



**Thomas H. Spreen**

Profesor Emérito  
Universidad de la Florida  
tspreen@ufl.edu

**Mauricio Mosquera**

Investigador Titular  
Canipalma

**Kelly A. Grogan**

Profesora Asistente  
Los tres del Departamento  
de Economía de Alimentos y  
Recursos Económicos (FRE),  
Universidad de la Florida  
(Estados Unidos)

**Edward A. Evans**

Profesor Asociado en el  
Departamento FRE y Especialista  
en Extensión en el Centro  
de Investigación Tropical y  
Educación (TREC), Instituto de  
Alimentos y Ciencias Agrícolas  
(IFAS) 18905 S.W. 280 St.  
Homestead, Florida.

### Palabras CLAVE

Plantas perennes, costos de oportunidad, esquema costo-beneficio, costos con plantas enfermedades.

Perennial plants, opportunity costs, cost-benefit scheme, costs with diseased plants

Copyright 2012 por Thomas Spreen, Mauricio Mosquera, Kelly A. Grogan, Edward A. Evan. Todos los derechos reservados. Los lectores pueden hacer copias literales de este documento para fines no comerciales por cualquier medio, siempre y cuando este aviso de Copyright aparezca en dichas copias.

Traducido por Fedepalma

Versión original en inglés  
en el Centro de Información  
de Fedepalma

# Análisis económico de las enfermedades en plantas perennes

## Economic Analysis of Diseases in Perennial Plants



### Resumen

Con el incremento del comercio y el movimiento de personas y productos a través de las fronteras, la transmisión de nuevas enfermedades se ha convertido en un problema importante que enfrenta el sector agrícola de muchos países. El análisis económico de las enfermedades depende de una serie de factores, incluidos la severidad de la enfermedad y los métodos disponibles de control. Este trabajo presenta un esquema de análisis económico para las enfermedades que afectan a las plantas perennes.

Las plantas perennes difieren de los cultivos anuales en que el cultivador primero toma una decisión de inversión cuando emprende la siembra del cultivo. La duración del horizonte de inversión difiere de un cultivo a otro. En la mayoría de los cultivos perennes, los cultivadores deben atravesar por un periodo sin ingresos con costos de mantenimiento acumulativos. Por tanto, una vez que el árbol comienza a dar frutos, se realizan unos costos de oportunidad considerables en términos de inversión económica y tiempo. Si se presenta una enfermedad, el cultivador se enfrenta con el desafío de defender su inversión, esperando mitigar el impacto de la enfermedad en los ingresos, por lo menos por un periodo de tiempo suficiente para poder recuperar su inversión inicial. En este contexto, es adecuado un esquema costo-beneficio para estudiar el impacto económico de las enfermedades en cultivos de largo plazo. Los beneficios están constituidos por el flujo de ingresos descontados realizado durante la vida del árbol. Los costos incluyen los normales de mantenimiento más el del tratamiento.

## Abstract

With increased trade and movement of people and products across borders, transmission of new diseases has become an important problem facing the agricultural sector of many countries. Economic analysis of diseases depends upon a number of factors including the severity of the disease and available methods of control. In this paper, a framework of economic analysis for disease affecting perennial plants is presented.

Perennial plants differ from annual crops in that the grower first makes an investment decision when undertaking planting the crop. The length of the investment horizon differs across crops. In most tree crops, growers must go through a period of no income with accumulating maintenance costs. Therefore, once a tree begins to bear fruit (or nuts), considerable opportunity costs are realized both in terms of economic investment and time. If a disease arrives, the grower is faced with the challenge of defending his investment, hoping to mitigate the impact of the disease on revenues, at least for a sufficient period, so that his initial investment can be recouped. In this context, a benefit-cost framework is appropriate. The benefits are the discounted revenue stream realized over the life of the tree. Costs include normal maintenance costs plus the cost of treatment.



## Introducción

Las plagas y enfermedades son desde hace tiempo un asunto de manejo importante en la producción de plantas y animales económicamente valiosos. Una importante categorización en el análisis económico de estos asuntos son las plantas anuales frente a las perennes. En el caso de las plantas anuales, después de la cosecha del cultivo, la planta misma por lo general se destruye, para ser renovada en el siguiente ciclo de producción. Por tanto, una infestación de plagas o enfermedades, por lo general afecta solo el cultivo actual y no los cultivos futuros<sup>1</sup>. En este caso, el análisis costo-beneficio suele ser una técnica apropiada para analizar la eficacia económica de una intervención de manejo propuesto. En este análisis, los beneficios son el valor de la producción del cultivo que no se pierde por causa de la enfermedad como resultado de un tratamiento y los costos son los gastos corrientes asociados con el tratamiento.

