

Descripción del comportamiento de la Marchitez letal de la palma de aceite a partir del análisis epidemiológico temporal*

Describing the Behavior of Lethal Wilt in Oil Palm from Temporal Epidemiological Analysis

CITACIÓN: López-Vásquez, J. M., Mesa-Fuquen, E., Acosta, M. C. & Tovar, J. P. (2021). Descripción del comportamiento de la Marchitez letal de la palma de aceite a partir del análisis epidemiológico temporal. *Palmas*, 42(2), 93-105.

PALABRAS CLAVE: Fitoepidemiología, Manejo de enfermedades, Modelos temporales, Área bajo la curva del progreso de la enfermedad.

KEYWORDS: Phytoepidemiology, Disease management, Temporal models, Area under the disease progress curve.

* Artículo de investigación e innovación científica y tecnológica.

RECIBIDO: diciembre de 2020.

APROBADO: marzo de 2021.

LÓPEZ V. JUAN M.

Investigador asociado, Programa de Plagas y Enfermedades, Cenipalma
jlopezv@cenipalma.org

MESA F. ELOÍNA

Investigadora asociada, Responsable de Biometría, Cenipalma

ACOSTA, MARÍA C.

Analista de manejo sanitario
Zona Oriental Cenipalma

TOVAR JUAN P.

Coordinador regional de manejo sanitario Zona Oriental, Cenipalma

Resumen

La Marchitez letal de la palma de aceite (ML) es la principal limitante fitosanitaria de la palmicultura en la Zona Oriental colombiana. Su agente causal aún es desconocido, por lo que los planes de manejo construidos se basan en principios generales y las experiencias exitosas de las plantaciones. Este trabajo se realizó con el objetivo de determinar cuáles de las herramientas de análisis epidemiológico temporal hasta ahora empleadas son adecuadas para representar el desarrollo de la epidemia de ML, de acuerdo con los datos registrados por las plantaciones en sus censos fitosanitarios rutinarios. Se seleccionaron lotes con tiempo inicial de la epidemia conocido e incidencia final mayor a 0,05, escogiendo 23 de los 651 lotes disponibles. Se aplicaron

los modelos epidemiológicos temporales exponencial, monomolecular, logístico, Gompertz y Richards, evaluando cinco intervalos de tiempo desde el inicio de la epidemia hasta los 12, 18, 24, 30 y 36 meses. Inicialmente, se ajustaron modelos no lineales, los cuales, a pesar de mostrar buenos ajustes, no cumplieron con criterios de bondad de ajuste como asimetría de Hougard (1985), el sesgo porcentual de Box (1971) y tampoco el valor crítico de curvatura de los parámetros propuesto por Bates y Watts (1980), sugiriendo el ajuste del modelo lineal. Al ajustar los modelos en su forma linealizada no se observaron buenos ajustes. Además, la verificación de los supuestos de normalidad de los residuales con media cero y varianza constante tampoco se cumplieron. Como alternativa, se consideró trabajar con el área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE), identificando que esta metodología describe de forma adecuada el comportamiento de la ML en los diferentes lotes, al permitir suavizar las fluctuaciones y comparar el incremento de la enfermedad a escala temporal. De esta manera, el ABCPE se perfila como una herramienta con alto potencial para responder a inquietudes sobre la influencia del cultivar y el ambiente en el desarrollo de la ML en Colombia.

Abstract

Oil palm lethal wilt is the main phytosanitary limitation of oil palm cultivation in the Colombian Eastern Zone. Its causal agent is yet unknown, therefore, the existing management plans for this disease are based on general principles and successful experiences by some oil palm plantations. This work was carried out with the objective of determining which of the temporal epidemiological analysis tools is adequate to represent the development of the lethal wilt epidemic using data recorded by a sample of plantations in their routine phytosanitary censuses. Plots with a known initial time of the epidemic and a final incidence greater than 0.05 were selected, choosing 23 of the 651 available plots. The exponential, monomolecular, logistic, Gompertz, and Richards temporal epidemiological models were applied, evaluating five-time intervals from the beginning of the epidemic up to months 12, 18, 24, 30, and 36. Initially, non-linear models were fitted. However, despite showing good fit, these models did not meet goodness-of-fit criteria such as Hoggard's (1985) asymmetry, Box's (1971) percentage bias, nor the critical value of curvature of the parameters proposed by Bates and Watts (1980), which suggest the fit of the linear model. When adjusting the models in their linearized form, no good fits were observed and the verification of the normality assumptions of the residuals with zero mean and constant variance was not fulfilled either. As an alternative, we considered working with the area under the disease progress curve (AUDPC), concluding that this methodology adequately describes the behavior of lethal wilt in the different plots by allowing smooth fluctuations and to compare the increase in the advance of the disease on a time scale. In this way, the AUDPC is an emerging tool with high potential to address the concerns about the influence of cultivars and the environment in the development of lethal wilt in Colombia.

Introducción

La Marchitez letal de la palma de aceite (ML) es la principal limitante fitosanitaria de la palmicultura en la Zona Oriental colombiana. El primer registro de esta enfermedad en Colombia data de 1994 en plantaciones ubicadas en la cuenca del río Upía, zona limítrofe entre los departamentos de Meta y Casanare. Posteriormente, en 2002, empezó su propagación ace-

lerada hacia el sur del país (Rocha *et al.*, 2007). Actualmente, de los 37 municipios palmeros que conforman la Zona Oriental colombiana, muy pocos permanecen libres de esta problemática (Fedepalma, 2019).

