Propuesta de modelos predictivos del brote de la Sigatoka Negra para las plantaciones de plátano al sur del Lago de Maracaibo, Venezuela

Proposal of predictive models of Black Sigatoka for plantain plantations at south of Maracaibo Lake, Venezuela

Juan A. FREITEZ T.[1], **Magdiel ABLAN B.**[2] **y Carlos GÓMEZ** [3]

[1]Centro de Investigación de Procesos (CENIPRO), Universidad Nacional Experimental Politécnica (UNEXPO), [2]Centro de Simulación y Modelos (CESIMO), Universidad de los Andes (ULA) e [3]Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA). E-mails: jfreitez@unexpo.edu.ve; jfreitez@gmail.com; mablan@ula.ve y cgomez@inia.gob.ve ✉ Autor para correspondencia

Recibido: 23/05/2008
Primera revisión recibida: 26/04/2009
Fin de primer arbitraje: 07/04/2009
Aceptado: 13/08/2009

RESUMEN

La Sigatoka Negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) es el principal problema fitosanitario del cultivo de musáceas en el país. El desarrollo de modelos para establecer un sistema de pronóstico temprano del brote de la enfermedad es una de las medidas de control más eficaces. El objetivo de este trabajo fue elaborar un modelo que permita en un futuro desarrollar un sistema de pronóstico de la enfermedad en los cultivos de plátano de la zona. Los modelos relacionan indicadores biológicos de ocurrencia con datos meteorológicos recolectados en la Estación Local Chama del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas de Venezuela. Para su desarrollo se consideraron técnicas de análisis de datos y se elaboraron algoritmos que permiten la búsqueda iterativa de correlaciones de registros de días consecutivos (ventanas temporales) de las variables agro-climáticas y las variables biológicas. Los modelos desarrollados presentan una dinámica estacional, siendo diferentes si se consideran los datos globalmente o si subdividen y se ajustan modelos diferentes para la temporada seca y lluviosa. Las variables humedad relativa, precipitación, velocidad del viento y energía solar son las que mejor predicen la severidad de la enfermedad para la temporada seca ($r^2 = 0,79$), con una antelación de hasta 29 días mientras en el caso de la temporada lluviosa lo hacen la temperatura del aire, evapotranspiración, humedad relativa y precipitación ($r^2 = 0,73$) con 43 días de antelación. Considerados globalmente es posible predecir la variable Hoja Más Joven Manchada en un lapso de 23 días tomando en consideración la humedad relativa y la energía solar.

Palabras clave: Pronóstico de Sigatoka, *Mycosphaerella fijiensis*, Variables climáticas.

ABSTRACT

Black Sigatoka (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) has been causing problems to the national Musacea producers. The development of models, that allow establishing an early prognosis system for the outbreak of the disease, is one of the most effective control measures. The objective of this study was to elaborate a model that would allow in the future the development of a prognostic system for the outbreak of Black Sigatoka in plantains crops in the area. These models relate biological indicators of occurrence of the disease with meteorological data gathered in the Estación Local Chama of Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA),. For the development of these models, techniques on data analysis were considered and algorithms that allow the iterative search for correlations between records of consecutive days (temporary windows) of the agro-climatic variables and the biological variables were elaborated. The developed models presented a seasonal dynamics. Different models are obtained if data is considered globally or discriminated according to the dry and wet seasons. Relative humidity, precipitation, wind velocity and solar energy are the variables that best predict the severity of the disease for the dry season 29 days ahead ($r^2 = 0.79$); while air temperature, evapotranspiration, relative humidity and precipitation are the ones that predict severity 43 days ahead for the rainy season ($r^2 = 0.73$). Taken globally, it is possible to predict spotted youngest leaf in 23 days ahead using relative humidity and solar energy.

Key words: Prognosis of Sigatoka, *Mycosphaerella fijiensis*, climatic variables.