Sin embargo, en el caso de las plantas perennes, una infestación de plagas o enfermedades no solo afectará el cultivo en el corto plazo, sino

probablemente impactará el futuro del cultivo. Con frecuencia, la plaga o enfermedad ataca el árbol, la vid, o el arbusto que produce el cultivo cosechable y afecta su capacidad para producir. Puede debilitar la planta haciéndola más vulnerable a ataques de otras plagas y, en última instancia, acorta su ciclo de vida. Todos estos problemas complican el análisis costo-beneficio de las intervenciones de manejo. Los beneficios de un tratamiento tenderán a acumularse durante varios periodos de cosecha. Si el tratamiento sirve para prolongar la vida económica de la planta perenne, el análisis se complica aún más. La estimación correcta del costo de un tratamiento propuesto puede enfrentar complicaciones similares.

Dada la amplia variedad de plantas perennes y las plagas y enfermedades que podrían afectarlas, no es posible proponer un modelo general que pueda adaptarse a todos los casos. No obstante, se han publicado varios estudios que proporcionan orientación sobre cómo otros investigadores han abordado el análisis económico de las plagas y enfermedades en las plantas perennes.

1. Aunque puede haber excepciones a esta observación, por ejemplo, las poblaciones de nematodos pueden no retroceder después de la cosecha del cultivo.



Este tema ha atraído el interés reciente a través del aumento de las plantas y especies invasoras. El incremento aparente de las plantas invasoras se asocia por lo general con el aumento del comercio. Cuando los bienes cruzan las fronteras, pueden traer con ellos organismos no deseados e introducirlos en un ambiente nuevo. En algunos casos, estos organismos pueden prosperar en su nuevo entorno o introducir nuevas enfermedades, y por consiguiente causar daños económicos o ambientales.

Con frecuencia se supone que las plagas agrícolas son un problema exclusivo de los cultivadores y que ellos son los encargados de tratarlas, mediante el uso de estrategias de control de plagas. Un análisis más detallado del problema indica que existen seis tipos de daños económicos derivados de los ataques de plagas: (a) la producción (disminución del rendimiento y aumento de los costos); (b) los efectos sobre el mercado y los precios (oferta y demanda); (c) el comercio (respuestas de políticas de los socios comerciales a los brotes de plagas); (d) la seguridad alimentaria y la nutrición (dependencia de la economía local en el cultivo amenazado en términos de la generación de ingresos o como fuente de alimentos básicos); (e) la salud humana y el medio ambiente (posibles externalidades negativas por el uso de pesticidas u otros métodos de control de plagas como la eliminación de la vegetación riparia); y (f) los impactos de los costos financieros (asumidos por el sector público) (Evans, 2003).

En este trabajo se presenta una breve revisión de estudios anteriores. Posteriormente, se considera el caso de la enfermedad Pudrición del cogollo (PC) en la industria de la palma de aceite colombiana. Los resultados se presentan y se discuten al final del documento.

## Breve revisión de la literatura

Los estudios relacionados con el análisis económico de la infestación de plagas y enfermedades en las plantas perennes se pueden clasificar en dos grandes categorías; en el nivel de finca y en el nivel de mercado.

Los estudios en el nivel de finca bien pueden ser sobre el terreno en el que se considera una siembra hipotética de un cultivo determinado. En estos estudios, los impactos de la enfermedad sobre el equilibrio del mercado no se tienen en cuenta, esto es, los precios del cultivo se suponen fijos. El objetivo del estudio es evaluar las medidas que mitigan la enfermedad sobre el terreno.

En los estudios en el nivel de mercado, el impacto de la enfermedad sobre la oferta agregada es un modelo y luego se estima su impacto en los precios. Un ejemplo de este tipo de estudio son Spreen y Brown (2008), quienes consideraron el impacto del *Huanglongbing* (HLB), una enfermedad bacteriana que afecta todas las variedades de cítricos. Recientemente se ha encontrado HLB en Sao Paulo (Brasil) y en Florida (Estados Unidos), que colectivamente representan el 80% de la producción mundial de jugo de naranja. En la actualidad, no existe cura para esta enfermedad, por tanto, tiene el potencial de afectar en gran medida la producción mundial de jugo de naranja. Spreen y Brown utilizaron un modelo de oferta-demanda mundial del mercado de jugo de naranja. Mediante la modificación de los parámetros seleccionados de ese modelo, pudieron desarrollar proyecciones a veinte años del impacto del HLB en la producción y los precios mundiales del jugo naranja.

Un componente notable del estudio de Spreen y Brown es que el modelo mundial de jugo de naranja es inherentemente de múltiples periodos. Ellos incorporaron el HLB a través de su efecto proyectado sobre la mortalidad de los árboles cítricos y el rendimiento de fruta. Un atributo del análisis de las plantas perennes implica un análisis de múltiples periodos o un análisis dinámico. Tales modelos pueden ser más difíciles de resolver tanto en teoría como implementados empíricamente.

En el caso de los modelos en el nivel de empresa o finca, Mumford y Norton (1984) afirman que los enfoques de los modelos para la toma de decisiones sobre el manejo de plagas se pueden sintetizar en cuatro tipos: (1) el nivel de umbral económico, (2) la teoría de la decisión, (3) la decisión basada en el comportamiento, y (4) la optimización. Los modelos

del umbral económico fueron desarrollados por primera vez por entomólogos y fitopatólogos e incluyen el monitoreo de la población de plagas y la utilización de una estrategia para controlarlas, que comúnmente se supone que es la aplicación de plaguicidas.

