ocasionadas por *Alternaria tenuissima* en arándano

R.C. Moschini¹; E.C. Bombelli²; E.R. Wright²; M.V. López²; H.I. Pérez Canone²; J.D. Carmona²; B. Varsallona²; J.G. Barberis²; M.C. Fabrizio² y M.C. Rivera²

¹Instituto de Clima y Agua, INTA Castelar. Los Reseros y Las Cabañas s/n (B1712WAA) Castelar, Buenos Aires, Argentina. ²Facultad de Agronomía, UBA. Av. San Martín 4453 (C1417DSE) C.A.B.A., Argentina.

Recibido: 11/4/12

Aceptado: 8/11/13

Resumen

Moschini, R.C.; Bombelli, E.C.; Wright, E.R.; López, M.V.; Pérez Canone, H.I.; Carmona, J.D.; Varsallona, B.; Barberis, J.G.; Fabrizio, M.C. y Rivera, M.C. 2014. Ajuste de modelos logísticos a la tasa de incremento de severidad de manchas foliares ocasionadas por *Alternaria tenuissima* en arándano. *Horticultura Argentina* 33(80): 27-35.

La severidad de manchas foliares, ocasionadas por *Alternaria tenuissima* en arándano, fue observada en el cultivar O'Neal en San Pedro (59° 38' S; 33° 44' O), Concordia (31° 19' S; 58° 5' O) y Gualaguaychú (33° 01' S; 58° 30' O) durante tres ciclos epidémicos. Sobre las curvas epidémicas observadas, que ajustaron a modelos logísticos o Gompertz ($R^2 > 0,65$, error bajo) se calcularon las tasas de incremento diario de severidad (TId%; N = 34), cuya variación se relacionó con variables meteorológicas y grado de senescencia foliar (Snc: 1 a 4), calculadas en lapsos de 10 a 28 días previos a cada valor observado de TId%. Se ajustaron modelos de

regresión logística para estimar las probabilidades de ocurrencia de TId% severas ($> 0,033$ %) y moderadas a nulas ($\leq 0,033$ %). La variable DPrT (días con precipitación y temperaturas entre 19 y 36 °C) calculada en los 10 días previos a cada valor de TId% resultó la más fuertemente correlacionada (coeficiente de Kendall = 0,70). La mayor precisión de predicción (94,1 %) fue alcanzada por modelos bivariados, como los que integraron a DPrT y PrAc (acumulación de las precipitaciones diarias) y a DPrT y Snc. Los resultados confirman el lento progreso epidémico primaveral y las altas tasas de incremento estivales, concordantes con la mayor frecuencia de días con precipitación (fuente de mojado para la infección), con registros térmicos entre 19 y 36 °C. Hojas con senescencia creciente favorecen el incremento de tasas de infección.

Palabras claves adicionales: Modelos predictivos, manejo de enfermedades, arándano alto, *Vaccinium corymbosum*.

Abstract

Moschini, R.C.; Bombelli, E.C.; Wright, E.R.; López, M.V.; Pérez Canone, H.I.; Carmona, J.D.; Varsallona, B.; Barberis, J.G.; Fabrizio, M.C. and Rivera, M.C. 2014. Logistic models adjustment to growth rate of severity of blueberry leaf spot caused by *Alternaria tenuissima*. *Horticultura Argentina* 33(80): 27-35.

The severity of leaf spot, caused by *Alternaria tenuissima*, was observed in blueberry plantations (cultivar O'Neal) of San Pedro (59° 38' S; 33° 44' W), Concordia (31° 19' S; 58° 5' W) and Gualaguaychú (33° 01' S; 58° 30' W), for three epidemic cycles. Severity daily growth rates (TId%; N = 34) were calculated on epidemic curves adjusted to Logistic or Gompertz models ($R^2 > 0.65$, low error). The variation in TId% levels was related to meteorological variables and the degree of leaf senescence (Snc: 1 to 4). Regression logistic models were used to estimate the probabilities of occurrence

of severe TId% (> 0.033 %) and moderate to none TId% (≤ 0.033 %). The variable DPrT (rainy days with temperatures between 19 and 36 °C) calculated 10 days before to each value of TId%, was the most strongly correlated (Kendall correlation = 0.70) with TId%. The highest predictive accuracy (94.1 %) was achieved by bivariate models, such as those integrating DPrT and PrAc (daily rainfall accumulation) and DPrT and Snc. The results confirm the slow progress of spring epidemics, contrasting with high summer growth rates, consistent with the greater frequency of days with rainfall (free water source for infection) and temperatures between 19 and 36 °C. Leaves with increasing senescence favor the increase of infection rates.

Additional keywords: Prediction models, disease management, highbush blueberry, *Vaccinium corymbosum*.

1. Introducción

La ocurrencia, desarrollo y dispersión de enfermedades de cultivos depende de efectos integrados del patógeno, hospedante y condiciones ambientales (De Wolf & Isard, 2007). El productor, como cuarto factor, que convierte el mencionado triángulo en pirámide,

puede implementar una serie de prácticas de manejo que modifican este sistema interactivo, con el objeto de reducir las pérdidas atribuidas a enfermedades y de esta forma incrementar los rendimientos de los cultivos, bajo el marco de sustentabilidad exigible a los sistemas productivos.