El impacto económico de la ML ha tenido consecuencias graves para el sector palmero, no solo por los costos que deben asumir las plantaciones en cuanto al manejo, control y contención de la enfermedad, sino también porque las palmas afectadas deben ser

eliminadas de manera inmediata, generando pérdidas frente a la inversión realizada en siembra y mantenimiento, así como en el potencial de ganancia por la cosecha de fruto esperada (Castiblanco y Mosquera-Montoya, 2011). Para 2013, como consecuencia de la eliminación de más de 200.000 palmas afectadas, el Programa Sectorial de Manejo Fitosanitario de Cenipalma estimó pérdidas por USD 85 millones en las plantaciones de la Zona Oriental. Esta cifra creció años más tarde, superando USD 146 millones en pérdidas, debido a los cerca de 900.000 casos reportados hasta 2017 por parte de 207 plantaciones de la región (Fedepalma, 2018). Actualmente, esta enfermedad sigue generando un número alarmante de casos reportados, incrementando el área afectada y el riesgo de su expansión a las demás regiones productoras de palma de aceite en Colombia.

Las palmas afectadas por ML presentan clorosis del follaje (Aucique-Perez *et al.*, 2018), seguida por secamiento progresivo de las hojas medias y bajas, desprendimiento de los frutos en racimos verdes, pudrición y necrosamiento de las raíces. Finalmente, se presenta la muerte de la planta en un periodo de 4 semanas a 6 meses tras la aparición de los primeros síntomas (Rocha *et al.*, 2007). Si bien la manifestación del daño en la planta, su distribución espacial y el comportamiento de la enfermedad en el tiempo representan suficiente evidencia científica para considerar a la ML como un problema de tipo biótico (Torres y Tovar, 2004), hasta el momento no se ha logrado identificar el agente causal de la enfermedad. Múltiples pruebas de patogenicidad con hongos del género *Fusarium* spp. y las bacterias *Pantoea agglomerans* y *Pseudomonas stutzeri* resultaron negativas. Así mismo, se descartó la presencia de *Phytoplasma* sp. y *Xylella fastidiosa* en posteriores análisis de laboratorio (Rocha *et al.*, 2007). Alvarez y Claro (2003) y Alvarez *et al.* (2014) argumentaron la posibilidad de asociación con fitoplasmas similares a los involucrados en la enfermedad de Amarillamiento letal del cocotero, aunque sus resultados hasta ahora no han podido ser corroborados por otros grupos de investigación (Montoya *et al.*, 2018; Romero, 2010). De esta manera, los trabajos para establecer el origen de la enfermedad se mantienen en curso.

El actual desconocimiento del agente causal de la ML deriva en una incertidumbre sobre la influencia de diversos factores en la dinámica de la enfermedad,

lo cual dificulta la elaboración de un plan de manejo. Teniendo en cuenta esta situación, ha sido necesario recurrir, en gran medida, a las experiencias de las plantaciones y a manejos básicos como la reducción del inóculo a partir de la eliminación temprana de palmas afectadas, lo que implica un seguimiento estricto a la aparición de casos a través de censos fitosanitarios semanales (Cenipalma, 2019). Así, quienes han sido disciplinados con esta labor cuentan con extensos registros de datos históricos. Sin embargo, se carece de herramientas metodológicas que permitan convertir estos datos en información y, a partir de allí, en conocimiento sobre el comportamiento de la enfermedad en una escala temporal.

Una de las herramientas más utilizadas para comprender el desarrollo de enfermedades en poblaciones de cultivos hospedantes y la manera en que otros factores influyen en su desarrollo es el análisis epidemiológico temporal a través de modelos (Nutter, 2007), los cuales son expresiones matemáticas que permiten representar gráficamente la epidemia a partir de su comportamiento en el tiempo, además de evidenciar la naturaleza cíclica propia del agente causal (Madden *et al.*, 2007; Neher *et al.*, 1997).

Por lo anterior, el presente artículo describe el procedimiento para determinar cuáles de las herramientas de análisis epidemiológico temporal resultan ser adecuadas para representar el desarrollo de la epidemia de ML en lotes comerciales de palma de aceite, empleando para ello los datos registrados directamente por las plantaciones en sus censos fitosanitarios rutinarios. Sobre esta base se podrán soportar en el futuro los estudios de comportamiento de la enfermedad en diferentes escenarios con miras a definir qué factores ecológicos, agronómicos y de cultivo pueden estar relacionados con su dinámica, para así incorporar dichos factores en los planes de manejo integrado.

Metodología

Descripción de los datos iniciales

Se trabajó con los registros de número de casos por mes en cada lote para las plantaciones Palmar del Oriente y Luker Agrícola de la Zona Oriental colombiana, las cuales se encuentran ubicadas en una región con alta incidencia de ML. El área sembrada de ambas

plantaciones es cercana a 8.000 hectáreas, subdivididas en 651 lotes. Esta investigación tomó el periodo comprendido entre enero de 2011 y diciembre de 2018.

Lo anterior condujo inicialmente a encontrar una gran variabilidad en las características de los lotes, pues se tenían múltiples fechas de siembra (desde 1978 hasta 2018), múltiples cultivares, e incluso lotes de segunda generación donde la enfermedad había sido recurrente. Por lo tanto, el primer paso se enfocó en establecer criterios de selección con el fin de filtrar lotes que brindaran datos confiables y útiles para realizar la descripción de la epidemia.

