

MODELACIÓN BIOLÓGICA Y MATEMÁTICA (NO LINEAL) PARA ESTIMAR LA PROBABILIDAD DE DISPERSIÓN DE LA MANCHA PÚRPURA DEL AJO

Guadalupe Gómez Izaguirre,¹ José Cortinas,¹ Magaly Suárez,² Jorge Monter³ y Liudmila Llanes¹

¹ Instituto de Investigaciones de Sanidad Vegetal. Calle 110 no. 514 e/ 5a. B y 5a. F, Playa, Ciudad de La Habana, Cuba, CP 11600

² LAPROSAV

³ ETPP Güines

RESUMEN

El principal condimento de la comida cubana es el ajo (*Allium sativum* L.), cultivo que actualmente se siembra en todas las provincias, pero son Sancti Spiritus y La Habana las que cultivan las mayores áreas. La mancha púrpura (*Alternaria porri*) es la enfermedad más importante que tiene el cultivo. Las aplicaciones químicas para su control se realizan a partir de la observación de los primeros síntomas. Se trabajó en la construcción del modelo biológico y en el ajuste de un modelo no lineal en función del tiempo. Con las curvas de desarrollo de la enfermedad en Güines y Melena del Sur (1981-1992), y con el porcentaje de distribución, fenología y diferentes variables meteorológicas, se realizó un análisis matemático utilizando una modelación estadística para datos binomiales. El proceso de estimación de la tasa de dispersión (λ) se realizó utilizando cinco funciones de enlace, tres del tipo log-log, una logit y una log. El ciclo biológico del proceso infeccioso se explica, y se determinó que el modelo Logístico se ajusta mejor que el de Gompertz al comportamiento de la enfermedad. Finalmente fue seleccionado un modelo que mediante una función exponencial monótona creciente describe la probabilidad de la tasa de dispersión de la enfermedad:

$$P = 1 - e^{-\beta_0 - \beta_1 \text{Log}(\lambda) - \beta_2 \text{Log}(\lambda) - \beta_3 \text{Log}(\lambda) - \beta_4 \text{Log}(\lambda) - \beta_5 \text{Log}(\lambda) - \beta_6 \text{Log}(\lambda)}$$

Palabras clave: ajo, *Allium sativum*, mancha púrpura, *A. porri*, pronóstico, modelos biológico y matemáticos

ABSTRACT

The major seasoning in Cuban food is garlic (*Allium sativum* L.). It is grown in all provinces of Cuba being Sancti Spiritus and Havana the provinces leading this crop. The purple blotch (*Alternaria porri*) is the major disease for this crop and the chemical control is used as the first symptoms are recorded. It was worked in the construction of a biological model and it was adjusted to a non-linear model in function of time. With the curves of disease development in Güines and Melena del Sur (1981-1992) and the percentage of distribution, age and different meteorological variables it was made a mathematical analysis with a statistical modelling for binomial data. The determination of the scattering rate (λ) was carried out using five link functions, three of them being log-log functions, one a logit function and the other a log one. The biological cycle of the infectious process is explained and it is shown that the Logistic model is better adjusted to the disease behavior than the Gompertz model. Finally, it was selected a model using an exponential monotone crescent function for the description of probability of the scattering rate disease:

$$P = 1 - e^{-\beta_0 - \beta_1 \text{Log}(\lambda) - \beta_2 \text{Log}(\lambda) - \beta_3 \text{Log}(\lambda) - \beta_4 \text{Log}(\lambda) - \beta_5 \text{Log}(\lambda) - \beta_6 \text{Log}(\lambda)}$$

Key words: garlic, *Allium sativum*, purple blotch, *A. porri*, forecast, biological and mathematics models

INTRODUCCIÓN

El ajo (*Allium sativum* L.) es el principal condimento de la comida cubana desde hace muchos años. Fue introducido desde principio del siglo XIX en algunas localidades de La Habana y de la actual provincia de Sancti Spiritus, y posteriormente fue diseminado en toda la isla [I. I. H. Liliana Dimitrova, 1998]. Se siembra en el período seco o etapa invernal. Antes de la década del ochenta se importaban grandes cantidades de bulbos de ajo, y luego se decidió que el país debía autoabastecerse, de forma que comenzaron a sembrarse grandes áreas donde era tradicional la cosecha de esta planta

por pequeños agricultores, como es el caso de Guira de Melena en La Habana y Banao en Sancti Spiritus.