De los numerosos patógenos que afectan al cultivo

de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) en Argentina, *Alternaria tenuissima* es el que causa las patologías con mayor incidencia y prevalencia (Wright *et al.*, 2005; Wright *et al.*, 2007; Wright & Pérez, 2007; Rivera *et al.*, 2009). Fue citado por primera vez en Argentina por Wright *et al.*, 2004. La sintomatología es muy variable. La más común consiste en manchas foliares, aunque también puede ocasionar tizón de ramas y pudrición de frutos en pre y poscosecha. Se trata de un patógeno necrótrofo, es decir que mata las células del hospedante y obtiene energía de ellas (Dárcy *et al.*, 2001). Su control preventivo consiste en eliminar órganos afectados, disminuir la humedad foliar y evitar condiciones de estrés manteniendo el cultivo bien fertilizado y regado. Cuando aparecen los primeros síntomas en hojas y/o tallos, se recomiendan aplicaciones de fungicidas (Rivera *et al.*, 2009). Para el caso que nos ocupa, los fungicidas foliares constituyen la principal herramienta a utilizar para minimizar los daños causados. Pero si se busca una estrategia de control químico basada en la ocurrencia de condiciones meteorológicas favorables al progreso epidémico, es necesario contar con modelos matemáticos que cuantifiquen la relación ambiente/enfermedad.

Para apoyar al manejo táctico y estratégico de enfermedades de cultivos, muchos esfuerzos de investigación se concentran en el desarrollo de modelos que simulan el progreso epidémico o el nivel final de enfermedad, basados en algunos o todos los factores que expresan la enfermedad. Dichos modelos se desarrollan analizando observaciones de las enfermedades y datos meteorológicos. Se trata de explicar la variación de la enfermedad a través de variables meteorológicas que captan la variabilidad del clima regional, en un intervalo temporal de corta duración. Esta metodología responde a los sistemas de pronóstico empíricos o deductivos, muchos de los cuales son de gran utilidad y funcionales (datos actuales e históricos de registros de enfermedad y condiciones ambientales de un sitio dado). Resultan en la formulación de reglas que deben cumplirse antes que se produzca el desarrollo de la enfermedad, como las establecidas para el tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans*) (Hyre, 1954). Coakley (1988) sugiere un mínimo de ocho a doce años de observaciones de enfermedad para identificar con certeza los factores climáticos asociados. 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. En este sentido, Del Ponte *et al.* (2006), mediante técnicas de regresión lineal múltiple, ajustaron modelos basados en variables hídricas para predecir la severidad final de la roya asiática de la soja

(*Phakopsora pachyrhizi*). Para ello, utilizaron datos de severidad (Campbell & Madden, 1990) de sólo tres 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 cinco sitios y tres campañas, para ajustar modelos predictivos de regresión lineal múltiple y logística, basados en dos variables meteorológicas.

En 2008/2009 y 2009/2010 se efectuaron observaciones epidemiológicas de manchas foliares ocasionadas por *Alternaria tenuissima* en arándano cultivar O'Neal, en las localidades de San Pedro, Concordia y Gualaguaychú (Bombelli *et al.*, 2009; Bombelli *et al.*, 2011; Moschini *et al.*, 2011). El objetivo de la presente investigación es completar dicho trabajo con observaciones en la campaña 2010/2011 y relacionarlas con variables meteorológicas y grado de senescencia foliar.

2. Materiales y métodos

2.1 Colección de datos de severidad y elementos meteorológicos

2.1.1 Confección de bases de datos

Durante la campaña 2010/2011 se recorrieron cultivos de arándano cv. O'Neal en las localidades de San Pedro (59° 38' S; 33° 44' O), Concordia (31° 19' S; 58° 5' O) y Gualaguaychú (33° 01' S; 58° 30' O). Sobre cada una de las parcelas predefinidas para cada sitio, se seleccionaron cuatro filas consecutivas, de las cuales se evaluaron las dos internas. A las plantas presentes en dichas filas no se les aplicó fungicidas, al menos durante los 6 meses anteriores al comienzo de las evaluaciones. Las plantas se seleccionaron a intervalos regulares de 12 ejemplares, de manera de tener distancias uniformes entre ellas. Para cada sitio y cultivar se realizaron las observaciones sobre 20 a 22 plantas. A su vez, dentro de cada planta, se identificaron una rama denominada "interna" y otra "externa", según sus posiciones en la corona, con el fin de que las sucesivas mediciones a lo largo del ciclo productivo se realicen siempre sobre las mismas. Las observaciones se llevaron a cabo durante primavera y verano, a intervalos aproximados de 30 días. Sobre plantas de las dos filas externas, se tomaron muestras de tejidos afectados con síntomas similares a los observados en los ejemplares evaluados, para determinar en laboratorio el o los patógenos asociados a la sintomatología foliar evaluada.

Se construyó una base de datos a partir de los registros de severidad de cada planta evaluada, en cada sitio y momento del ciclo productivo, el tiempo transcurrido hasta su aparición, los valores de la misma a

intervalos de tiempo definidos y los datos meteorológicos (precipitación, temperatura máxima y mínima y humedad relativa) en un período previo a cada medición (a partir de los registros de estaciones meteorológicas de cada localidad). Se construyeron las curvas de progreso de la enfermedad, las cuales fueron linealizadas.

Mediante análisis de regresión lineal (procedimiento GLM del SAS) fue evaluada la bondad del ajuste de las formas linealizadas de los modelos Logístico (L) y Gompertz (G) (Campbell & Madden, 1990) para cada una de las nueve epidemias observadas (tres sitios y tres campañas). Se analizaron para cada modelo el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RECM).

2.1.2 Desarrollo de modelos de regresión logística

Para el desarrollo de modelos de regresión logística (variables meteorológicas y de senescencia foliar) sólo se utilizaron las curvas de progreso epidémico observadas por sitio y ciclo, que alcanzaron valores de $R^2 > 0,65$ y $RECM < 1,1$.