Criterios de selección de lotes

Debido a que todos los lotes fueron continuamente sometidos a medidas fitosanitarias de manejo y contención, no fue posible realizar la descripción de la epidemia en lotes sin intervención alguna. Sin embargo, algunos de estos lotes fueron seleccionados debido a que sus características epidémicas podrían acercarse a una descripción precisa y confiable del comportamiento de la enfermedad.

Los dos criterios básicos de selección fueron:

- i. Incidencia final (y_t) > 0,05, debido a que describir epidemiológicamente el comportamiento de ML con valores menores no es de interés económico, agronómico, ni biológico.

- ii. Incidencia inicial (y_0) = 0, debido a que es necesario conocer el comportamiento de la epidemia desde su etapa inicial.

Estrategias empleadas para la descripción del progreso temporal de la enfermedad

Considerando que no se tenía claridad sobre el tiempo que le toma a la epidemia pasar por cada una de sus etapas de desarrollo (fase inicial, exponencial, transicional y estacionaria), se evaluaron cinco intervalos de tiempo desde el inicio del desarrollo de la epidemia hasta los 12, 18, 24, 30 y 36 meses después de registrado el primer caso de la enfermedad en los lotes seleccionados. Posteriormente, se utilizaron los modelos de crecimiento poblacional exponencial, monomolecular, logístico, Gompertz y Richards (Tabla 1, Figura 1), así como el área bajo la curva de progreso de la enfermedad (Madden *et al.*, 2007).

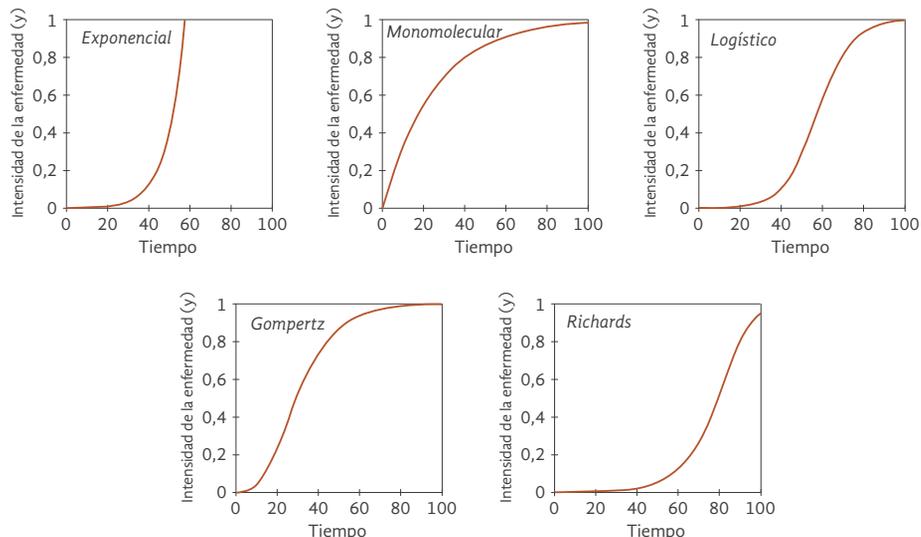
Los modelos empleados en este trabajo tienen origen en los modelos de crecimiento comúnmente utilizados para describir las epidemias de enfermedades temporales (Xu, 2006). El modelo exponencial, que también se conoce como modelo logarítmico, es ampliamente aplicado para describir las etapas iniciales de la mayoría de las epidemias policíclicas (Nutter, 2007), mientras que el modelo monomolecular, también conocido como modelo exponencial negativo, es aplicado para modelar epidemias que tienen un ciclo

Tabla 1. Ecuaciones integradas y linealizadas de los cinco modelos empleados para la descripción de la epidemia a causa de ML en la palma de aceite

Modelo	Forma integrada	Forma linealizada
Exponencial	$y = y_0 e^{r_E t}$	$\ln(y) = \ln(y_0) + r_E t$
Monomolecular	$y = 1 - (1 - y_0)e^{-r_M t}$	$\ln(1/1-y) = \ln(1/1-y_0) + r_M t$
Logístico	$y = 1/[1 + ((1 - y_0)/y_0) \exp(-r_L t)]^{-1}$	$\ln(y/1-y) = \ln(y_0/1-y_0) + r_L t$
Gompertz	$y = \exp(\ln(y_0) e^{-r_G t})$	$-\ln(-\ln(y)) = -\ln(-\ln(y_0)) + r_G t$
Richards ($\eta > 1$; < 1)	$y = (1 \pm B e^{-r_R t})^{1/(1-\eta)}$	$\ln(1/y^{1-\eta} - 1) = -\ln(B) + r_R t$

Nota: y_0 se refiere a la intensidad inicial de la enfermedad en términos de proporción; $B = -\ln(y_0)$; $r_E, r_M, r_L, r_G, y r_R$ se refiere al parámetro tasa de crecimiento de la enfermedad.

Figura 1. Representación gráfica de los modelos probados para describir la epidemia causada por ML en la palma de aceite



único durante la temporada de crecimiento (Campbell y Madden, 1990; Nutter, 2007). El modelo logístico fue propuesto por Vanderplank (1963) para la mayoría de las enfermedades policíclicas y es ampliamente utilizado para describir epidemias de enfermedades de plantas. Por su parte, el modelo Gompertz es una alternativa al modelo logístico, alcanzando su punto de inflexión en la curva de manera anticipada (Nutter, 2007). El modelo Richards (1959) tiene un parámetro adicional (parámetro de forma) y se representa como η en su expresión matemática; este parámetro toma valores diferentes a 1, caso para el cual la expresión matemática no está definida. Dependiendo del valor que tome este parámetro, se puede llegar a cualquiera de los modelos ya mencionados. Por ejemplo, si $\eta = 0$, este parámetro converge al modelo monomolecular y así sucesivamente a otros modelos más complejos (Madden *et al.*, 2007).