La mancha púrpura causada por *Alternaria porri* (Ellis) Cif. es la principal enfermedad infecciosa que afecta al cultivo del ajo y la cebolla en Cuba. Las aplicaciones químicas para su control se realizan a partir de la observación de los primeros síntomas de acuerdo con la metodología de señalización [Rodríguez, 1978], la cual se utiliza al no existir un modelo de pronóstico que brinde la posibilidad de alertar cuando van a ser observados los primeros síntomas de la enfermedad, de forma que el

número de tratamientos químicos para contrarrestar el efecto que ocasiona el hongo, se eleva a más de veinte en todo el ciclo del cultivo. El hecho de poseer un instrumento que permitiera contribuir a disminuir las pérdidas y optimizar el número de tratamientos químicos para tratar de disminuir la carga química al ambiente, y de esta forma cooperar a la producción de alimentos y una atmósfera menos contaminada, sirvió de estímulo para obtener un modelo de predicción de los primeros síntomas de *A. porri* y así realizar detecciones tempranas de la enfermedad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó en la búsqueda de información biológica en artículos científicos, informes de investigaciones, libros y otros, referida a la influencia de las principales variables meteorológicas sobre las diferentes fases del ciclo de infección de *A. porri*. Los datos fueron organizados y analizados. Se compararon las condiciones climáticas necesarias para el desarrollo del proceso epifitótico de la enfermedad y las que realmente ocurren, específicamente en la etapa invernal.

Se evaluaron semanalmente diferentes dinámicas de la mancha púrpura en 16 parcelas experimentales sin aplicaciones de fungicidas en la Cooperativa de Producción Agropecuaria Gilberto León en San Antonio de los Baños en 1991-1992. Además, fueron seleccionadas 23 curvas de desarrollo de la enfermedad de campos estacionarios (áreas de producción) de las localidades de Güines y Melena del Sur desde la campaña del cultivo 1981-1982 hasta 1991-1992. Se realizaron análisis de regresión a la información obtenida para determinar si los datos de la enfermedad en función del tiempo se ajustaban mejor al modelo Logístico ($Y = a / (1 + b \cdot \exp(-r \cdot t))$) o al de Gompertz ($Y = a \cdot \exp(-b) \exp(-k \cdot t)$), recomendados por Zadocks y Schein (1979) para modelar epifitotias de interés compuesto en función del tiempo. Se consideró como variable dependiente la intensidad de ataque de la mancha púrpura expresada en fracción, y como independiente el tiempo medido en días de plantado el cultivo. Se utilizó el programa estadístico STATISTICA versión 4.

Se realizó un análisis matemático utilizando la modelación estadística para datos binomiales recomendado para enfermedades infecciosas [Anderson y May, 1986; Cortiñas y Shkedy, 1999] con el objetivo de determinar las relaciones entre el indicador biológico (por ciento de distribución), la edad del cultivo (días de plantado) y las variables meteorológicas (temperatura máxima, mínima y media promedio, la humedad relativa máxima, mínima y media promedio, y el total de lluvia y días lluviosos siete días antes de cada muestreo) desde la campaña 1981-1982 hasta 1991-1992, con 23 curvas de desarrollo de la enfermedad de Güines y Melena del Sur, ambas de La Habana. La información se organizó según la edad del cultivo y se

relacionó con el promedio de la distribución de la enfermedad en fracción (considerada como la probabilidad de infección) y de la lluvia semanal y, para el resto de las variables climáticas se tuvo en cuenta la moda. El método sustenta que la probabilidad de dispersión puede ser expresada como $p = 1 - \exp(-\lambda \cdot a)$, donde λ es la tasa de dispersión y a es la edad del cultivo. El proceso de estimación de λ se realizó mediante el ajuste del modelo para datos binomiales, para lo cual se utilizaron cinco funciones de enlace, tres del tipo log-log, una logit y una log. Las tres funciones de enlace del tipo log-log tienen en cuenta diferentes estructuras para modelar λ , la primera considerándola como una función constante de la edad, la segunda como una función monótona de la edad y la tercera como una función dependiente de tres grupos de edades. El procesamiento se realizó con el paquete estadístico SAS System [SAS/STAT, 1988]. Para la selección del modelo de mejor ajuste se tuvieron en cuenta los valores más bajos del estadístico de AKAIKE y del propuesto por Swarts [Netter *et al.*, 1989].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ciclo biológico de *Alternaria porri* comprende varias fases, y en cada una de ellas ocurren diferentes procesos y subprocesos que se encuentran influenciados por las condiciones climáticas existentes. A continuación se relacionan y explican cada uno de ellos de acuerdo con la revisión realizada.