INTRODUCCIÓN

En Venezuela, el cultivo del plátano es considerado un rubro de importancia económica y alimentaria, debido a que se distribuye en casi todo el país, aunque las zonas de mayor importancia se encuentran en los estados Barinas, Mérida, Trujillo y Zulia, ubicadas al occidente del país (Abreu *et al*.,

2007). La zona Sur del Lago de Maracaibo, es una región de gran potencial para la producción agrícola del país, donde el cultivo de plátanos y bananos es la segunda actividad agro-productiva, y representa el 55% de la superficie sembrada a nivel nacional, generadora de puestos de trabajo y una dinámica actividad comercial (Nava, 1997). El sistema productivo de este rubro se ha visto afectado por numerosas enfermedades; sin embargo, la Sigatoka Negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) es el problema fitosanitario de mayor repercusión en la reducción de los rendimientos y aumento de los costos de producción (Zabala y Bermúdez, 1999).

La Sigatoka Negra (*M. fijiensis* Morelet) es considerada mundialmente como una de las enfermedades más destructivas en los cultivos de musáceas (plátanos y bananos), ya que produce necrosis foliar en las plantas de plátano y banano, y por consiguiente los frutos no poseen las características necesarias para su consumo o para una efectiva actividad comercial. Los productores comerciales han logrado disminuir la severidad de la Sigatoka Negra aplicando controles basados en tratamientos químicos y prácticas culturales en paralelo. Estos controles representan el 48,56% del costo de producción de las plantaciones de plátanos para la zona Sur del Lago de Maracaibo (Zabala y Bermúdez, 1999). Además, la aplicación de controles químicos trae como consecuencia efectos graves sobre el ambiente y riesgo de generación de resistencia del hongo a los fungicidas. Fouré (1994), Gauhl y Pasberg-Gauhl (1994), Mourichon y Zapater (1990), entre otros, han constatado que el desarrollo o evolución de la enfermedad se ve influenciada por algunos factores agro-climáticos tales como: la humedad relativa, precipitación, radiación solar, punto de rocío, velocidad del viento, etc. Estos hallazgos han dado como resultado el desarrollo de modelos de predicción del comportamiento de la Sigatoka Negra, los cuales permiten, mediante el pronóstico temprano de la enfermedad, reducir la frecuencia de los tratamientos químicos; además, dichos modelos son muy específicos para cada microclima, lo que conlleva a desarrollar para cada región su propio modelo de predicción.

El objetivo del presente estudio fue elaborar un sistema de pronóstico del brote de la Sigatoka Negra (*M. fijiensis* Morelet) en los cultivos de plátano de la zona Sur del Lago de Maracaibo mediante el uso de modelos predictivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Cultivo y detalles del sitio

El plátano Hartón se cultiva en toda Venezuela y tiene una gran importancia económica (Zabala y Bermúdez, 1999), lo que motivó la realización del presente trabajo. Se utilizaron datos biológicos de la enfermedad Sigatoka Negra, provenientes de una parcela de plátano (*Musa* AAB subgrupo plátano cv. Hartón), de cinco años de edad, con un área de 1,5 ha y densidad de 1800 plantas ha^{-1}, pertenecientes al Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), Estación Local Chama, localizada en estado Zulia, en las coordenadas: Latitud: 08°43'27" N, Longitud: 71°44'33" O y altitud: 54 m.s.n.m. Los cultivos no fueron sometidos a aplicaciones de agroquímicos para el control de la enfermedad pero si recibieron un manejo agronómico normal del cultivo: fertilización y las demás prácticas como deshoje, deshije, combate de malezas manual y químico.

Se obtuvieron registros de las variables biológicas para el lapso 2002-2004 y de las climatológicas durante el período 2001- 2004 (Gómez *et al*., 2001).