2.2 Variable respuesta

Dicha variable se categorizó binariamente (los valores de TId% de las curvas de progreso epidémico seleccionadas se categorizaron en función de un valor umbral en “severo” y “moderado a nulo”). Los valores umbrales analizados correspondieron a percentiles de los 34 valores de TId% observados.

2.3 Variables regresoras

2.3.1 Variables meteorológicas

Las estaciones meteorológicas de la Estación Experimental Agropecuaria San Pedro (59° 40' S; 33° 40' O), perteneciente al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), y del Servicio Meteorológico Nacional de Concordia (58° 1' S; 31° 18' O) (SMN) y Gualeguaychú (58° 31' S; 33° 1' O) (SMN), registraron diariamente la temperatura máxima (Tx), temperatura mínima (Tn), precipitación (Pr) y humedad relativa (HR, promedio tridurno). La temperatura media diaria (Tm) fue calculada como la semisuma de las temperaturas máxima y mínima. Basados en estos elementos se construyeron variables meteorológicas simples e interacciones (producto de dos variables simples).

2.3.1.1 Simples

DTxnP: número de días con $Tn > \text{umbral}$ (intervalo analizado: 16 a 20 °C) y $Tx < 36$ °C.

DTn: número de días con $Tn \leq \text{umbral}$ (intervalo: 16 a 20 °C).

DTxnN: número de días con $Tn \leq \text{umbral}$ (intervalo: 16 a 20 °C) o $Tx \geq 36$ °C.

TxM: temperatura máxima media.

TnM: temperatura mínima media.

FPr: días con registros de $Pr > 0,2$ mm.

PrAc: acumulación de precipitaciones $> 0,2$ mm.

DPrHR: número de días con registros de $Pr > 0,2$ mm y $HR > \text{umbral}$ (intervalo analizado: 65 a 85 %).

DPrT: número de días con registro de $Pr > 0,2$ mm, en el intervalo térmico: $Tx < 36$ °C y $Tn > \text{umbral}$ (16 a 20 °C).

DHR: número de días con $HR > \text{umbral}$ (intervalo: 65 a 85 %).

2.3.1.2 Interacciones (producto de dos variables simples)

It1 = FPr · DTxnP.

It2 = FPr · TnM.

Tabla 1a. Severidad acumulada y tasa epidémica diaria observada para *Alternaria tenuissima* sobre arándano en la localidad de San Pedro durante tres ciclos epidémicos entre 2008 y 2011.

Sitio San Pedro: Ciclo 2008/09				
Fecha	Día Juliano	Sev ^z (%)	Tiempo (días)	TId ^y (%)
27/09/08	270	0,0	1	0,0
27/11/08	332	1,86	63	0,03
08/01/09	8	2,38	105	0,012
09/03/09	68	12,08	165	0,162
Sitio San Pedro: Ciclo 2009/10				
Fecha	Día Juliano	Sev ^z (%)	Tiempo (días)	TId ^y (%)
02/10/09	275	0,0	1	0,0
22/10/09	295	0,66	21	0,033
03/12/09	337	2,62	63	0,047
29/12/09	363	5,90	89	0,126
03/02/10	34	8,83	125	0,081
13/02/10	44	10,56	135	0,173
17/04/10	107	12,11	198	0,025
Sitio San Pedro: Ciclo 2010/11				
Fecha	Día Juliano	Sev ^z (%)	Tiempo (días)	TId ^y (%)
23/09/10	266	0,0	1	0,0
13/10/10	286	0,65	21	0,03
16/11/10	320	1,32	55	0,02
25/01/11	25	5,93	70	0,066
01/03/11	60	11,06	105	0,147
05/04/11	95	8,26	140	0,0

^zSeveridad acumulada. ^yTasa de incremento epidémico diario.

It3 = DPrT · TnM.
 It4 = DPrT · DPrHR.

2.3.2 Variable ligada al grado de senescencia foliar (Snc)

Toma valores de 1 a 4 de acuerdo al cuartil en el que se encuentra la observación respecto a la duración máxima de las curvas de progreso epidémico analizadas por sitio (198 en San Pedro, 209 días en Concordia y 171 en Gualeguaychú). Por ejemplo, si en Concordia se está a 141 días del inicio de la epidemia simulada: $141/209 = 0,67$ o sea tercer cuartil: Snc = 3.

2.4 Lاپso de procesamiento de las variables

Las variables fueron calculadas en lapsos previos

a cada valor de TId%, a lo largo de cada curva de progreso epidémico, que oscilaron entre 10 y 28 días.

Para evaluar la asociación entre las variables regresoras con los niveles epidémicos se desarrolló un programa basado en el lenguaje de programación del software Statistical Analysis System (SAS).

2.5 Análisis estadístico

a) Se calcularon los coeficientes de correlación de Kendall (rk) Tau-b (Proc Freq del SAS) (De Wolf *et al.*, 2002) entre los niveles epidémicos (categorías de acuerdo a TId%) y las variables meteorológicas descriptas (simples e interacciones) y el factor de senescencia (Snc).

b) Mediante la técnica de regresión logística se es-

Tabla 1b. Severidad acumulada y tasa epidémica diaria observada para *Alternaria tenuissima* sobre arándano en la localidad de Concordia durante tres ciclos epidémicos entre 2008 y 2011.