Infección. Germinación de los conidios: Ocurre entre los primeros 46-60 minutos [Ellis and Holliday, 1970], de 5 a 40°C, con óptimo de 25 a 30°C [Bruner, 1920; Rodríguez *et al.*, 1991]. El umbral mínimo de HR está entre 76 y 78% [Rodríguez *et al.*, 1991]. Los rayos del sol retardan o detienen el subproceso, por lo que ocurre principalmente de noche o en días nublados y en presencia de agua atmosférica [Nolla, 1927]. Los conidios son viables al año de formados [Messian y Lafon, 1967]. **Penetración del tubo germinativo:** Forma apresorios para su entrada por los estomas con óptimo entre 20 y 27°C [Nolla, 1927; Bock, 1964; Ellis and Holliday, 1970]. Las hojas son más susceptibles a medida que envejecen [Miller, 1983]. **Colonización de las hifas dentro del tejido de la hoja:** Everts y Lacy (1996) observaron hifas seis horas después de la inoculación (el 2% de los conidios formó hifas y el 0,5% formó lesiones visibles). Sólo son sensibles las hojas adultas, por lo que la invasión progresa lentamente pero de forma segura con cada lluvia [Messian y Lafon, 1967]. Nolla (1927) señaló la necesidad de agua atmosférica para la colonización. El rango óptimo para el crecimiento micelial está entre 20 y 27°C [Bock, 1964]. **Formación de lesiones:** Las lesiones típicas pueden observarse con altas HR y temperaturas entre 17 y 25°C, y cuando las humedades son bajas, generalmente se forman unas manchas esté-

riles denominadas *pecas blancas* [Bock, 1964]. El mismo autor señala que la tendencia al desarrollo de este último tipo de mancha responde a un período de incubación corto y viceversa en el caso de las manchas púrpuras (más de seis horas).

Esporulación. Formación de esporas: Puede ocurrir entre 6.1 y 38°C, con óptimo de 25-27°C [Messian y Lafon, 1967]. Se requiere una HR alta con valores comprendidos entre 75-100%, y aunque entre 75-85% el número de esporas formado es bajo, a medida que aumenta la HR este número también aumenta [Everts y Lacy, 1990]. Es necesaria la luz directa, pero con sólo dos horas de luz solar la esporulación puede ser efectiva [Ellis and Holliday, 1970]. **Maduración de las esporas:** Según Everts y Lacy (1990) los conidios iniciales fueron observados nueve horas después de la inoculación y el desarrollo de los septos 12 horas después, pero sólo a las 15 horas aparecieron completamente maduros.

Diseminación. Liberación de las esporas: Los mayores períodos de liberación de los conidios presentan una periodicidad diurna, con un máximo de concentración entre las ocho de la mañana y las dos de la tarde, liberándose pocas esporas entre las ocho de la noche y las seis de la mañana [Ellis and Holliday, 1970]. **Dispersión de los conidios:** La enfermedad aparece a los 60 días de siembra aproximadamente, en la etapa de inicio del bulbo o cercano a él [Ariosa et al., 1986]. La transmisión se incrementa con las lluvias y el viento [Ellis and Holliday, 1970]. El patógeno se mantiene de una estación a otra como micelio en los restos de plantas enfermas sobre el suelo o como esporas, las que pueden mantenerse viables mucho tiempo (hasta ocho meses). Las infecciones también puede iniciarse por los

conidios transportados por el viento [Nolla, 1927; Messian y Lafon, 1967].