Para los datos considerados se trabajaron las dos formas de cada modelo (lineal y no lineal). En los dos casos se verificaron los supuestos para asegurar una inferencia estadística de los parámetros estimados, particularmente la tasa de desarrollo de ML, el de mayor interés para este estudio. Una vez se estimaron los parámetros y se ajustó el modelo, se verificaron los supuestos asociados a los residuales, tales como la distribución normal con media cero (0), la varianza constante y el ajuste del modelo estimado, es decir, qué tan cercanos eran los valores observados y los estimados visualmente. Para el modelo lineal se examinaron criterios de bondad de ajuste como la varianza

de los residuales y el coeficiente de determinación (R^2) (Draper, 1981). Para el modelo no lineal se verificó el sesgo y la asimetría de los parámetros (Box, 1971; Hougaard, 1985) y la medida de curvatura de estos (Bates y Wats 1980).

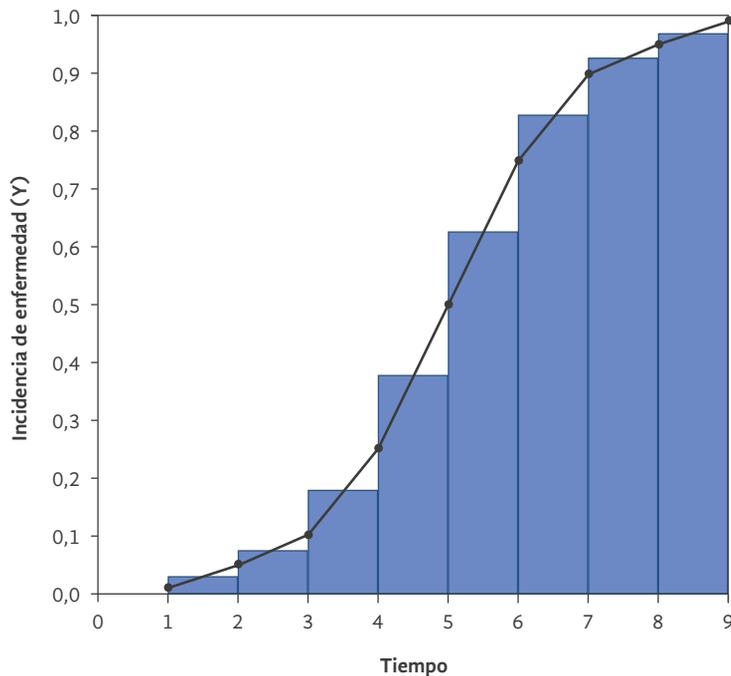
Finalmente, se realizó un análisis descriptivo empleando el área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE), para lo cual no se requiere de ajuste de modelos preestablecidos ni de transformación de los datos. El ABCPE es una alternativa cuando los parámetros estimados en los modelos anteriormente indicados no cumplen con las características requeridas para el ajuste de los datos debido a una curvatura irregular no explicada en el tiempo. Tomando como referencia a Jeger y Viljanen (2001) y Prudencio-Sains *et al.* (2008), el ABCPE se estimó de la siguiente forma:

$$ABCPE = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(y_i + y_{i+1})}{2} * (t_{i+1} - t_i)$$

El área se obtuvo a partir de la integración de trapecios formados por la curva de progreso, como se observa en la Figura 2.

En la ecuación del ABCPE, la expresión $(Y_i + Y_{i+1}) / 2$ corresponde a la altura del trapecio y la base está dada por $(t_i - t_{i-1})$. El ABCPE se expresa en términos de proporción o cantidad de enfermedad por tiempo, donde los valores más altos indican un mayor desarrollo de la enfermedad en un tiempo determinado.

Figura 2. Representación gráfica del área bajo la curva de progreso de una enfermedad (ABCPE)



Resultados y discusión

Lotes seleccionados

Para las plantaciones Palmar del Oriente y Luker Agrícola, con 340 y 311 lotes, respectivamente, se consideraron registros mensuales de incidencia de la enfermedad desde enero de 2011 hasta diciembre de 2018. Para cada plantación fueron registrados lotes eliminados y activos. De los lotes activos que son de interés para este estudio se consideraron aquellos con presencia de ML, seleccionando, posteriormente, los lotes para los cuales era conocido el momento de inicio de la enfermedad. De este último grupo se seleccionaron los lotes que al final del periodo de interés alcanzaron una incidencia mayor a 5 %, dando como resultado un total de 13 y 10 lotes para cada plantación, respectivamente. La Figura 3 detalla el proceso de selección de lotes para cada plantación. Los cuadros en amarillo muestran los lotes descartados, mientras que los cuadros en verde dan cuenta de los lotes seleccionados para llevar a cabo la descripción de la enfermedad.