Para que estos modelos sean eficaces en aras de apoyar las decisiones, es necesario establecer criterios que indiquen la máxima población de plagas que se puede tolerar. El enfoque se basa en la idea de que si bien todos los niveles de infestación de plagas pueden causar lesiones, no todos los niveles de lesiones

**... Si bien todos los niveles de infestación de plagas pueden causar lesiones, no todos los niveles de lesiones causan daños económicos.**

causan daños económicos. En otras palabras, los beneficios asociados con un tratamiento (daños evitados) deben ser mayores o por lo menos iguales a los de los costos del tratamiento.

Los principales inconvenientes del uso de un modelo de umbral económico para la toma de decisiones incluyen el alcance de la información requerida y el establecimiento de un nivel umbral. El primero requiere da-

tos exactos y pleno conocimiento acerca de la eficacia de una estrategia de control de plagas sobre la plaga. El último no es un problema sencillo debido a que las plagas tienden a desarrollar resistencia.

Además, un modelo de umbral con frecuencia se utiliza para las plagas que dañan la producción pero que no están matando lentamente al árbol, por lo que en algún punto el valor de la producción perdida excede el costo de control. Debido a que se debe pensar en las plantas perennes en el largo plazo, el daño actual tiene potencialmente un efecto importante cuando se considera toda la vida poten-

cial del árbol. La determinación del umbral es más complicada para los árboles que para los cultivos de ciclo corto. Este análisis indica que las enfermedades en las plantas perennes no encajan bien en el modelo de umbral. Para obtener más información sobre este enfoque, véase a Stern (1966).

Carlson (1969) empleó un marco modelo de la teoría de la decisión para introducir incertidumbre en la literatura del manejo de plagas. Lo hizo mediante el supuesto de que los distintos niveles de población de plagas son estados del mundo y las aplicaciones de plaguicidas son las acciones disponibles de los cultivadores. A cada estado se le puede asignar una probabilidad de ocurrencia. La asignación de estas probabilidades de manera objetiva se basa en las realizaciones pasadas. Sin embargo, debido a que tales realizaciones no siempre están disponibles, la opinión de los expertos puede sustituirse para dar probabilidades subjetivas.

En este tipo de modelo, la meta del cultivador es maximizar su utilidad esperada (normalmente se supone que son ingresos monetarios) al tomar en consideración la mejor recompensa. Carlson (1969) señala que los cultivadores propensos al riesgo pueden no maximizar la utilidad esperada, sino más bien minimizar las varianzas (criterio media-varianza). Para nuestros propósitos, el principal inconveniente de este enfoque se basa en su fundamento: la definición de la función de utilidad del cultivador y la determinación de las probabilidades para cada estado del mundo, que según Carlson, explica la razón de que poco trabajo empírico sigue este enfoque.

Los modelos de decisión basada en el comportamiento se originaron para entender mejor por qué el uso de plaguicidas varía más de agricultor a agricultor que de cultivo a cultivo (Mumford y Norton, 1984). Estos modelos se basan en el hecho de que los cultivadores tienden a tomar sus decisiones sobre el control de plagas basados exclusivamente en sus experiencias anteriores y en su actitud hacia el riesgo. Esto explica por qué las decisiones de los cultivadores tienden a permanecer constantes a través del tiempo (esto es, estandarizadas),



lo que reduce el esfuerzo en la toma de decisiones. Este enfoque teórico no es muy sugestivo porque ignora aspectos relevantes, tales como la eficacia de la estrategia de control, los niveles de incidencia de la enfermedad, la eficiencia en función de los costos y la naturaleza dinámica de las enfermedades en las planta perennes, entre otros.

Los modelos de optimización resultan del trabajo conjunto entre estudiosos de diversas disciplinas, tales como economistas agrícolas, agrónomos, fitopatólogos, matemáticos y ecólogos, entre otros. Aunque la meta de cada modelo varía, hay un factor común que consiste en encontrar la estrategia óptima de control de plagas.

Existen cuatro ramas de modelos de optimización: la productividad de las estrategias de control de plagas, la función de daño en forma reducida, las funciones de daño en forma estructural y los modelos de especies invasoras (Cobourn *et al.*, 2008). En esta revisión, el objetivo es identificar los elementos más útiles de esas ramas para modelar los detalles del problema de la enfermedad  $PC$ .

Lichtenberg y Zilberman (1986) estudiaron los aspectos económicos de los agentes de control de daños y aportaron una contribución importante para la especificación de los modelos. Según ellos, hay dos conceptos que son de crucial importancia al modelar el manejo de plagas: el potencial de producción y la reducción. El potencial de producción se define como la máxima producción que se puede obtener en ausencia de ataques de plagas. Los daños por plagas reducen la producción en relación con la máxima producción posible. Los insumos para el control de daños mitigan la disminución de la producción causada por las plagas a través de su capacidad de reducción. La reducción se define con una disminución del daño potencial por plagas.