De forma que, temperaturas diurnas entre 25 y 30°C, nocturnas cercanas a esas mismas, alta HR del aire y lluvia en cultivos de más de 50 días favorecen la infección, mientras que con temperaturas entre 25 y 27°C, períodos alternos de humedad-sequedad y al menos dos horas de luz solar, las esporas pueden ser observadas en un término de 15 horas después de la penetración. La liberación de los conidios ocurre cuando comienza a aumentar la temperatura y descender la humedad (ocho de la mañana y las dos de la tarde) en el día. Estas estructuras se diseminan por el viento y la lluvia, y pueden mantenerse viables en los restos de cosecha. La enfermedad generalmente no se observa antes de los 50 días de sembrado el cultivo.

El resultado del análisis para tratar de ajustar un modelo no lineal en función de la edad de las plantas en las 16 parcelas experimentales sin aplicación de tratamientos químicos para el control de la enfermedad indicó que la intensidad de la enfermedad (fracción de tejido enfermo) en función del tiempo (días de sembrado) se ajustó más al modelo Logístico que al Gompertz, ya que presenta coeficientes de determinación mayores a 0,93 (Tabla 1). De tal forma, las epidemias describen una curva en forma de sigmoide simétrica con asíntota y punto de inflexión a 0,5 al valor de la asíntota [Zadock and Schein, 1979]. Las asíntotas variaron en función de la epidemia desde 0,43 hasta 128,88, y en el caso del modelo de Gompertz varió desde 2,16 hasta 20 382,33, valores mucho más lejano a 1 que en el modelo Logístico, razón también por lo cual consideramos que este modelo se ajusta más que el de Gompertz.

Tabla 1. Coeficientes de determinación de la fracción de tejido enfermo en función del tiempo en los modelos probados

Modelo	Rango de R ²	Media de R ²	Rango de la asíntota	Rango de <i>k</i> o <i>r</i>
Logístico	0,93-0,99	0,97	0,43-128,88	0,05-0,12
Gompertz	0,87-0,99	0,95	2,16-20382,33	0,004-0,04

La tasa de infección aparente o logística (*r*) del modelo Logístico para cada epidemia varió entre 0,05 y 0,12 unidades/día, lo cual indica que existieron casos en que la velocidad de crecimiento duplicó a 1 con respecto a la otra. En el caso del modelo de Gompertz, la *k* (tasa de infección relativa) varió desde 0,004 hasta 0,04. Es evidente que existe un mejor ajuste y una mayor eficiencia de la *r* que de la *k* para caracterizar las epidemias de mancha púrpura en el ajo en La Habana.

Con respecto al resultado de los campos de producción, la intensidad en función de la edad del cultivo se ajustó mejor al modelo Logístico (Fig. 1) que al Gompertz (Fig. 2). El modelo Logístico alcanzó un coeficiente de determinación de 0,8084, contra 0,7951 para Gompertz, mientras que las asíntotas fueron 8,66 y 0,0629, respectivamente. Las aplicaciones químicas en estos campos dieron lugar al valor extremadamente bajo de la *r*. Este resultado confirma lo obtenido con las parcelas experimentales donde no se aplicaron tratamientos fungicidas.

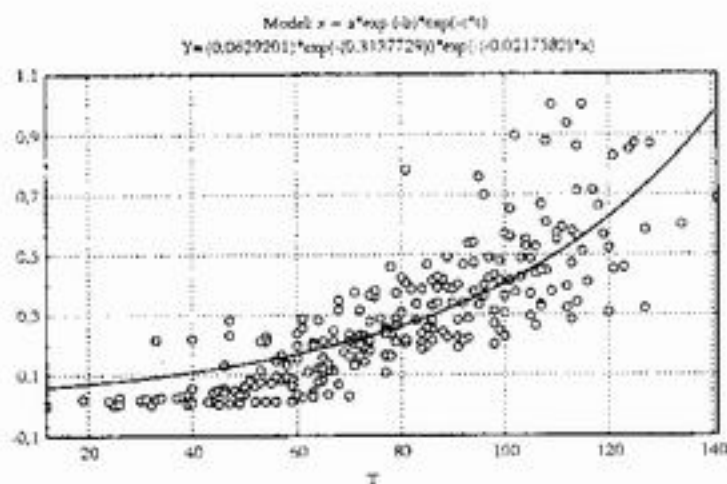


Figura 1. Ajuste de diferentes curvas de desarrollo de la mancha púrpura del modelo Logístico.