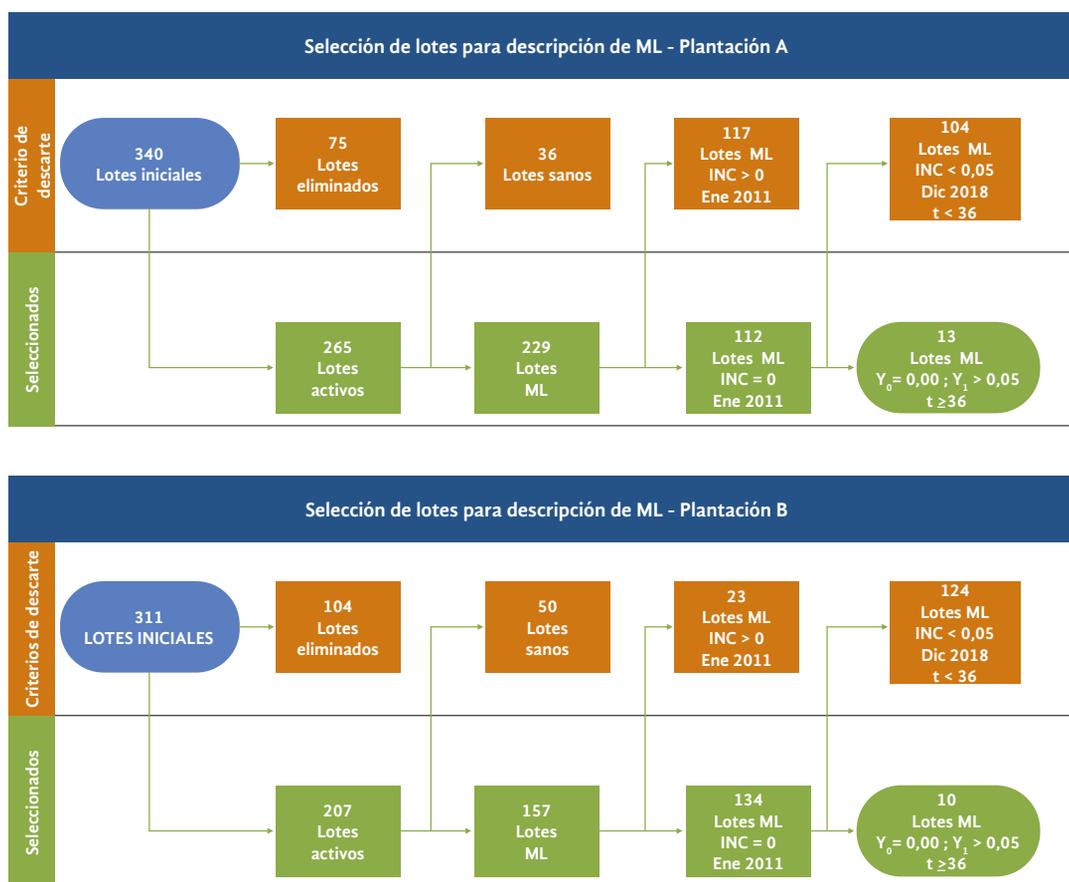
Ajuste de los modelos

Los análisis preliminares de la epidemia para los periodos propuestos (12, 18, 24, 30 y 36 meses) pre-

sentaron resultados similares. No obstante, y con el fin de realizar una descripción más completa con los datos disponibles, se consideró tomar el mayor número de observaciones, es decir, 36 meses. El ajuste de los modelos se realizó con el *software* R (R Core Team, 2020) y SAS (SAS/STAT, 2012) para los modelos lineales y no lineales, respectivamente. Para cada caso se revisaron los supuestos, se evaluaron los criterios de ajuste y se observó la proximidad de los valores estimados a los valores reales.

Una vez ajustados los modelos no lineales propuestos, se encontró que en la mayoría de los casos el mejor ajuste se presentó para el modelo de Gompertz, con el cual los valores estimados mostraron un buen acercamiento a los datos observados. Sin embargo, verificando supuestos y bondad de ajuste de los modelos, no se cumplieron las condiciones de no linealidad en los parámetros, asimetría y sesgo de los estimadores. Por su parte, los resultados obtenidos por los análisis estadísticos de los modelos lineales presentaron un mejor ajuste para el modelo monomolecular en la mayoría de los lotes evaluados. A pesar de ello, la verificación de los supuestos de normalidad de los residuales con media cero y varianza constante no se cumplió. En la Figura 4 se muestra el ajuste de modelos lineales y no lineales para un lote tipo.

Figura 3. Esquema del proceso de selección de lotes afectados por ML en las plantaciones (A) Palmar del Oriente y (B) Luker Agrícola



Estos resultados se dieron posiblemente por las siguientes razones: (i) en la mayoría de los lotes se observaron comportamientos con tendencias más cercanas a ser lineales que a presentar una curvatura definida; (ii) las curvaturas de carácter irregular observadas en el comportamiento temporal de la enfermedad evidenciaron un descenso en el número de casos nuevos reportados en periodos cortos; (iii) los datos corresponden a registros históricos de la enfermedad, en los que no se conoce la razón del comportamiento, situación que puede ser resultado de una falta de registro de palmas enfermas en dicho periodo o de una acción o práctica realizada por la plantación como medida para mitigar el incremento de casos de la enfermedad.

Finalmente, se estimó el ABCPE para cada uno de los lotes. La estimación del área se hizo considerando la acumulación de la enfermedad en los periodos 6,

12, 18, 24, 30 y 36 meses. El ABCPE para los lotes de las dos plantaciones se muestra en la Figura 5.

En las Figuras 6 y 7 se muestra la incidencia y el ABCPE acumuladas para tres lotes tipo de cada plantación. Al respecto, se observa cómo el ABCPE representa de manera fiel el comportamiento de la epidemia, independientemente de las variaciones o cambios de esta a través del tiempo.