Datos meteorológicos

Los registros de los datos meteorológicos fueron obtenidos de una estación automática instalada en la Estación Local Chama-INIA, cada 30 ó 60 minutos dependiendo del tipo variable (Gómez *et al*., 2001). Estos datos se encuentran publicados en la Red Bioclimática del estado Mérida (http://www.cecalc.ula.ve/redbc). Se consideró que todos los valores extremos encontrados en los registros eran admisibles y acordes a la naturaleza estocástica de los mismos, mientras que los datos ausentes no son considerados o estimados para el desarrollo de los modelos. Once (11) variables climatológicas fueron recolectadas diariamente durante el experimento; estas fueron: Temperatura máxima del aire (Tmax; °C), Temperatura mínima del aire (Tmin; °C), Temperatura promedio (Tp; °C), Evapotranspiración (ET; mm), Radiación solar (RS; W/m²), Energía solar incidente (E.S; Ly), Presión barométrica (P; mmHg), Velocidad del viento (Vv; Km/s), Precipitación (P; mm), Humedad relativa (Hr; %) y Punto de rocío (Pr; °C). La base de datos de las variables climáticas llevadas a cabo cada 30 ó 60 minutos fue transformada en una base de datos

donde los registros corresponden a promedios diarios. Se establecieron dos alternativas para la variable precipitación, una donde se consideró como el valor de la misma el promedio diario y otra el acumulado del día. Los registros fueron discriminados por temporada de lluvia (Mayo a Octubre) y sequía o seca (Noviembre a Abril), obteniéndose tres bases de datos: una donde se contempla todos los datos, y dos donde los registros están discriminados según la temporada climática.

Datos biológicos

Los registros de los datos biológicos de la enfermedad fueron obtenidos cada 7 u 8 días en 10 plantas próximas a la floración seleccionadas al azar, empleando la metodología propuesta por Stover modificada por Gauhl (Gauhl y Pasberg-Gauhl, 1994), para los indicadores:

Hoja más joven manchada (HMJM): corresponde a la primera hoja totalmente abierta contada de arriba hacia abajo, que presenta 10 o más lesiones discretas y maduras o un área necrosada con 10 centros secos de color claro.

Severidad de la enfermedad (SE): un índice del área foliar de la planta infectada por el patógeno, calculado en base en el área individual necrosada de las hojas de la planta, evaluada con el uso de una escala de daño propuesta por Stover modificada por Gauhl.

Método de preaviso biológico (Marin y Romero, 1994): consiste en evaluar diez plantas seleccionadas desde hijos con cinco hojas con un ancho mayor o igual a 10 cm, que eran evaluadas hasta la emergencia de la bellota, momento en el cual eran sustituidas por otras, donde se observaban las hojas dos, tres y cuatro para obtener las variables: Estado de evolución (EE), que es la expresión del desarrollo de la enfermedad obtenida de la evaluación semanal del crecimiento de la planta y la presencia de los síntomas de la enfermedad, obtenida de una escala de síntomas de la enfermedad, la Suma Bruta (SB), Suma Bruta de la Hoja 2 (SB2), Suma Bruta de la Hoja 3 (SB3) y Suma Bruta de la Hoja 4 (SB4), corresponden a la suma de los valores de la enfermedad generados con los coeficientes arbitrarios de severidad, indicados por el método de tres o una hoja según sea el caso.

Descripción del algoritmo

El algoritmo aplicado está basado en la idea original de Coakley *et al*., (1982), el cual fue desarrollado para encontrar las variables climáticas que estaban más relacionadas con la gravedad de la enfermedad. La base de este algoritmo es la búsqueda iterativa de correlaciones entre la enfermedad y las variables climáticas para lo cual se lleva a cabo un análisis estadístico donde las variables independientes y dependientes son las variables climáticas y biológicas, respectivamente, ambas registradas cronológicamente. Sin embargo, es posible que el desarrollo de la enfermedad no se deba sólo a un evento en particular, si no a un conjunto de estos. Así mismo, esto no se refiere únicamente a la suma de eventos de diferentes variables climáticas, sí no también a la suma de eventos de una misma variable en periodos y lapsos de tiempo diferentes que pueden afectar el desarrollo de la enfermedad. Por lo tanto, se considera para el análisis, el traslape o agrupamiento de las variables climáticas en ***m*** días consecutivos. Esta agrupación de los registros cronológicos de las variables climáticas en ***m*** días consecutivos se denomina ventanas (Figura 1). Para considerar el efecto de las ventanas en periodos de tiempo diferentes, se toma ***n*** días de diferencia entre la fecha de observación de la enfermedad y el principio de la ventana de medición de la variable climática. Estos ***n*** días de diferencia entre la medición de las variables climáticas y la medición de la variable biológica se denomina retardo temporal (Figura 1). En este