Sitio Concordia: Ciclo 2008/09				
Fecha	Día Juliano	Sev ^z (%)	Tiempo (días)	TId ^y (%)
01/09/08	245	0,0	1	0,0
23/10/08	297	0,97	53	0,019
04/12/08	339	1,44	95	0,011
06/01/09	6	12,65	122	0,34
25/03/09	84	9,57	200	0,0
Sitio Concordia: Ciclo 2009/10				
Fecha	Día Juliano	Sev ^z (%)	Tiempo (días)	TId ^y (%)
31/08/09	243	0,1	1	0,0
09/10/09	282	0,88	40	0,023
16/11/09	320	2,59	78	0,045
21/12/09	355	4,61	113	0,058
28/01/10	28	4,90	151	0,008
27/02/10	58	28,14	181	0,775
27/03/10	86	28,68	209	0,019
Sitio Concordia: Ciclo 2010/11				
Fecha	Día Juliano	Sev ^z (%)	Tiempo (días)	TId ^y (%)
14/09/10	257	0,0	1	
22/09/10	265	1,90	9	
19/11/10	323	3,71	67	
28/12/10	362	2,83	106	
01/02/11	32	2,38	141	
01/03/11	60	4,42	169	
30/03/11	90	4,93	199	

^zSeveridad acumulada. ^yTasa de incremento epidémico diario.

Tabla 1c. Severidad acumulada y tasa epidémica diaria observada para *Alternaria tenuissima* sobre arándano en la localidad de Gualeguaychú durante tres ciclos epidémicos entre 2008 y 2011.

Sitio Gualeguaychú: Ciclo 2008/09				
Fecha	Día Juliano	Sev ^z (%)	Tiempo (días)	TId ^y (%)
17/09/08	261	0,0	1	0,0
25/11/08	330	10,45	70	0,15
13/12/08	348	8,94	88	0,0
02/01/09	2	12,20	108	0,098
06/03/09	65	11,41	171	0,0
Sitio Gualeguaychú: Ciclo 2009/10				
Fecha	Día Juliano	Sev ^z (%)	Tiempo (días)	TId ^y (%)
20/09/09	263	0,0	1	
07/10/09	280	7,26	18	
03/12/09	337	8,40	75	
28/12/09	362	7,31	100	
18/02/10	49	9,60	152	
20/03/10	79	10,63	182	
24/04/10	114	14,42	217	
Sitio Gualeguaychú: Ciclo 2010/11				
Fecha	Día Juliano	Sev ^z (%)	Tiempo (días)	TId ^y (%)
25/09/10	268	0,0	1	
16/10/10	289	3,00	22	
19/11/10	323	9,12	56	
28/12/10	362	6,64	95	
01/02/11	32	7,83	130	
01/03/11	60	6,32	158	
30/03/11	90	6,16	188	

^zSeveridad acumulada. ^yTasa de incremento epidémico diario.

timó la probabilidad de ocurrencia de cada categoría epidémica en base a una o varias de las variables regresoras analizadas (simples o como componente interactivo). Regla de decisión: se pronostica la categoría epidémica con una probabilidad asociada $\geq 0,5$ (binaria). En la evaluación de los mejores modelos de respuesta binaria se toma en cuenta el valor crítico P (valor de probabilidad para clasificar una categoría epidémica como severa que logra la mayor precisión de predicción), que no necesariamente es el valor 0,5. El procedimiento Logistic del SAS ajusta modelos de regresión para datos de respuesta binaria por el método de máxima verosimilitud. Una función logit (logaritmo natural de $(Pr/1-Pr)$, siendo “Pr” la probabilidad acumulada de las categorías epidémicas) establece la unión entre el componente estocástico y las variables regresoras meteorológicas analizadas. El método de selección de variables Stepwise, del procedimiento Logistic, fue usado para obtener el modelo más apropiado, haciendo jugar todas las variables (simples e interacciones) descriptas y fijando niveles de significancia para entrar y permanecer en el modelo (NSE y NSP respectivamente) de 0,05.

c) La precisión de la predicción se basó en el porcentaje de casos correctamente clasificados. Si en cada uno de los casos analizados se compara la categoría epidémica observada versus la predicha con mayor probabilidad de ocurrencia por las ecuaciones logísticas desarrolladas, se puede calcular el porcentaje de casos correctamente clasificados.

3. Resultados y discusión

Los análisis en laboratorio de las muestras colectadas confirmaron que la sintomatología observada estuvo relacionada con la presencia de *Alternaria tenuissima*.

La Tabla 1 (a, b y c) muestra los parámetros epidemiológicos de manchas foliares ocasionadas por *Alternaria tenuissima* en arándano para tres campañas y tres sitios.

La variable dependiente en la regresión lineal fue para L = $\ln(\text{sev}/(1-\text{sev}))$ y para G = $-\ln(-\ln(\text{sev}))$, siendo “ln” el logaritmo natural y “sev” la severidad observada de la enfermedad en proporción, para cada fecha. La variable independiente fue el tiempo (t) expresado en días que transcurrieron desde una fecha inicial.

El inicio de cada ciclo epidémico (2008/09 a 2010/11), para los tres sitios, coincidió con la fecha en la cual se acumulan 170 grados día desde el 1 de julio (Tm base = 12,5 °C). La temperatura media base es la utilizada para simular el desarrollo de las especies cítricas (Davies & Albrigo, 1994). Estas fechas supuestas de inicio epidémico fueron previas a la primera observación de cada ciclo epidémico por sitio (San Pedro: 27/9/08 y 2/10/09, Concordia: 1/9/08, 31/8/09 y 14/09/10, Gualeguaychú: 17/9/08, 20/9/09 y 25/09/10). En San Pedro para la campaña 2010/11, los 170 grados día se cumplieron el 18/10, pocos días después de la primera observación de enfermedad (13/10), por ello se decidió tomar como fecha de inicio epidémico (Severidad% = 0,0) el 23/09/10.