De acuerdo con los resultados del presente análisis de datos, el ABCPE demostró ser una representación gráfica fidedigna del comportamiento de la ML bajo este tipo de escenarios, además de describir el incremento de la cantidad de enfermedad en el tiempo. Por consiguiente, este se convierte en una herramienta de gran utilidad cuando las curvas de progreso de la enfermedad no son descritas a cabalidad por modelos de crecimiento comúnmente utilizados en dinámica de poblaciones.

Figura 4. Ajuste de modelos lineales y no lineales para un lote tipo afectado por ML

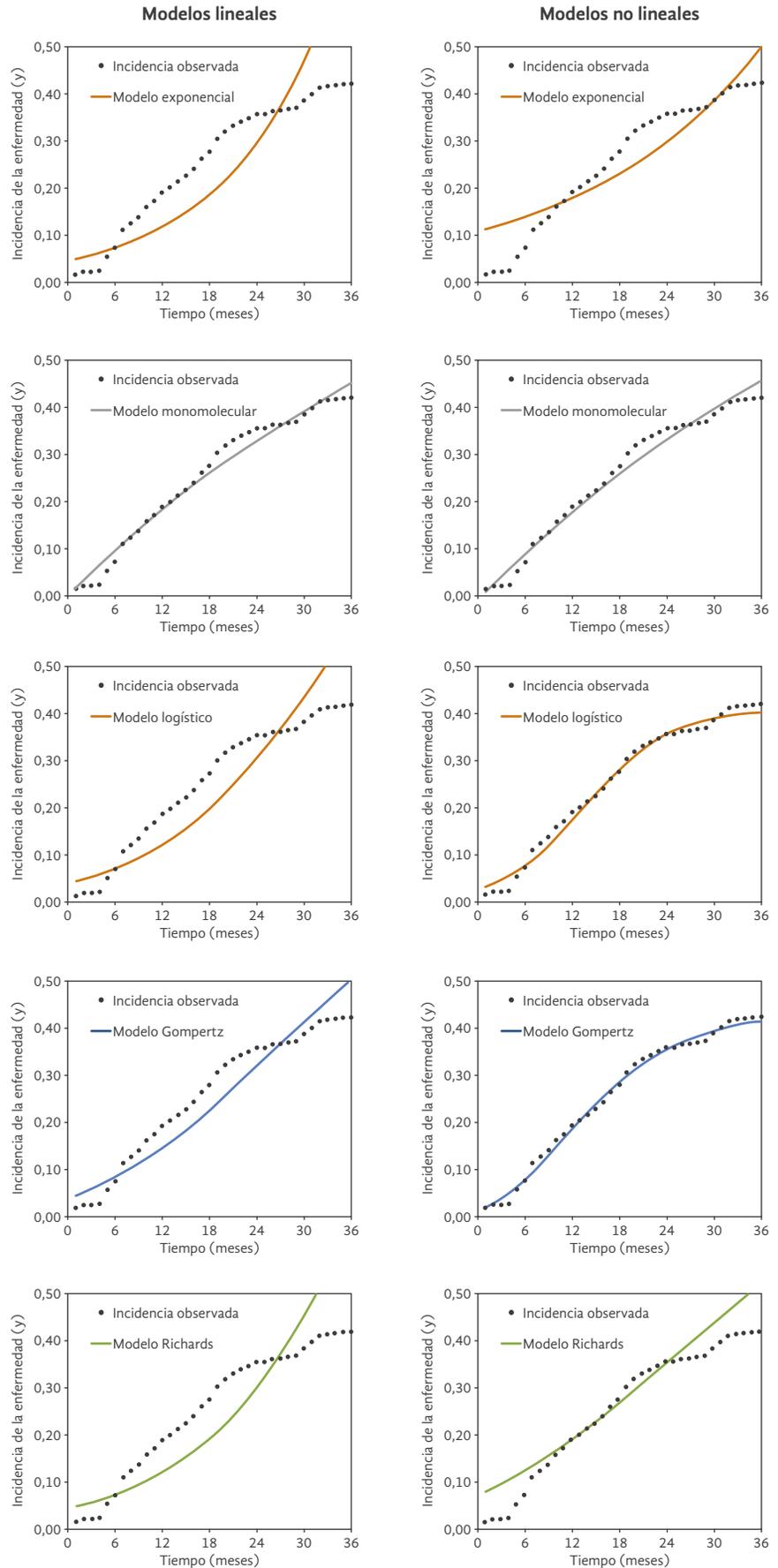


Figura 5. ABCPE acumulada en diferentes momentos de la epidemia de ML para los lotes seleccionados en las plantaciones (A) Palmar del Oriente y (B) Luker Agrícola