Figura 1. Ejemplo de ventana y retardo temporal usados en el algoritmo. La amplitud ventana de las variables climática tiene 7 días y retardo respectó al día (01 de junio) de medición de la variable biológica es de 16 días.

trabajo, se considero como mínimo 14 días de antelación para predecir el comportamiento de la enfermedad y tomar acciones. Mientras para las ventanas se varió de 2 a 7 días considerándose que las mediciones de las variables climáticas son promediadas o acumuladas. Como análisis preliminar, se estableció la búsqueda de las variables climáticas que estaban más relacionadas con la gravedad de enfermedad, estableciéndose una amplitud de ventana fija de 4 días y variando el retraso de la ventana respecto a la fecha de medición de las variables biológicas hasta un máximo 60 días (para la variables biológicas que depende del ciclo de vida de las hojas) o 140 días (para aquellas que no). Como resultado de este proceso se obtuvo, para cada medición de las variables biológicas un registro de las variables climáticas promediadas o acumuladas para una amplitud fija y un retraso variable, y se buscó la correlación entre las variables biológicas y el nuevo registro de la variable climatológica. Luego se procedió a seleccionar a aquellas variables biológicas que poseyeran mayor correlación y significación estadística.

En segunda instancia, se buscó la amplitud de ventana en la cual las variables climáticas seleccionadas presentaron mayor relación con la severidad de la enfermedad ("Ventana óptima"), para ello se empleó el mismo algoritmo descrito anteriormente pero con variación de la amplitud de la ventana generándose unos nuevos registros de datos para cada caso de estudio. Esta parte del trabajo fue realizada en el software estadístico R.

Finalmente, se emplearon técnicas contempladas en la minería de datos para generar los modelos de predicción del comportamiento biológico de la enfermedad. Se utilizó la herramienta WEKA (Witten y Frank, 2005). Entre el conjunto de técnicas se seleccionó las de regresión: regresión lineal y múltiple, árboles regresión, árboles y regresión aditiva (Hernández, 2004) por permitir generar modelos muy sencillos y de fácil utilización e implementación en las zonas rurales de producción de plátanos. Este tipo de modelos lineales de predicción numérica vienen dados de la siguiente manera:

$$y_i = \alpha_1 \cdot x_1^{(n,m)} + \alpha_2 \cdot x_2^{(n,m)} + \cdots + \alpha_j \cdot x_j^{(n,m)} + \varepsilon \quad \text{Ec. 1}$$

Donde $x_j^{(n,m)}$ es el valor promediado o acumulado de la variable climatológica j, con una amplitud de ventana de m días consecutivos, la cual se encuentra con n días de retardo respecto a la fecha de medición de la variable biológica (α_j y ε se interpretan de la manera usual).

Debido al limitado volumen de datos registrados durante el periodo de las observaciones llevadas a cabo en las instalaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas en Estación Local Chama, fueron considerados todo el conjunto de datos para el desarrollo del modelo y se usó para la validación de los modelos la técnica de validación cruzada, la cual es una técnica estadística que consiste en subdividir una muestra de datos en subconjuntos de tal modo que el análisis es inicialmente realizado en uno de ellos, mientras los otros subconjuntos son retenidos para su uso posterior en la confirmación y validación del análisis inicial. Para este trabajo se planteó 10 subconjuntos de los cuales, 9 fueron usados para el desarrollo del modelo y uno para su validación. Las métricas consideradas para evaluar la bondad de ajuste de los modelos fueron el error relativo, el error absoluto y la correlación. Detalles sobre la implementación del algoritmo pueden ser consultados en Freitez (2006).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El comportamiento de la Sigatoka negra durante el periodo de evaluación considerado para la formulación de la propuesta del modelo predictivo, se mantuvo en valores promedio similares a los que se observan en las plantaciones de la zona bajo las condiciones establecidas en este estudio. La Hoja Más Joven Manchada presentó valores promedios de 11,69; 10,05 y 9,43 para los tres años de evaluación, respectivamente, con un mínimo de 8 y un máximo de 14,6. La severidad de la enfermedad tomó los valores de 17,88; 24,15 y 27,5 para los tres años respectivamente con un mínimo de 9,6 y un máximo de 39,6. Por otro lado, el Estado de Evolución presento valores de 265,51; 491,13 y 803,48 para los tres años respectivamente con un mínimo de 60 y un máximo de 2120 y la variable Suma Bruta con 346,88; 576,78 y 840,71 respectivamente para los tres años con mínimo de 33,27 y un máximo de 2181,76.