Al modelar el manejo de plagas, es importante tener en cuenta que las plagas generan tolerancia o resistencia a los plaguicidas. En otras palabras, estos insumos se vuelven cada vez más ineficaces. El concepto de reducción permite entender un fenómeno que anteriormente se consideraba una paradoja.

Si el modelo ignora la capacidad de reducción de los plaguicidas y solamente tiene en cuenta la cantidad del insumo mismo, esto reducirá su capacidad para predecir con precisión el comportamiento común de un cultivador que consiste en aumentar la cantidad de uso de plaguicidas cuando su eficacia disminuye. Tratar los plaguicidas como cualquier otro insumo que contribuye directamente a la productividad, por ejemplo los fertilizantes, en lugar de centrarse en su capacidad de reducción, dará como resultado la sobreestimación de la productividad marginal del plaguicida, lo que a su vez llevará a implicaciones equivocadas en las políticas. Por ejemplo, se puede recomendar la aplicación intensiva de plaguicidas, incluso en casos de su uso excesivo (Lichtenberg y Zilberman, 1986).

Se debe tener en cuenta que el concepto (esto es, la función de reducción) es muy útil al considerar las enfermedades en las plantas perennes, ya que las estrategias de control de plagas tienden a ser rentables en presencia de la detección oportuna. Es necesario modelar la dinámica de las enfermedades para comprender el posible efecto sobre los insumos requeridos por unidad de superficie (costos de las estrategias de control en función de la incidencia de las enfermedades)

Brown, Lynch y Zilberman (2002) han utilizado este enfoque para analizar dos estrategias de control de plagas para la enfermedad de Pierce, que afecta los viñedos de California. La primera estrategia consiste en eliminar de las áreas riparias aquellas plantas que hospedan el agente causal (bacteria *Xylella Fastidiosa*), que es transportado por un insecto que se alimenta del xilema (la chicharrita). Investigaciones anteriores habían indicado que el porcentaje de insectos portadores de la bacteria es bastante alto, estimado en alrededor del 90%. La segunda estrategia consiste en colocar una barrera entre los viñedos y el área riparia (se supone que la eficacia de la barrera depende de su ancho).

La literatura sobre el manejo de plagas tiende a vincular los sistemas biológicos y económicos a través de las funciones de daño (Cobourn *et al.*, 2008; Jetter, Summer y Civerolo, 2000;

Alamo *et al.*, 2007). Un enfoque comúnmente utilizado para especificar una función de daño supone que la pérdida de rendimiento es una función de la población de la plaga; esta última es exógena. Estos modelos son útiles para fines tales como evaluar los efectos en el bienestar debido a un brote de la enfermedad y sus consiguientes efectos sobre los precios, que a su vez afectan la oferta y la demanda. Sin embargo, son menos precisos para los impactos directos sobre la producción de las plantas perennes, ya que ignoran la dimensión temporal del problema. Además, se debe tener cuidado al usar los modelos de función de daño en forma reducida para asegurarse de que se adaptan al problema en cuestión.

Para superar la falta de dinámica de los modelos de función de daño reducido, los estudiosos desarrollaron los modelos de función de daño en forma estructural en los que se endogeniza el comportamiento de la plaga. Un ejemplo lo proporcionan Cobourn *et al.*, (2008), quienes construyeron un modelo teórico para estudiar los olivares amenazados por la mosca del olivo. Su modelo especifica el daño de la fruta (en el momento y lugar) en función de las variables climáticas, las características de la fruta (atracción del insecto) y las prácticas de manejo. La inclusión de las dimensiones espaciales y temporales le permite al responsable de la toma de decisiones tener información sobre las tasas de daño por sitio y momento en la temporada cuando ocurre ese daño, en lugar de obtener una cifra acumulada para todo el huerto. El beneficio práctico es tener una herramienta para un uso más racional y rentable de los plaguicidas.

Cobourn *et al.* (2008), encontraron, entre otros resultados, que las aplicaciones de plaguicidas realizadas durante mayo y junio no eran necesarias. Esta especificación es muy atractiva para las enfermedades de las plantas perennes, pero es muy exigente en cuanto a la información (en el nivel de árbol) y al conocimiento de la plaga (qué factores atraen la plaga en estudio).

Otro estudio incluido en esta categoría lo realizaron Marsh *et al.* (2000). Este modelo introduce las relaciones entre el vector de la pla-

ga, la plaga y la planta. Para validar su modelo teórico, estos autores emplearon la necrosis reticular por el virus del enrollamiento de las hojas de la papa (PLRV, por su sigla en inglés), transmitido por áfidos, para los datos de producción de papa correspondiente al estado de Washington. Marsh *et al.* (2000), mencionaron que había una estrategia eficaz de control del PLRV (445/US\$/hectárea). Sin embargo, tenía tres inconvenientes principales: (1) los insectos desarrollan resistencia a los plaguicidas; (2) también se eliminó la población natural del depredador; y (3) una mayor preocupación de los consumidores debido al uso de plaguicidas de alta toxicidad.