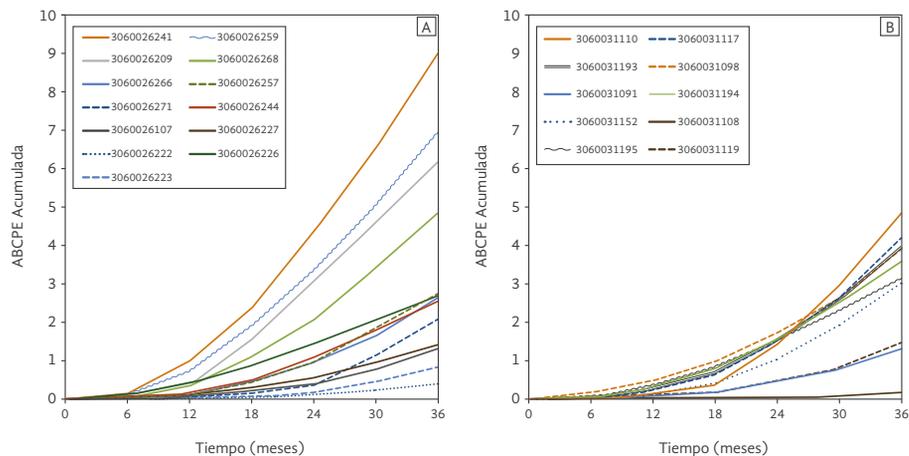


Figura 6. Valores observados de incidencia mensual acumulada de la epidemia de ML y ABCPE acumulada para tres lotes tipo en la plantación Palmar del Oriente

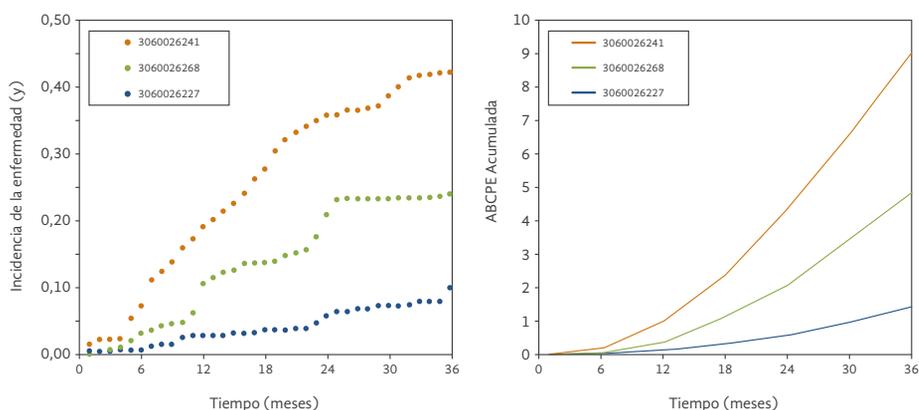
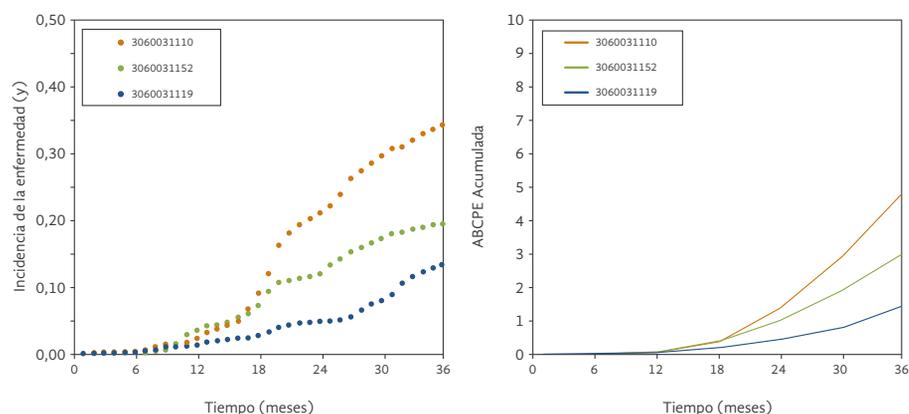


Figura 7. Valores observados de incidencia mensual acumulada de la epidemia de ML y ABCPE acumulada para tres lotes tipo en la plantación Luker Agrícola



El ABCPE mostró el patrón de comportamiento y avance de la enfermedad en el tiempo desde su inicio hasta un periodo establecido, así como la resistencia o la susceptibilidad del hospedero durante el periodo de crecimiento de la epidemia considerado, la

efectividad de las medidas de control ejercidas por cada plantación y la afectación de cambios climáticos. Con base en ello, esta herramienta permite seleccionar estrategias de control para un lote particular de manera oportuna.

Conclusiones

Ninguno de los modelos epidemiológicos probados, tanto en su forma lineal como no lineal, describieron satisfactoriamente el desarrollo de la epidemia en lotes comerciales de palma afectados por ML. En consecuencia, no es posible inferir los parámetros de interés de los modelos, como la tasa de desarrollo (r). Esto puede explicarse porque los datos registrados son el resultado del desarrollo de la enfermedad condicionada a las medidas sanitarias de manejo y contención implementadas, lo cual afecta el crecimiento continuo de su incidencia.

La estimación del área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE) resultó ser la mejor alternativa para describir el comportamiento de la ML debido a que no se requiere del ajuste de modelos preestablecidos, transformaciones de los datos ni del incremento continuo de la incidencia. Además, el ABCPE mostró el momento de aparición y la cantidad (medida como incidencia acumulada) de enfermedad, su patrón de comportamiento y su avance en el

tiempo desde el inicio hasta un periodo establecido. Sumado a lo anterior, este es un buen indicador del incremento de la cantidad de la enfermedad en el tiempo que permite atenuar las fluctuaciones de la curva de la epidemia.

Por lo anterior, el cálculo del ABCPE se constituye en la mejor herramienta para describir el comportamiento de la ML bajo las condiciones de registro de datos que llevan las plantaciones. Su implementación permitirá a futuro comparar el desarrollo de la enfermedad, ajustar los planes de manejo y apoyar la toma de decisiones en condiciones de cultivo, manejos y ambientes diferentes.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Fondo de Fomento Palmero (FFP), administrado por Fedepalma, por la financiación de esta investigación. Además, agradecen a las plantaciones Luker Agrícola y Palmar del Oriente, especialmente a los ingenieros Marta Lya Hernández Escudero y Miguel Rubiano Infante.