La fase de análisis univariante para seleccionar las variables con mejor correlación entre cada variable climática y cada una de la variables biológicas dio como resultado que las variables biológicas y climáticas que mejor se relacionan eran la Hoja Más Joven Manchada (HMJM) con la Energía Solar (E.S) y la Severidad de la enfermedad (SE) con

la Humedad relativa (Hr), para un periodo de exploración de 30 días, antes de la fecha de medición de la variable biológica (Cuadro 1). Consideradas individualmente y sin discriminación se obtienen correlaciones bajas y no significativas estadísticamente por lo que estos resultados no se muestran aquí.

Implementado un análisis similar, pero segregando previamente el conjunto de datos en dos grupos, según la estación lluviosa (Mayo a Octubre) o seca (Noviembre a Abril), se encontraron mejores correlaciones. El cuadro 2 presenta como ejemplo los resultados para la temporada seca. Esta diferencia puede explicarse teniendo en cuenta que la enfermedad presenta una dinámica estacional determinada por las variaciones de temperatura y precipitación a lo largo del año (Mourichon *et al*., 1997). Las variables seleccionadas en esta fase para el desarrollo posterior del modelo son similares a las consideradas en las consideradas en otros trabajos como variables con mayor efecto sobre el desarrollo y evolución de la enfermedad (Fouré (1994), Gauhl y Pasberg-Gauhl (1994), Mourichon y Zapater (1990).

Las variables seleccionadas en esta primera fase se utilizaron en la siguiente etapa para la generación de un modelo multivariante que toma en consideración el efecto simultáneo de todas ellas. Todos los modelos resultaron estadísticamente significativos ($p<0,01$).

Modelo sin discriminación

El modelo (Ec. 2) tiende a explicar el comportamiento de la hoja más joven manchada (HMJM), en función de las variables: humedad relativa durante 2 días consecutivos y con un retraso de 24 días y la radiación solar durante 7 días y con un retraso de 23 días, con un coeficiente de determinación bajo, que podría considerarse aceptable ($R^2 = 0,705$) con alta significación estadística para un $\alpha \leq 0,01$ en cada uno de los coeficientes de la ecuación.

$$HMJM = 0.2308 \cdot E.S_{(7;23)} - 0.0883 \cdot Hr_{(2,24)} + 13.724 \quad \text{Ec. 2}$$

Es decir, que se puede predecir el posible comportamiento, de la hoja más joven manchada con 23 días antes, considerándose el promedio de las mediciones durante 7 días para Energía solar y 2 días para humedad relativa (Figura 2).

Modelo para la época de sequía

La ecuación 3 de la severidad de la enfermedad Sigatoka Negra (SE) fue la variable biológica que mejor se predecía para la época seca, donde la severidad de la enfermedad está influenciada por la humedad relativa (Hr), la precipitación promedio (P.pro.), la radiación solar (R.S.) y la velocidad del viento (Vv), con un coeficiente de determinación bajo, que podría considerarse aceptable ($R^2 = 0,7922$) con alta significación estadística para un $\alpha \leq 0,01$

$$SE = 0.4095 \cdot Hr_{(14;29)} + 0.7443 \cdot Ppro_{(13;41)} + 0.0654 \cdot R.S_{(9;78)} + 0.4655 \cdot Vv_{(2;95)} - 41.193 \quad \text{Ec. 3}$$