Marsh *et al.* (2000), presentan un modelo dinámico discreto en el que se maximiza el beneficio neto al escoger las aplicaciones de insecticidas, sujeto a tres restricciones: (1) la dinámica de los áfidos; (2) la dinámica del depredador; y (3) una limitación de calidad. Los resultados mostraron que es posible usar una estrategia de control de áfidos que cuesta 136/US\$/hectárea. Implica utilizar un aficida selectivo que no mata a los depredadores naturales. Estos ayudan a controlar las reinfestaciones de áfidos, lo que reduce las aplicaciones a mediados y finales de la temporada. De manera adicional, esta óptima estrategia reduce el riesgo de almacenamiento asociado con el PLRV. Aunque este modelo no se refiere a un cultivo perenne, la estructura de este modelo es muy atractiva para el problema en cuestión, ya que considera el tiempo y el ingreso neto y también incluye una ecuación de movimiento para la plaga.

La literatura sobre las especies invasoras se centra en las dimensiones espaciales y temporales de su propagación para evaluar cuáles son las estrategias a seguir con el fin de reducir el impacto que estas especies causan. Un ejemplo de esta literatura lo aportan Sharov y Liebhold (1998), quienes estudian la amenaza de la polilla gitana para los bosques comerciales al noreste de los Estados Unidos.

Conviene señalar que las estrategias identificadas para controlar la propagación de la polilla gitana incluyen las combinaciones de cuarentena, detección y erradicación de



colonias aisladas que atacan los árboles en áreas no infestadas, erradicación total y zonas de barreras. Sharov y Liebhold especifican un modelo que se centra solamente en las barreras, para evitar una mayor complejidad. La especificación de su modelo incluye la dinámica, la información espacial y el valor presente neto para determinar el valor de costo-beneficio de las alternativas. Consiste en una sola ecuación, el valor presente de los beneficios netos totales. El término del costo es una función de los costos de control, las dosis de aplicación objetivo, la longitud del frente poblacional, la distancia desde el punto de introducción y el tiempo. Los beneficios netos dependen del área no colonizada, la longitud del frente poblacional, la distancia desde el punto de introducción y el tiempo.

Spreen, Zansler y Muraro (2003) cuantificaron la pérdida económica incurrida por un cultivador en los casos en que los árboles estaban infectados con el cáncer de los cítricos. El enfoque utilizado incluyó definir la pérdida económica como la diferencia entre el valor presente neto de los árboles erradicados y el valor presente neto de los árboles de sustitución. Ellos consideraron dos escenarios: (1) una situación en la que el programa de erradicación supera los obstáculos legales y es eficaz; y (2) una situación en que el programa no es eficaz y la Florida se convierte en un área endémica de la enfermedad chancro de los cítricos. Supusieron precios históricos y también precios más altos como resultado de menor oferta de cítricos. Sus análisis se centraron en naranjas procesadas y en toronjas frescas y procesadas.

Sus resultados destacan la importancia de los efectos de los precios futuros en los resultados. Si se consideran los precios históricos, la pérdida es más alta para el escenario endémico (menos oferta-precio más alto), que para el escenario de erradicación. Los resultados cambian si se supone que los precios futuros son más altos (los autores lo llaman *optimista*); en ese caso, el escenario endémico da por resultado pérdidas más altas que el de erradicación. De manera adicional, este trabajo ofrece una implicación interesante de las políticas: el valor que se debe compensar al cultivador

en caso de erradicación obligatoria, que es un resultado importante para el caso de la enfermedad PC.

## Modelo teórico

Para el desarrollo de un modelo de la enfermedad PC en la industria palmera colombiana, se adapta el enfoque utilizado por Clark, que es un modelo tipo forestal que aborda el problema de rotación (Clark, 2005). Nuestro modelo se diferencia en que está propuesto para agregar el ingreso de las ventas periódicas de fruta, en lugar de vender toda la producción (la madera en los modelos forestales) en el periodo final. Además, se incluye una ecuación de movimiento para la incidencia de la enfermedad.

En general, el modelo busca maximizar el valor presente de las ganancias netas (ingresos menos costos) al escoger el periodo de tiempo óptimo para renovar (variable de control). Se supone que los cultivadores renovarán con el mismo cultivo y este escenario se adapta a las funciones dinámicas continuas. Al incluir una ecuación de movimiento para la incidencia de la enfermedad, se pueden evaluar el efecto en la producción para varios niveles de la enfermedad, así como el efecto en los costos de producción a partir de las estrategias de control disponibles con respecto a la dinámica de la incidencia de la enfermedad. La disminución del rendimiento y el aumento de los costos impactan el beneficio neto, por lo que el periodo óptimo para renovar cambia cuando se compara con una situación sin enfermedad. Este enfoque proporciona una respuesta a la pregunta de cuál es el periodo de tiempo

**Para motivar el desarrollo del modelo teórico, se tiene en cuenta la situación general que involucra un cultivo perenne.**

óptimo en que un cultivador debe renovar, una vez que una enfermedad ha infestado su huerto. También ofrece la posibilidad de responder preguntas tales como el número máximo de árboles que se pueden eliminar y que la operación siga siendo financieramente viable.