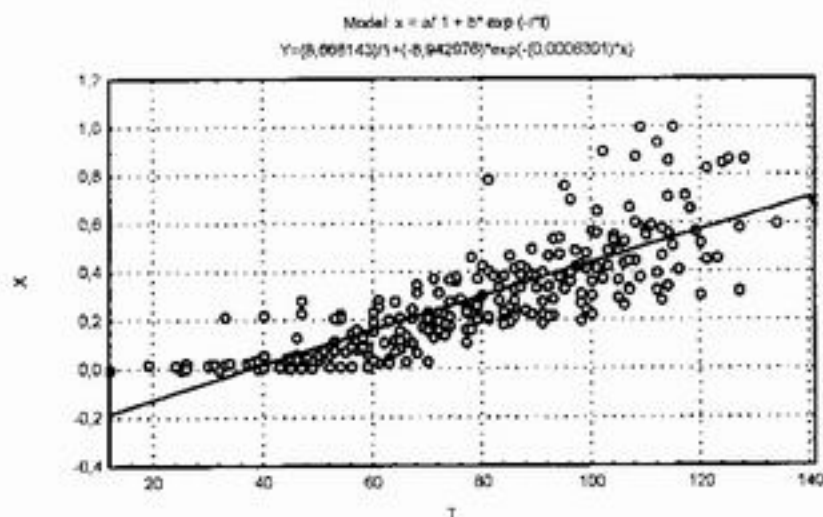


Figura 2. Ajuste de diferentes curvas de desarrollo de la enfermedad al modelo de Gompertz.

El resultado del análisis estadístico para la modelación matemática no lineal de la probabilidad de dispersión de la enfermedad, donde se ajustaron cinco modelos diferentes, resultó como mejor ajuste aquel en el que se consideró a una función exponencial monótona creciente para describir la tasa de dispersión, donde interviene la edad del cultivo, la temperatura máxima y media, la humedad relativa máxima y media, así como los días de precipitación, siete días antes de cada evaluación, cuya expresión matemática es:

$$P = 1 - e^{-(\beta_0 + \beta_1 \cdot Edad + \beta_2 \cdot Tmax + \beta_3 \cdot Tmed + \beta_4 \cdot HRmax + \beta_5 \cdot HRmed + \beta_6 \cdot DDP)}$$

$$P = 1 - \exp(-\exp(-10.3622) \cdot (Edad^{3.2479}) \cdot \exp(0.1576Tmax - 0.2179Tmed - 0.156HRmax + 0.1003HRmed - 0.169DDP))^{Edad}$$

Las variables climáticas temperatura máxima y media, y la humedad relativa máxima y media aportan de ma-

nera positiva, y el resto de forma negativa. Los parámetros para las variables relacionadas en el modelo mostraron un alto nivel de significación en la prueba de X^2 (Tabla 2). Las variables que menos aportan al modelo son la temperatura máxima y la humedad relativa media, pero con una probabilidad en la prueba de X^2 mayor de 0,02.

El modelo logró un buen ajuste, siguiendo los patrones de crecimientos y decrecimientos de las observaciones originales (Fig. 3). El análisis de los residuos corroboró la confiabilidad del modelo al distribuirse los datos uniformemente sin ningún patrón de comportamiento (Fig. 4). Se comprueba la utilidad de la metodología de Cortiñas y Shkedy (1999) para modelar la tasa de dispersión de epidemias de las plantas con datos binomiales. El modelo permite conocer la probabilidad de encontrar plantas enfermas en el campo de forma dinámica en dependencia de la edad de la planta y las con-

condiciones climáticas concurrentes, y por consiguiente inferir la intensidad de ataque, variable estrechamente relacionada con la distribución como se ha demostrado anteriormente. El conocimiento de la probabilidad de dispersión tiene gran utilidad, ya que permitirá tomar

decisiones para las medidas de control. Una rápida dispersión de la enfermedad redundará en una severidad de ataque alta si las medidas de control no logran la efectividad requerida y estará determinada por la ocurrencia de condiciones climáticas favorables.