Modelo para la época de lluvia

El modelo (Ec. 4) de la severidad de la enfermedad Sigatoka Negra (SE) en la época de lluvia, es la variable que mejor se predice, destacándose como las variables predictivas para el modelo (Ec. 4) de temporada de lluvia: la temperatura promedio (Tp), evapotranspiración (ET), precipitación acumulada, la humedad relativa (Hr), precipitación acumulada (P.A.), la correlación (Ec. 4) posee coeficiente de 0,7254 y con alta significación estadística para un $\alpha \leq 0,01$ en cada uno de los coeficientes de la ecuación.

$$SE = 0.5825 \cdot Tp_{(2;122)} - 75.5733 \cdot ET_{(9;93)} + 0.1867 \cdot Hr_{(3;71)} + 0.2671 \cdot P.A_{(11;43)} + 0.535 \cdot P.A_{(13;57)} - 0.2757 \quad \text{Ec. 4}$$

Cuadro 1. Variables seleccionadas del conjunto sin segregar, lapso de exploración de 30 días.

Variables		Ventanas (días)			
Biológicas	Climatológicas	Amplitud	Retraso	Correlación	p-valor
HMJM	Energía Solar	10	22	0,544	4,29E-14
	Humedad Relativa	3	23	0,491	2,18E-09

HMJM = Hoja Más Joven Manchada
Nota: Sólo se reportan aquella variable que posean correlación mayor a 0.4 y alta significación

Cuadro 2. Variables seleccionadas para temporada seca, lapso de exploración de 30 días.

Variables		Ventanas (días)		Correlación	p-valor
Biológicas	Climatológicas	Amplitud	Retraso		
EE	Humedad Relativa	5	16	0,454	7,11E-05
	Punto de rocío	2	16	0,525	5,09E-06
	Temperatura promedio	2	19	0,450	1,17E-04
	Velocidad del viento	2	19	0,450	1,18E-04
HMJM	Energía Solar	7	23	0,604	2,33E-09
SB	Humedad Relativa	5	16	0,485	1,80E-05
	Punto de rocío	2	16	0,560	8,24E-07
	Temperatura más baja	2	19	0,401	7,04E-04
SBH 3	Humedad Relativa	6	15	0,468	2,98E-05
	Humedad Relativa	5	23	0,471	2,61E-05
	Punto de rocío	2	16	0,520	6,52E-06
	Temperatura promedio	2	19	0,492	2,02E-05
	Velocidad del viento	4	16	0,439	4,22E-05
	Velocidad del viento	2	19	0,492	2,04E-05
SBH 4	Humedad Relativa	2	16	0,472	5,62E-05
	Punto de rocío	2	16	0,521	6,20E-06
	Temperatura promedio	2	19	0,427	2,80E-04
	Velocidad del viento	2	19	0,427	2,81E-04
SE	Humedad Relativa	6	17	0,659	2,2E-10
	Humedad Relativa	14	29	0,618	7,67E-10
	Precipitación Acumulada	14	29	0,418	8,34E-05
	Punto de rocío	2	21	0,546	1,24E-06
	Punto de rocío	14	29	0,486	4,29E-06
	Temperatura promedio	7	16	0,462	1,42E-05
	Velocidad del viento	7	16	0,458	1,71E-05

EE = Estado de evolución, HMJM = Hoja Más Joven Manchada, SB = Suma Bruta, SBH 3 = Suma Bruta de la Hoja 3, SBH 4 = Suma Bruta de la Hoja 4 y SE = Severidad de la enfermedad
Nota: Sólo se reportan aquella variable que posean correlación mayor a 0,4 y alta significación

Figura 2. Predicción del Hoja Mas Joven Manchada en el día 31 con base en mediciones de ES (energía solar) y Hr (humedad relativa). Las fechas con el patrón de color rayado indican inicio de las mediciones y con el color sólido final de las mediciones consideradas.