Para motivar el desarrollo del modelo teórico, se tiene en cuenta la situación general que involucra un cultivo perenne. Típicamente, el cultivo requiere de una fase de establecimiento de varios años durante la cual el rendimiento aumenta con el tiempo hasta cuando alcanza la máxima producción. Luego entra en la fase de producción (fase productiva o madura) durante la cual el rendimiento se mantiene en o cerca del máximo por un periodo de tiempo que depende de las prácticas de manejo y de un conjunto de factores abióticos y no abióticos. Aunque ciertas plantas perennes pueden ser productivas durante un horizonte temporal largo, típicamente, después de un número determinado de años (conocido como la vida económica del huerto), se tiene especialmente en cuenta la renovación del huerto. Para desarrollar el modelo, seguimos el enfoque utilizado por Clark (2205); las condiciones a que se enfrenta el cultivador en ausencia de una enfermedad específica se presentan a continuación. Este puede considerarse como el punto de referencia o el escenario planeado del cultivador. Para una rotación, la función de beneficio neto viene dada por:

$$NPV = \int_0^T pY(t)e^{-rt} dt - Re^{-rT} \quad (1)$$

donde  $p$  es el precio neto definido como el precio unitario menos el costo unitario de la producción (por simplicidad, lo consideraremos fijo),  $Y(t)$  es la producción de fruta en el periodo, puede interpretarse como la edad del árbol,  $T$  representa el horizonte temporal que es considerado la vida económica del cultivo,  $r$  es igual a la tasa de descuento y  $R$  representa el costo de renovación. Puesto que una de las preocupaciones es determinar la edad óptima de renovación, se debe incluir en la especificación del modelo los ingresos futuros procedentes de los proyectos futuros (rotaciones, o el valor residual). Esto se acomoda aquí al

suponer rotaciones perpetuas. En este caso, la función de beneficio neto se puede escribir como:

$$Max_r NPV = p \int_0^T Y(t) e^{-rt} dt + \left[ p \int_0^T Y(t) e^{-rt} dt - R \right] \frac{1}{(e^{rT} - 1)} \quad (2)$$

donde el segundo término de (2) convierte esto en un flujo perpetuo de ingresos con un horizonte temporal infinito. La maximización de (2) con respecto a  $T$  para determinar el momento óptimo de renovación implica calcular

$$\partial NPV / \partial T = 0 \quad (3)$$

que se puede reorganizar para dar

$$pY(T) = r \left[ p \int_0^T Y(t) e^{-rt} dt - R \right] + \left[ p \int_0^T Y(t) e^{-rt} dt - R \right] \frac{r}{(e^{rT} - 1)} \quad (4)$$

El primer renglón de la expresión (4) representa el beneficio marginal de cosecha (esperando para renovar), que es el beneficio de vender el fruto cosechado en el siguiente periodo. El primer término en el renglón inferior representa el interés en todo el flujo de beneficios (que se retrasó por un año adicional); y el segundo término representa la “renta del sitio”, este es el valor al cual se podría vender el suelo desnudo.

## Escenario con Pudrición del cogollo

En el caso de un campo infectado con la enfermedad PC, el valor presente neto (NPV, por su sigla en inglés) de una rotación, se supone que el cultivador enfrenta una incidencia de la enfermedad, (el número de árboles enfermos) y escoge el número de árboles a tratar, así como el tiempo de rotación óptima,  $T$  para maximizar su valor presente neto. Al final de la rotación, algunos cultivadores han elegido abandonar sus campos debido a la enfermedad PC (Martínez, 2010) y otros podrían renovar con variedades recientemente desarrolladas con algún grado de resistencia a la PC. Por consiguiente, a



diferencia del modelo de Faustmann, se utiliza un valor residual, este valor, determinado por los valores de mercado de la tierra, medirá el valor de la tierra en su uso de más alto valor que puede o no incluir rotaciones adicionales de palma de aceite (Deininger, Jin y Nagaranjan, 2008). El problema de optimización del cultivador es:

$$\text{Max NPV} = \int_0^T [p * Y(D_t, a_t) - c(H_t)] e^{-rt} dt + \phi(T, D_T) \quad (5)$$

Sujeto a:

$$\cdot \dot{D} (D_t, H_t) = b + cD_t - H_t \quad (6)$$

$$0 \leq H_t \leq H_{Max} \quad (7)$$

$$T, Free \quad (8)$$

$$D_T, Free \quad (9)$$

donde,  $p$  es el precio neto como se definió anteriormente;  $Y(D_t, a_t)$  es la producción de fruto de palma de aceite a la edad  $a_t$  con incidencia de la enfermedad  $D_t$ ;  $c(H_t)$  son los costos de control en función de las palmas enfermas tratadas,  $H_t$ ;  $r$  es la tasa de descuento mensual;  $\phi(T, D_T)$  representa la función de valor residual (Leonard y van Long, 1992).