Tabla 2. Análisis de máxima igualdad estimada para los parámetros del modelo de mejor ajuste

Variables	Parámetro estimado	Estadístico de Wald	Error estándar	Nivel de probabilidad
b0 (intercepto)	-10,3622	54,2671	1,4066	0,0001
b1 (edad)	4,2479	1 486,2846	0,1102	0,0001
b2 (temp. máxima)	0,1576	18,3679	0,0368	0,0001
b3 (temp. media)	-0,2179	29,7089	0,0400	0,0001
b4 (HR máxima)	-0,1560	56,5644	0,0207	0,0001
b5 (HR media)	0,1003	46,2287	0,0147	0,0001
b6 (días de precipitación)	-0,1690	34,1487	0,0289	0,0001

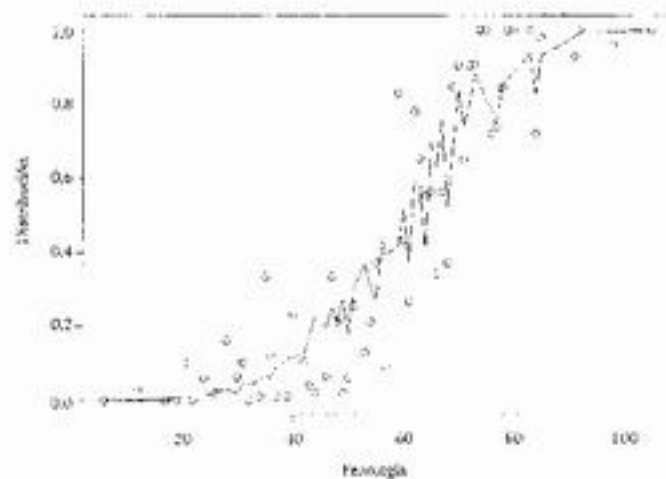


Figura 3. Modelo ajustado a los patrones de crecimiento y decrecimiento de los datos originales.

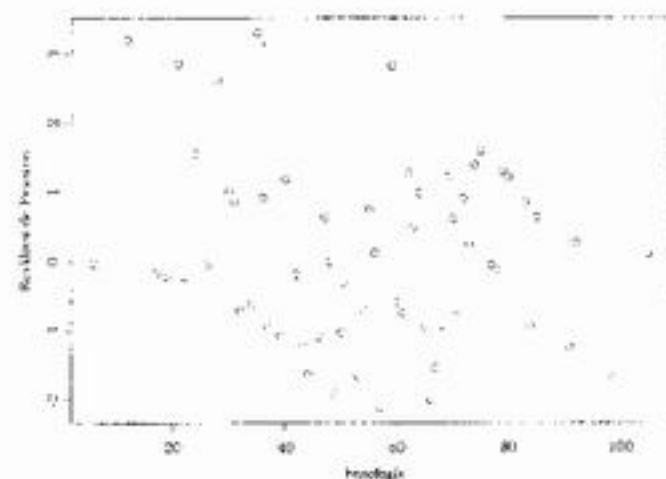


Figura 4. Resultado del análisis de los residuos del modelo ajustado.

CONCLUSIONES

• Temperaturas diurnas entre 25 y 30°C, nocturnas cercanas a esas mismas, alta humedad relativa del aire y lluvia en cultivos de más de 50 días favorecen la infección de *A. porri*.

• Pueden ser observadas esporas de *A. porri* después de 15 horas de la penetración del tubo germinativo. Cuando las temperaturas se encuentran entre 25 y 27°C, existen periodos alternos de humedad-sequedad y al menos hay dos horas de luz solar.

• La liberación de los conidios ocurre cuando comienza a aumentar la temperatura y descender la humedad (ocho de la mañana y dos de la tarde) en el día. La diseminación ocurre por el viento y la lluvia, y pueden mantenerse viables en los restos de cosecha.

• Tanto en áreas experimentales como en producción, el modelo que tuvo un mejor ajuste para describir el comportamiento de la enfermedad fue el Logístico.