La bondad del ajuste obtenida en estos modelos es similar a la obtenida en investigaciones similares en el país. Hernández *et al.,* (2008) reporta correlaciones de 0,716 en la predicción de índice ponderado de infección con las variables insolación y nubosidad tomando en cuenta valores acumulados en las seis semanas consecutivas previas a la evaluación de la enfermedad. Saéz (2002), citado por Hernández *et al.,* (2008), consiguió explicar, para la misma región del Sur del Lago de Maracaibo, hasta un 76,95% de la severidad de la enfermedad con 14 índices climáticos donde destacan la temperatura del aire en la tarde, la humedad relativa de día y de noche y los eventos sin precipitación.

Dados los resultados del modelo para decidir el momento de efectuar las aplicaciones para el combate de la enfermedad, existen valores críticos que se establecen considerando el manejo agronómico aplicado en las fincas. Por ejemplo, si establecemos que el nivel crítico de la HMJM en 7, cuando el valor pronosticado por el modelo sea igual a este, se recomendaría efectuar la aplicación. Esto significa siguiendo el ejemplo de la Figura 2, se tienen 22 días de anticipación para llegar a la situación crítica, por lo que la aplicación del fungicida debe realizarse a la brevedad posible para cortar el avance de la enfermedad debido a que las condiciones climáticas son favorables para el desarrollo de la misma.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se propone un par de modelos simples para predecir la evolución de la enfermedad Sigatoka Negra basado en factores meteorológicos. Se determinó que los modelos y su ajuste varían considerablemente siguiendo el comportamiento estacional de la enfermedad. Si no se discrimina entre la temporada seca y la lluviosa, el modelo propuesto permite predecir la HMJM con 23 días de anticipación tomando en cuenta la energía solar promedio de los últimos dos días y la humedad relativa promedio de la última semana.

Si se considera la estacionalidad, se obtienen modelos diferentes para la temporada de sequía y la temporada lluviosa. Para la sequía el modelo permite explicar la severidad de la enfermedad con 29 días de antelación utilizando las variables humedad relativa, precipitación promedio, radiación solar y velocidad del viento para diferentes ventanas o lapsos de observación. En el caso de la temporada de lluvia, la severidad está relacionada con la precipitación acumulada, la temperatura promedio, la evapotranspiración y la humedad relativa pudiéndose proyectar la severidad hasta con 43 días de antelación.

Actualmente los productores de la zona aplican fungicidas una vez al mes. Si la combinación de condiciones meteorológicas detectadas por el modelo para los niveles críticos de las variables biológicas ocurren menos de 12 veces al año, se estarían en efecto reduciendo los costos y los efectos ambientales adversos que resultan de esta medida de control. En un trabajo futuro habría que evaluar el modelo propuesto en un período diferente al utilizado para desarrollar el modelo, en unas parcelas o fincas control en donde no se realicen aplicaciones de fungicidas y en otra en donde se apliquen los fungicidas de acuerdo a lo indicado en el modelo.

Sería interesante incluir en trabajos futuros la variable nubosidad que resultó significativa en las investigaciones de Hernández *et al*., (2005, 2008) y que no fue incluida en esta investigación. Además, dada la variación climática interanual y la amenaza de cambios climáticos futuros, se sugiere establecer una discriminación que no dependa tanto de la definición histórica normal entre la época lluviosa y de sequía, que fue la utilizada en este trabajo. Así mismo, los modelos propuestos deben ser reevaluados y corregidos para considerar el incremento de la resistencia de la Sigatoka Negra a los agroquímicos y por ende evitar que los niveles de infecciones aumenten. En tal sentido, es recomendable convertir estos modelos en modelos evolutivos que se encargue de corregir estas desviaciones.

AGRADECIMIENTOS

Al personal del Centro de Simulación y Modelado (CESIMO), Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes, al Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) y al Centro de Investigación de Procesos de la UNEXPO que apoyaron con sus recursos humanos y equipos este trabajo. Este proyecto ha sido financiado por el programa de la Agenda Plátano del CDCHT de la Universidad de los Andes bajo el número CVI PIC AGM01099. Igualmente los autores agradecen a FUNDACITE Mérida por el apoyo financiero brindado; a FONTAGRO-Proyecto 62/99 y Bioversity Internacional que pusieron a disposición su extensa base de información bibliohemerográfica y documental y a FUNDAYACUCHO, que financió los estudios de maestría del autor principal.