La ecuación (6) muestra la dinámica de la incidencia de la enfermedad  $p_c$ . La enfermedad crece exponencialmente a una velocidad de  $c$ , pero los cultivadores también enfrentan presiones externas a una velocidad de  $b$ . El tratamiento es la única manera de reducir la incidencia de la enfermedad. La limitación (7) indica que el número de plantas tratadas oscila entre 0 y  $H_{max}$ , donde  $H_{max}$  es el número máximo de árboles que se pueden tratar en el periodo de tiempo  $t$ . Finalmente, las ecuaciones (8) y (9) son condiciones de punto final.

## Modelo empírico y resultados

Al suponer formas funcionales específicas para la función objetivo (5) y la ecuación de movimiento (6), se puede especificar un modelo em-

pírico. Este problema de control óptimo es lineal en la variable de control  $H$ . Esto significa que cuando el problema se optimiza, no habrá una solución interior para  $H$ . Esto se denomina un problema *bang-bang* (Chiang, 2000). El valor óptimo para  $H$  es cero o para el rango de valores de descuento considerados (4-15%), la solución óptima para siempre tratar completamente la enfermedad; los cultivadores no deben tolerar ningún número positivo de plantas enfermas.

Existen muchos datos disponibles de la estación de investigación de Cenipalma, Campo Experimental el Palmar de La Vizcaína (CEPLV). Se estimaron los costos de producción y el precio de mercado de un kilogramo de fruto de palma de aceite. En cuanto a los costos de producción, se utilizaron los registros del CEPLV para calcular los costos por kilogramo de racimos de fruta fresca de palma de aceite. Con respecto al precio de mercado de RFF, se utilizó la información mensual durante los últimos veinte años, disponible en la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, Fedepalma (Fedepalma, 2011). Debido a la fluctuación de precios, se establecieron tres niveles de precios diferentes<sup>2</sup> y de cada uno de ellos se restó el costo por unidad, por tanto se utilizaron cinco precios netos diferentes para realizar análisis de sensibilidad.

Se estimaron los rendimientos mensuales de una plantación de palma de aceite colombiana altamente productiva durante treinta años, con base en la información de la Encuesta Anual de Costos de Fedepalma y la estación de investigación de Cenipalma. Se estableció que la función de rendimiento de aceite de palma es cóncava, ya que atraviesa por una etapa de desarrollo, y luego después de la madurez se alcanza un máximo, y a partir del máximo hay una tendencia negativa causada por el hecho de que las palmas más viejas tienden a producir RFF más grandes (la proporción del peso de los frutos respecto al peso total disminuye con la edad), pero en menor cantidad.

De manera adicional, la cosecha de palmas altas implica mayores pérdidas de cosecha, debido a la pérdida de frutos (cuando el

2. Precio medio, precio medio más una desviación estándar (SD), precio medio menos una SD.

racimo cae al suelo en la recolección) y a las dificultades para determinar el grado de maduración del racimo. Esta función de rendimiento constituye lo que se puede considerar el rendimiento potencial en ausencia de enfermedades (Lichtenberg y Zilberman., 1986). En el caso de la plantación con PC, se utilizó información del área de Tumaco, con relación a los niveles de incidencia y a la disminución en el rendimiento potencial.

La estrategia de control propuesta por Cenipalma se probó bajo la presión real de PC, una vez que la enfermedad atacó el CEPLV; la estrategia mostró buen control de la PC. Los investigadores de Cenipalma llevaron registros de todas las actividades e insumos requeridos para el manejo de la PC. Las necesidades de mano de obra se estudiaron en el CEPLV por medio de estudios de tiempo y de movimiento, que proporcionan los costos laborales asociados con el control de la PC. A partir de esta información, se modeló el costo por hectárea de tal manera que: el monitoreo se establece como un costo fijo una vez que la PC está presente, hay un máximo de 180 palmas para ser tratadas con aplicaciones preventivas de plaguicidas y el costo de cortar los tejidos enfermos se calculó por cada palma. Se obtuvo una función lineal de los costos, que relacionó el número de palmas enfermas con los gastos reales de control; su intersección representa los costos fijos de control de la PC.

El número de casos de PC en función del tiempo depende de si se emplea la estrategia de control de PC presentada anteriormente. Si no hay un esfuerzo destinado a controlar la PC, esta se propaga a partir de dos fuentes: una presión de infestación de PC exógena o “ambiental” recuperada de la información del CEPLV y consiste en el número de casos nuevos, aun cuando exista tratamiento. La segunda fuente de PC son las propias palmas enfermas, que si no son tratadas sirven como reservorio del patógeno; este valor se estimó a partir de los datos disponibles en las plantaciones de Tumaco durante el brote de la enfermedad PC en 2007. Finalmente, la información del CEPLV

indica que mediante el uso correcto de la estrategia de control de la PC de Cenipalma, es posible controlar su propagación, al evitar que las palmas de aceite enfermas se constituyan en una fuente del patógeno.

Con respecto al tema de la duración de rotación óptima, se estableció que la presencia de la enfermedad sí impacta la época de renovación, pero los resultados dependen en gran medida del precio supuesto del producto y del factor de descuento.