Resolviendo las siguientes ecuaciones se obtuvieron los valores de severidad (Sev) de cualquier día (t) en las curvas de progreso epidémico ajustadas:

Modelo L: $Sev = 1 / (1 + \exp(-(\text{intercepto} + \text{pendiente} \cdot t)))$

Modelo G: $Sev = \exp(-\exp(-\text{intercepto})) \cdot \exp(-\text{pendiente} \cdot t)$

Para todos los ciclos epidémicos de San Pedro (2008/09 a 2010/11), los ciclos 2008/09 y 2009/10 de Concordia y el ciclo 2008/09 en Gualeguaychú, se pudieron ajustar modelos linealizados Logístico y Gompertz con altos coeficientes de determinación y bajo error (Tabla 2). Se desechó para el desarrollo de modelos predictivos la información epidémica de los otros ciclos epidémicos.

Los valores de TId% se categorizaron binariamente en severo ($TId\% \geq 0,033$) y moderado a nulo ($TId\% < 0,033$), siendo el umbral 0,033 el percentil 67 % de los 34 valores observados de TId%.

Tabla 2. Análisis de regresión lineal de los modelos de mejor ajuste para describir las epidemias de *Alternaria tenuissima* sobre arándano observadas en Concordia, San Pedro y Gualeguaychú.

Sitio	Año	Modelo ^z	N ^y	R ²	RECM ^x	Intercepto	Pendiente
Concordia	2008/09	L ^w	5	0,80	1,04	-6,2619	0,0241
Concordia	2009/10	L ^v	7	0,93	0,61	-6,2650	0,0268
San Pedro	2008/09	G ^u	5	0,96	0,12	-1,9184	0,0069
San Pedro	2009/10	G ^t	7	0,89	0,16	-1,7415	0,0061
San Pedro	2010/11	G ^s	6	0,91	0,15	-1,7705	0,0056
Gualeguaychú	2008/09	G ^r	5	0,66	0,34	-1,6156	0,0067

^zL = logístico; G = Gompertz; ^yN = número de observaciones; ^xraíz cuadrada del error cuadrático. Resolviendo las siguientes ecuaciones se obtienen los valores de Severidad acumulada (Sev): ^wSevL(%) = $1 / (1 + \exp(-(-6,262 + 0,024 \cdot t)))$. ^vSevL(%) = $1 / (1 + \exp(-(-6,265 + 0,027 \cdot t)))$. ^uSevG(%) = $\exp(-\exp(1,9184) \cdot \exp(-0,0069 \cdot t))$. ^tSevG(%) = $\exp(-\exp(1,7415) \cdot \exp(-0,0061 \cdot t))$. ^sSevG(%) = $\exp(-\exp(1,7705) \cdot \exp(-0,0056 \cdot t))$. ^rSevG(%) = $\exp(-\exp(1,6156) \cdot \exp(-0,0067 \cdot t))$.

Las correlaciones (rk: coeficiente de Kendall Tau-b) entre los niveles de tasas de incremento epidémico y las variables meteorológicas y el factor de senescencia (Snc) analizadas, se presentan en la Tabla 3. Las máximas correlaciones se obtuvieron calculando las variables regresoras en lapsos de 10 días previos a cada valor de TId%. En este lapso, la mayor ocurrencia de días con registro de precipitación acotado por temperaturas mínimas y máximas diarias de 19 °C y 36 °C (DPrT1) potencia el proceso de infección, maximizando su asociación con el nivel epidémico (rk = 0,70). Hojas de arándano, previamente heridas, inoculadas con una suspensión de conidios de *Alternaria tenuissima* manifestaron los primeros síntomas a partir

de los 8 días (Wright *et al.*, 2004). Hojas de berenjena inoculadas con conidios de *Alternaria tenuissima* y mantenidas en cámara a 25 °C y 95 % de humedad relativa, mostraron los síntomas típicos a los 7 días de la inoculación (Nasehi *et al.*, 2012). Estos resultados dan sentido biológico a la variable DPrT1 calculada en los 10 días previos a cada valor de TId%, pues verifica la ocurrencia de condiciones térmico-hídricas favorables durante el período de incubación. Las variables simples asociadas sólo a elementos meteorológicos de naturaleza continua, como las térmicas, presentaron correlaciones de Kendall superiores a 0,52, superando a las variables estrictamente relacionadas al requerimiento de mojado del patógeno para la infección (FPr, PrAc, DPrHr y DHR). Los umbrales térmicos óptimos para las temperaturas mínimas y máximas fueron 17° y 36 °C respectivamente, cuando las variables térmicas (DTxnP, DTn, DTxnN) no se combinaron con elementos hídricos. La alta correlación de las variables térmicas con la enfermedad coincide con lo mencionado por Milholland (1973), quien afirma que la temperatura es el principal factor meteorológico, aunque no el único, responsable de la infección y desarrollo de la enfermedad, no sólo a campo sino también *in vitro*, siendo la temperatura óptima para el desarrollo de la enfermedad 20 °C y para el crecimiento del hongo 28 °C, para cultivos de arándano alto en el estado de Carolina del Norte. El factor de senescencia (Snc) alcanzó un valor moderado y positivo de coeficiente de correlación de Kendall (rk = 0,26), marcando una tendencia que hacia el verano, hojas de senescencia creciente (alto valor de Snc), incrementarían el proceso de infección. Para Rotem (1994) los hospedantes de especies patógenas del género *Alternaria* aumentan su susceptibilidad con la edad.