LITERATURA CITADA

Abreu, E.; A. Gutiérrez, M. Quintero, L. Molina, J. Anido, E. Ablan, R. Cartay y C. Mercado. 2007. El cultivo del plátano en Venezuela: Desde el campo hasta la mesa. Fundación Polar y CIAAL-ULA. Mérida, Venezuela.

Coakley, S. M.; W. A. Boyd and R. F. Line. 1982. Statistical models for predicting stripe rust on winter wheat in the Pacific Northwest. Phytopathology 72: 1539-1542.

Fouré. E. 1994. Leaf spot disease of banana and plantain cause by *Mycosphaerella fijiensis* and *Mycosphaerella musicola*. Programme (D. Jones, ed) INIBAP, Montpellier, France. p. 37-46.

Freitez T., J. A. 2006. Desarrollo de un modelo predictivo del brote de la sigatoka negra para las plantaciones de plátano al sur del lago de Maracaibo. Postgrado de Modelado y Simulación de Sistemas, Tesis de Maestría. Universidad de los Andes. 88 p.

Gauhl, F. and C. Pasberg Gauhl. 1994. Epidemiology of Black Sigatoka disease on plantain in Nigeria. Phytopathology 84 (10): 1080.

Gómez, C.; T. Bracho y R. Andressen. 2001. "SIBiLA: Sistema de información Bioclimática"; disponible en www.saber.ula.ve/postgrados; Internet; consultado Junio de 2005.

Hernández F., J. B.; N. Sanabria, G. Blanco, B. Linares, M. Milla y A. Pérez. 2008. Modelo de predicción para Sigatoka Negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) para el Ciclo I de 'Plátano Hartón' bajo condiciones de fertilización del suelo en el Municipio Veroes, Estado Yaracuy, Venezuela. En: Memorias XVIII Reunión Internacional Acorbat, 2008. Guayaquil, Ecuador. v. Cd rom.

Hernández G. L.; W. Hidalgo, B. Linares, J. Hernández, N. Romero y S. Fernández. 2005. Estudio preliminar de vigilancia y pronóstico para sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) en el cultivo de plátano (Musa AAB cv Hartón) en Macagua-Jurimiquire, estado Yaracuy. Rev. Fac. Agron. (LUZ). 22: 324-337.

Hernández O., J. y M. J. Ramírez Q.. 2004. Introducción a la minería de datos. Edit. Prentice Hall. Person Educación S.A. Madrid.

Marin, D. y R. Romero. 1994. El combate de la Sigatoka Negra. Boletín N° 4. CORBANA. 22 p.

Mourichon, X.; J. Carlier y E. Fouré. 1997. Enfermedades de Sigatoka. INIBAP, Montpellier (FRA), 4 p.

Mourichon, X. et M. F. Zapater. 1990. Obtention *in vitro* du stade *Mycosphaerella fijiensis*, forme parfaite de *Cercospora fijiensis*. Fruits (FRA) 45 (6) : 553-557.

Nava, C. 1997. El Plátano, su cultivo en Venezuela. Ediciones Astro Data. Maracaibo. 122 p.

Sáez S., V. 2002. Estudio de las condiciones agoclimáticas que determinan la infestación de sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) en cultivos de plátanos (*Musa* sp. AAB), Sur del Lago de Maracaibo, Estado Zulia. Tesis Doctoral, Doctorado en Ciencias, Mención Ecología. Universidad Central de Venezuela, 240 p.

Witten Ian H. and F. Eibe. 2005. Data Mining: Practical machine learning tools and techniques, 2da Edición, Morgan Kaufmann, San Francisco.

Zabala, M. E. and A. Bermudez. 1999. El costo del control de la Sigatoka Negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) y su efecto en el beneficio económico del productor de plátano (Musa AAB cv. Hartón) del Sur del Lago de Maracaibo. Revista de la Facultad de Agronomía-LUZ 16 (1): 107-119.