## Observaciones finales

Con el movimiento cada vez mayor de personas y bienes a través de las fronteras, el tema del control de plagas y enfermedades en plantas y animales seguirá siendo un problema acuciante en la producción de alimentos. En este trabajo, el tema central fue la dimensión económica del control de las enfermedades en las plantas perennes. El análisis de estas plantas se ve complicado tanto por la naturaleza dinámica del proceso de producción como por lo que la planta en sí abarca relacionado con la inversión

Una breve revisión de la literatura anterior revela que varios de los enfoques se han utilizado para estudiar los aspectos económicos de las enfermedades en las plantas perennes. En este trabajo, se considera el caso de la enfermedad de la PC en la industria palmera colombiana. Se desarrolló un modelo de control óptimo de la producción de aceite de palma y se introdujo la presencia de la enfermedad en ese modelo. La forma funcional particular del problema de control óptimo significó que el problema se pudo clasificar como un problema *bang-bang*. En un problema *bang-bang* nunca hay una solución interior, la solución óptima está en una de las fronteras de la variable de control.

Después de la especificación empírica del modelo, se determinó que en el caso de la enfermedad de la PC, la estrategia óptima es siempre tratar completamente cualquier planta enferma con PC a la menor brevedad, según las recomendaciones de Cenipalma.



## Bibliografía

- Alamo, C.; Evans, E.; Bruguera, A.; Nalapang, S. 2007 (octubre). Economic impact and trade implications of the introduction of Black Sigatoka (*Mycosphaerella fijiensis*) into Puerto Rico. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 39, 5-17.
- Brown, C.; Lynch, L.; Zilberman, D. 2002 (mayo). The economics of controlling insect transmitted plant diseases. *American Journal of Agricultural Economics*, 2(84), 279-291.
- Carlson, G. A. 1969. A decision theoretic approach to crop disease prediction and control. *American Journal of Agricultural Economics*, (52), 216-223.
- Chiang, A. 2000. Optimal Control: the Maximum Principle. En: A. Chiang, *Elements of dynamic optimization* (161-204). Long Grove, IL: Waveland Press.
- Clark, C. 2005. Growth and aging. En: C. Clark, *Mathematical bioeconomics. The math of conservation* (223-251). Wiley interscience.
- Cobourn, K.; Goodhue, R.; Williams, J.; Zalom, F. 2008. Pest and agricultural commodity losses: evaluating alternative approaches to damage function estimation. *Agricultural and Applied Economics Association Meeting* (1-45). Orlando: AgEconSearch.
- Deiningner, K.; Jin, S.; Nagarajan, H. 2008. Efficiency and equity impacts of rural land rental restrictions: Evidence from india. *European Economic Review*, 52(5), 892-918.
- Evans, E. A. 2003. Economic dimensions of invasive species. *Choices*, 5-9.
- Fedepalma. 2011. *Anuario estadístico 2011*. Bogotá: Fedepalma.
- Jetter, K. M.; Summer, D.; Civerolo, E. L. 2000. *Ex ante economics of exotic disease policy: Citrus Canker in California. Integrating risk assessment and Economics for regulatory decisions* (1-51). Washington D.C.: USDA.
- Leonard, D.; van Long, N. 1992. Endpoint constraints and transversality conditions. En: D. Leonard; N. van Long, *Optimal control theory and static optimization in economics* (221-262). Edinburgo: Cambridge University Press.
- Lichtenberg, E.; Zilberman, D. 1986. The econometrics of damage control: why specification matters. *American Journal of Agricultural Economics*, 68(2), 261-273.
- Martínez, G. 2010. Pudrición del cogollo, Marchitez sorpresiva, Anillo Rojo y Marchitez letal en la palma de aceite en América. *Revista Palmas*, 31(1), 43-53.
- Martínez, G.; Arias, N.; Sarria, G.; Torres, G.; Varon, F.; Norena, C., et al. 2009. *Manejo integrado de la Pudrición del cogollo*. Bogotá: Cenipalma.
- Mumford, J.; Norton, G. A. 1984. Economics of decision making in pest management. *Annual Review of Entomology*, 157-174, 29.
- Sharov, A.; Liebhold, A. M. 1998. Bioeconomics of managing the spread of exotic pests species with barrier zones. *Ecological applications*, 8, 833-845.
- Spren, T. H.; Brown, M. G. 2008. Production and price effects of new diseases confronting the processed orange industry in Sao Paulo, Brasil and Florida, United States. En: X. Deng; J. Liu; R. Guan (Ed.), *Proceeding of the 11th International Citrus Congress*, II, 1475-1480. Sao Paulo.
- Spren, T. H.; Zansler, M. L.; Muraro, R. P. (2003). The costs and value loss associated with Florida citrus groves exposed to citrus canker. *Proceedings Florida State Agriculture Society*, 116, 289-294.
- Stern, V. M. 1966. Significance of the economic threshold in integrated pest control. *Proceedings of the FAO Symposium on Integrated Pest Control*, 2, 41-56. Roma: FAO.