Referencias

- Alvarez, E. & Claroz, J. L. (2003). Characterization and classification of phytoplasma associated with oil palm (*Elaeis guineensis*). En *8th Int. Congr. Plant Pathol. Australasian Plant Pathology Society* (p. 284). Christchurch, New Zealand.
- Alvarez, E., Mejía, J. F., Contaldo, N., Paltrinieri, S., Duduk, B. & Bertaccini, A. (2014). "Candidatus *Phytoplasma asteris*" strains associated with oil palm lethal wilt in Colombia. *Plant Dis.*, 98, 311-318.
- Aucique-Perez, C. E., Daza, E. S., Ávila-Diazgranados, R. A. & Romero, H. M. (2018). Chlorophyll *a* fluorescence and leaf temperature are early indicators of oil palm diseases. *Sci. Agric.*, 77(2),1-6.
- Bates, D. M. & Watts, D. G. (1980). Relative curvature measures of nonlinearity (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society*, 42, 1-25.
- Box, M. J. (1971). Bias in nonlinear estimation (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society*, 33, 171-201.

- Campbell, C. L. & Madden, L. V. (1990). *Introduction to plant disease epidemiology*. New York: Wiley.
- Castiblanco, J. S. & Mosquera-Montoya, M. (2011). Costos asociados a la Marchitez letal en palma de aceite. *Palmas*, 32(3), 39-47.
- Cenipalma. (2018). *Programa Sectorial de Manejo Fitosanitario Zona Oriental. Informe de estado fitosanitario Zona Oriental*. Bogotá: Cenipalma.
- Cenipalma. (2019). *Guía de bolsillo. Principios básicos para el manejo de la Marchitez letal (ML) de la palma de aceite*. Bogotá: Cenipalma.
- Draper, N. R. & Smith, H. (1981). *Applied regression analysis* (2nd ed). New York: John Wiley & Sons.
- Fedepalma. (2018). Desempeño del sector palmero colombiano en 2018: retos y perspectivas en momentos de dificultades. *Palmas*, 39(4), 6-11.
- Fedepalma. (2019). *Anuario estadístico. Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia 2014-2018*. Bogotá: Fedepalma.
- Hougaard, P. (1985). The appropriateness of the asymptotic distribution in a nonlinear regression model in relation to curvature. *Journal of the Royal Statistical Society*, 47, 103-114.
- Jeger, M. J. & Viljanen-Rollinson, S. L. H. (2001). The use of the area under the disease-progress curve (AUDPC) to assess quantitative disease resistance in crop cultivars. *Theo. Appl Genet.*, 102(1), 32-40.
- Madden, L. V., Hughes, G. & Van den Bosch, F. (2007). *The study of plant disease epidemics*. St. Paul, MN: APS Press.
- Montoya, C., Chaves, C., Herrera, M. & Romero, H. M. (2018). Avances de investigaciones en el área de Biología Molecular en torno a la Marchitez letal. En *Memorias del Taller Estratégico Línea ML*. Bogotá: Cenipalma.
- Neher, D. A., Reynolds, K. L. & Campbell, C. L. (1997). Analysis of disease progress curves using linear models. En L. J. Fand & D. A. Neher (eds.), *Exercises in plant disease epidemiology* (pp. 29-33), St Paul, MN: APS Press.
- Nutter, F. F. (2007). The role of plant disease epidemiology in developing successful integrated disease management programs. En A. Ciancio & K. G. Mukerji (eds.), *General concepts in integrated pest and disease management. Integrated management of plants pests and diseases* (vol. 1, pp. 45-79). Dordrecht: Springer.
- Prudencio-Sains, J. M., Navarrete-Maya, R., Navarrete-Maya, J. & Acosta-Gallego, J. A. (2008). Dinámica de los tizones común y de halo del frijol en el valle de México. *Agricultura Técnica en México*, 34(2), 201-212.
- R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. Viena: R Foundation for Statistical Computing.

- Richards, F. J. (1959). A flexible growth functions for empirical use. *J Exp Bot.*, 10, 290-300.
- Rocha, P. J., Tovar, J. P., Gutiérrez, D. F. & Mosquera-Montoya, M. (2007). *Marchitez letal en palma de aceite*. Boletín Técnico 22. Bogotá: Cenipalma.
- Romero, H. M. (2010). Respuesta fisiológica de la palma a la Marchitez letal. En *Memorias taller internacional de manejo de la Marchitez letal (ML)*, Marzo 3-4, Villavicencio, Colombia.
- SAS/STAT. (2012). *SAS/STAT release 9.4*. Cary, NC: SAS Institute.
- Torres, E. & Tovar, J. P. (2004). Estudio epidemiológico de la enfermedad Marchitez letal de la palma de aceite en plantaciones de Villanueva, Casanare. *Palmas*, 25(Especial, Tomo II), 210-219.
- Vanderplank, J. E. (1963). *Plant disease: epidemics and control*. New York, NY: Academic Press.
- Xu, X. (2006). Modelling and interpreting disease progress in time. En B. M. Cooke, J. Gareth-Jones & B. Kaye (eds), *The epidemiology of plant disease* (pp. 215-238). Dordrecht: Springer.