• El resultado del análisis estadístico para la modelación matemática no lineal de la probabilidad de dispersión de la enfermedad, resultó como mejor ajuste aquel en el que se consideró a una función exponencial monótona creciente para describir la tasa de dispersión, donde interviene la edad del cultivo, la temperatura máxima y media, la humedad relativa máxima y media, así como los días de precipitación, siete días antes de cada evaluación y cuya expresión matemática es:

$$P = 1 - e^{-(\beta_0 - \beta_1 \text{Edad}^{\beta_2} - \beta_3 \text{Tmax} + \beta_4 \text{Tmed} + \beta_5 \text{HRmax} - \beta_6 \text{HRmed} + \beta_7 \text{DDP})}$$

$$P = 1 - \exp(-\exp(-10,3622) * (\text{Edad}^3,2479) * \exp(0,1576 \text{Tmax} - 0,2179 \text{Tmed} - 0,156 \text{HRmax} + 0,1003 \text{HRmed} - 0,169 \text{DDP})) * \text{edad}$$

REFERENCIAS

Anderson, R. M.; R. M. May: «The Invasion, Persistence and Spread of Infectious Diseases Within Animal and Plant Communities», *Philosophical Transaction of the Royal Society*, 314: 533-570, 1988.

Ariosa Terry, M. O.; E. Perdomo; L. Herrera: «Dinámica poblacional de la mancha púrpura (*A. porri* Ell.) en cebolla en la región de Banao, Sancti Spiritus», *Centro Agrícola* 13 (3): 45-50, Villa Clara, 1996.

Bock, R. K.: «Purple Blotch (*Alternaria porri*) of Onion in Kenya», *Ann. Appl. Biol.* 54, 303-311, 1984.

Bruner, S.: *Lista preliminar de las enfermedades de las plantas de importancia económica para Cuba*. Informe de la Estación Experimental Agronómica, La Habana, 1920.

Cortñas, J.; Z. Shkedy: «Estimation of the Force of Infection for Hepatitis A and Hepatitis B», Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement of the Degree of Master of Science in Biostatistics, Limburg Universitair Centrum, Diepenbeek, Bélgica, October 1999.

Ellis, M. B.; P. Holliday: *CMI. Descriptions of Pathogenic Fungi and Bacteria*. Sept. 25, No. 284, Commonwealth Mycological Institute, England. Eds. The Eastern Press Ltd., London and Reading, 1970.

Everst, K. L.; M. L. Lacy: «The Influence of Dew Duration, Relative Humidity and Leaf Senescence on Conidial Formation and Infection of Onion by *Alternaria porri*», *Phytopathology* 80 (11): 1203-1207, Estados Unidos, 1990.

—: «Factors Influencing Infection of Onion Leaves by *A. porri* and Subsequent Lesion Expansion», *Plant Disease* (80) (3): 278-280, Estados Unidos, 1996.

L. I. H. Liliana Dimitrova: 25 Aniversario, Instituto de Investigaciones Hortícolas Liliana Dimitrova, La Habana, 1998, pp. 25 y 26.

Messian, C. M.; R. Lafon: *Enfermedades de las hortalizas*, Oikostan, Madrid, 1967.

Miller, M. E.: Relationships Between Onion Leaf Age and Susceptibility to *A. porri*, *Plant Disease* 67 (3): 284-286, Estados Unidos, 1983.

Neter, J.; W. Wasserman; M. H. Nutter: *Applied Linear Regression Models*, Irwin, Boston, 1989.

Nolla, J. A. B.: «A New *Alternaria* Disease of Onion (*Allium cepa* L.)», *Phytopathology* 17: 115-132, Estados Unidos, 1927.

Rodríguez, F.: «Metodología de señalización de la mancha púrpura en ajo y cebolla», *Metodologías de señalización y pronósticos de plagas y enfermedades*, Instituto de Investigaciones de Sanidad Vegetal, MINAGRI, Cuba, 1978.

Rodríguez, F.; I. Herrera, E. Vinagera: «Influencia de la temperatura y la humedad relativa en la germinación de los conidios de *A. porri* causante de la mancha púrpura de la cebolla», *Ciencia y Técnica en la Agricultura, Serie Protección de Plantas* 1 (2): 53-61, La Habana, 1991.

Zadoks, J. C.; D. R. Schein: *Epidemiology and Plant Disease Management*, Oxford University Press, Oxford, 1979.