Los modelos predictivos logísticos desarrollados se presentan en la Tabla 4. El modelo I, que sólo integra a la variable DPrT1, resultó el más apropiado cuando se corrió el procedimiento de selección Stepwise, haciendo intervenir todas las variables (simples e interacciones) descriptas y fijando niveles de significancia para entrar y permanecer en el modelo de 0,05. Este modelo I logró una precisión de predicción de 88,2 %, clasificando correctamente 30 de las 34 observaciones de tasa de incremento epidémico diario. Los modelos bivariados II, III y IV sólo clasificaron erróneamente dos casos de los 34 observados (precisión de predicción: 94,1 %). La ocurrencia de precipitación en días con temperaturas que oscilan entre 18-19 °C y 36 °C es decisiva para estimular la tasa de infección. Cuando este efecto se complementa con otras variables meteorológicas como PrAc (modelo II) y DPrHR (modelo IV) o con el factor de senescencia

Tabla 3. Coeficientes de correlación (Kendall Tau-b) de variables meteorológicas (simples e interacciones) y del factor ligado a la senescencia foliar (Snc) en relación a los niveles de tasa de incremento epidémico diario (TId%) binarios (severo y moderado a nulo). Las variables regresoras se calcularon en los lapsos de 10 días previos a cada valor de TId.

		Coeficiente de correlación de Kendall TAU-b (rk)
Variables meteorológicas Simples ^z	DTxnP	0,57
	DTn	-0,52
	DTxnN	-0,57
	TxM	0,49
	TnM	0,33
	FPr	0,45
	PrAc	0,38
	DPrHR	0,43
	DPrT1	0,70
	DPrT2	0,67
Variables meteorológicas Interactivas ^y	DHR	0,39
	It1	0,63
	It2	0,50
	It3	0,67
Factor ligado a la senescencia foliar	It4	0,60
	Snc	0,26

^zDTxnP: número de días con Tn > 17 °C y Tx < 36 °C; DTn: número de días con Tn ≤ 17 °C; DTxnN: número de días con Tn ≤ 17 °C o Tx ≥ 36 °C; TxM: temperatura máxima media; TnM: temperatura mínima media. FPr: días con registros de Pr > 0,2 mm; PrAc: se acumulan las precipitaciones > 0,2 mm; DPrHR: número de días con registros de Pr > 0,2 mm y HR > 81 %; DPrT1: número de días con registros de Pr > 0,2 mm en el intervalo térmico: Tx < 36 °C y Tn > 19 °C; DPrT2: número de días con registros de Pr > 0,2 mm en el intervalo térmico: Tx < 36 °C y Tn > 18 °C. DHR: número de días con HR > 81 %. ^yIt1 = FPr · DTxnP; It2 = FPr · TnM; It3 = DPrT1 · TnM; It4 = DPrT1 · DPrHR.

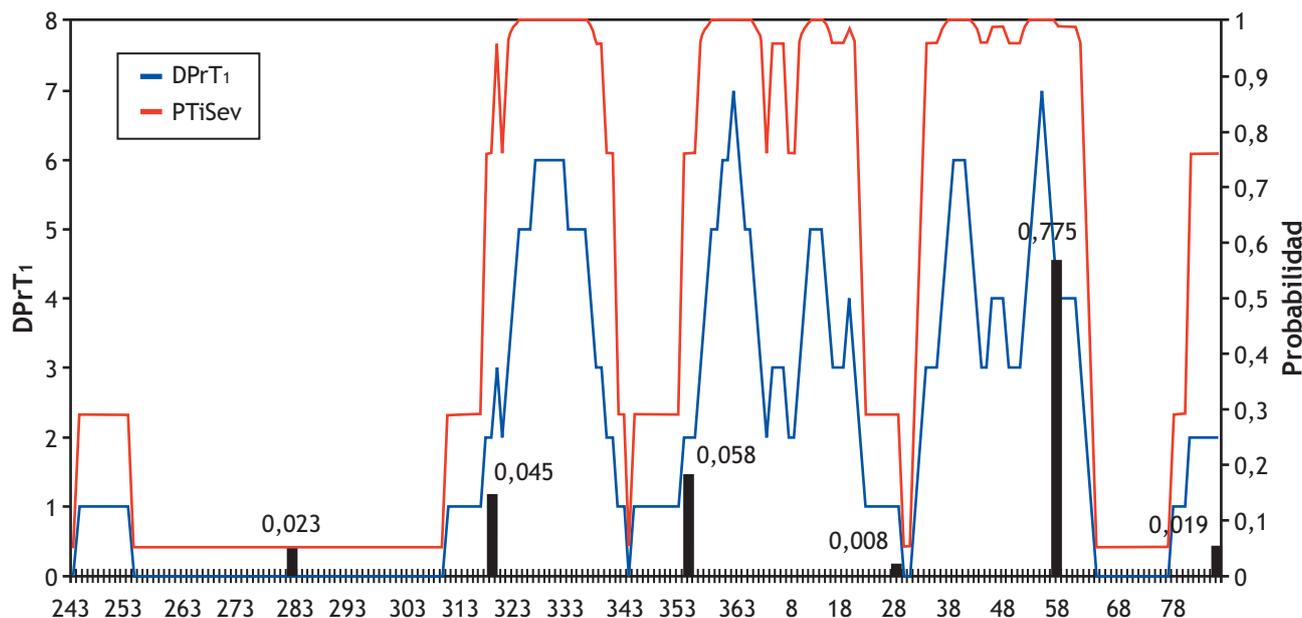


Figura 1. Evolución de la probabilidad de ocurrencia de una tasa severa de incremento diaria (PTiSev) de severidad de las manchas foliares en arándano (estimada por Modelo I, Tabla 4) y de los valores de la principal variable predictora DPrT1 para la campaña 2009/2010 en Concordia. Barras en negro indican los valores observados de tasa de incremento diario (TId en %) de la severidad de la enfermedad (valor umbral: 0,033 %). Modelo I: $\text{LogitPrS} = -2,929 + 2,0375 \cdot \text{DPrT1}$, siendo DPrT1 el número de días con registros de $\text{Pr} > 0,2$ mm en el rango térmico: $\text{Tx} < 36$ °C y $\text{Tn} > 19$ °C.

(Snc) (modelo III), se incrementa la capacidad predictiva (Tabla 4).

Para la campaña 2009/10 (Figura 1) se graficó la evolución diaria de los valores de probabilidad de ocurrencia de una tasa de incremento epidémica severa (PTiSev) (Modelo I de la Tabla 4), junto al progreso diario de la principal variable regresora (DPrT1: procesada en los correspondientes 10 días previos a cada día de observación). Se observó buena correspondencia entre las curvas de PTiSev y de la variable DPrT1, explicando satisfactoriamente la variación de las tasas de incremento epidémica observadas. Este tipo de seguimiento diario debería realizarse en la primavera temprana, permitiendo de esta forma la emisión de alarmas de riesgo ambiental, sustentando la toma de decisión de control químico. Otras formas de control se podrían integrar para un manejo óptimo de la enfermedad, como las asociadas al hospedante (comportamiento respecto a la enfermedad del cultivar de arándano implan-

tado) y al patógeno (reducción del potencial de inóculo mediante la poda y eliminación de brotes afectados). Como ejemplo de sistema de pronóstico de una enfermedad basado en las condiciones meteorológicas, se puede citar al programa ALTER-RATER (Bhatia *et al.*, 2003). Este programa, desarrollado por la Universidad de Florida, establece el momento óptimo de aplicación de fungicidas para el control de *Alter-*

Tabla 4. Modelos logísticos para estimar la probabilidad de ocurrencia de cada categoría de tasa de incremento epidémico diario de mancha foliar (*Alternaria tenuissima*) en arándano: severa (S) y moderada a nula (M), en base a variables meteorológicas simples e interacciones y a un factor de senescencia foliar (variables regresoras se calcularon en los lapsos de 10 días previos a cada valor de tasa de incremento epidémico diario).

Modelo	Ecuaciones del Modelo ^z	P	Precisión (%)
I	$\text{LogitPrS} = -2,929 + 2,0375 \cdot \text{DPrT1}$	0,50	88,2
II	$\text{LogitPrS} = -3,1633 + 3,5233 \cdot \text{DPrT1} - 0,0308 \cdot \text{PrAc}$	0,50	94,1
III	$\text{LogitPrS} = -1,2315 + 2,8635 \cdot \text{DPrT1} - 1,0675 \cdot \text{Snc}$	0,57	94,1
IV	$\text{LogitPrS} = -3,8795 + 3,2919 \cdot \text{DPrT2} - 1,702 \cdot \text{DPrHR}$	0,55	94,1

^z $\text{LogitPrS} = \ln(\text{PrS} / 1 - \text{PrS})$. Resolviendo la expresión $\text{Exp}(\text{LogitPrS}) / (1 + \text{Exp}(\text{LogitPrS}))$ se obtienen los valores de PrS (probabilidad de observar un nivel de tasa de incremento epidémico diario (TId%) severo (S)). $\text{PrM} = 1 - \text{PrS}$, siendo "PrM" la probabilidad de observar un nivel de incremento epidémico moderado a nulo (M). Valor crítico P: valor de probabilidad para clasificar una categoría epidémica como severa que logra la mayor precisión de predicción. PrAc: se acumulan las precipitaciones $\text{Pr} > 0,2$ mm. DPrHR: número de días con registros de $\text{Pr} > 0,2$ mm y $\text{HR} > 81$ %. DPrT1: número de días con registros de $\text{Pr} > 0,2$ mm en el rango térmico: $\text{Tx} < 36$ °C y $\text{Tn} > 19$ °C. DPrT2: número de días con registros de $\text{Pr} > 0,2$ mm en el rango térmico: $\text{Tx} < 36$ °C y $\text{Tn} > 18$ °C. Snc: factor de senescencia.

naria alternata pv. *citri* cuando ocurren lluvias diarias > 2,5mm, temperaturas entre 20-28 °C y duraciones de mojado foliar \geq 10 h.

4. Conclusiones

Utilizando técnicas de regresión logística se cuantificó en condiciones naturales el efecto de variables meteorológicas sobre las tasas de incremento diario (variable de respuesta binaria) de la severidad de *Alternaria tenuissima* en hojas de arándano. El modelo seleccionado por el procedimiento Stepwise incluyó una variable predictora térmico-hídrica calculada en lapsos de 10 días previos a cada fecha de predicción. El lento progreso epidémico primaveral y las altas tasas de incremento estivales responden a la diferente frecuencia de días con precipitación (fuente de mojado para la infección) y temperaturas oscilando entre 19 y 36 °C. La senescencia foliar creciente a lo largo de cada ciclo de crecimiento de la plantación también favorece el incremento de las tasas de infección.

Una vez validadas sus predicciones contra observaciones independientes de la enfermedad, los modelos logísticos seleccionados pueden correrse en cada ciclo de crecimiento para ir visualizando la evolución diaria de la probabilidad de ocurrencia de un nivel severo de incremento epidémico y, de esta forma, sustentar la emisión de alarmas regionales que apoyen la decisión de control químico, integrado a otros factores de la pirámide epidémica.

5. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado con fondos provenientes de los subsidios UBACyT G026 y UBACyT 2002-0100100817.

6. Bibliografía

- Bhatia, A.; Roberts, P.D. & Timmer, L.W. 2003. Evaluation of the Alter-Rater model for timing of fungicide applications for control of *Alternaria* brown spot of citrus. *Plant Disease*, 87: 1089-1093.
- Bombelli, E.C.; López, M.V.; Barberis, J.G.; Wright, E.R.; Fabrizio, M.C.; Nicolini, F.; Nadas, T.; Cardona, F.; Español, M.; Mallo, S.; Scarpatti, N. & Moschini, R. 2009. Estudios preliminares para el desarrollo de un modelo predictivo para enfermedades foliares de arándano en Argentina. *Horticultura Argentina* 28:124.
- Bombelli, E.; Moschini, R.; Wright, E.; López, M.V.; Canavesi, G.; Pagano, M.; Eizaguirre, L.; Barberis, G.; Fabrizio, M.C. & Rivera, M. 2011. Modelización del efecto de variables meteorológicas y la senescencia foliar sobre el progreso epidémico de manchas foliares en arándano. En: Libro de Resúmenes del Segundo Congreso Argentino de Fitopatología. Mar del Plata, Argentina p. 195.
- Campbell, C.L. & Madden, L.V. 1990. Introduction to plant disease epidemiology. New York, Wiley. 532 p.
- Coakley, S.M. 1988. Variation in climate and prediction of disease in plants. *Annual Review of Phytopathology* 26:163-181.
- Dárcy, C.J.; Eastburn, D.M. & Schuman, G.L. 2001. Illustrated glossary of plant pathology. The American Phytopathological Society. Education Center. www.apsnet.org
- Davies, F.S. & Albrigo, L.G. 1994. Citrus. *Crop Production Science in Horticulture*. Wallingford, CAB International. Vol 2. 254p.
- De Wolf, E.D. & Isard, S.A. 2007. Disease cycle approach to plant disease prediction. *Annual Review of Phytopathology* 45:1-18.
- De Wolf, E.D.; Madden, L.V. & Lipps, P.E. 2002. Risk assessment models for wheat *Fusarium* head blight epidemics based in within-season weather data. *Phytopathology* 93:428-435.
- 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.
- Hyre, R.A. 1954. Progress in forecasting late blight of potato and tomato. *Plant Disease Reporter* 38: 245-253.
- Milholland, R.D. 1973. A leaf spot disease of highbush blueberry caused by *Alternaria tenuissima*. *Phytopathology* 63: 1395-1397.
- Moschini, R.C.; Sisterna, M.N. & Carmona, M. 2006. Modeling of wheat black point incidence based on meteorological variables in the southern Argentinean Pampas Region. *Australian Journal of Agricultural Research* 57:1151-1156.
- Moschini, R.C.; Wright, E.R.; Bombelli, E.; López, M.V.; Canavesi, G.; Pagano, M.; Eizaguirre, L.; Barberis, G.; Fabrizio, M.C. & Rivera, M.C. 2011. Logistic models for estimating epidemic increase rates of blueberry foliar diseases, based on meteorological and leaf senescence variables. In Lisbon IHC2010 Proceedings. Volume 25. Berries: From genomics to sustainable production, quality and health. Mezzetti, B.; Brás de Oliveira, P. (Eds.). (In press).

- Nasehi, A.; Kadir, J.B.; Zainal Abidin, M.A.; Wong, M.Y. & Mahmodi, F. 2012. First report of *Alternaria tenuissima* causing leaf spot on eggplant in Malaysia. *Plant Disease* 96 (8): 1226.
- Rivera, M.C.; Wright, E.R.; Pérez, B.A.; González Rabellino, P. & Pérez, J.A. 2009. Enfermedades del arándano. En: Guía de enfermedades, plagas y malezas del arándano. Buenos Aires, Orientación Gráfica. p. 1-68 (Wright, E.R. ed.).
- Rotem, J. 1994. The genus *Alternaria*, Biology, Epidemiology and Pathogenicity. The American Phytopathological Society. Minnesota, USA. 125 pp.
- Wright, E.R. & Pérez, J.A. 2007. Enfermedades del arándano. Publicado en CD. XXX Congreso Argentino de Horticultura. La Plata. Buenos Aires.
- Wright, E.R.; Pérez, B.A.; Fernández, R.L.; Ascitutto, K.; Rivera, M.C.; Murillo, F.; Vasquez, P.; Divo de Sesar, M.; Pérez, A.; Aguilar Heredia, L.; Rosato, M.F.; Crelier, A. & Baldomá, J. 2005. Conocimiento actual sobre enfermedades de arándano. En: Libro de Resúmenes del I Congreso Latinoamericano de Arándanos y otros berries. Buenos Aires, Argentina. p 113-117.
- Wright, E.R.; Rivera, M.C.; Esperón, J.; Cheheid, A. & Rodríguez Codazzi, A. 2004. *Alternaria* leaf spot, twig blight and fruit rot of highbush blueberry in Argentina. *Plant Disease* 88:1383.
- Wright, E.R.; Vasquez, P.; Ascitutto, K.; Pérez, A.; Diano, M.; Ciorca, P.; Damiens, J.; Crelier, A.; Panigo, L.; Barrientos, M.E.; Rivera, M.C. & Pérez, B.A. 2007. Hongos presentes en el estado vegetativo de plantaciones de arándano (*Vaccinium corymbosum*) en Argentina. En Actas 11º Congreso Nacional de Horticultura. Montevideo. Uruguay. Código 147.