

Capítulo 18

El control biológico en el contexto de un manejo integrado estratégico de insectos plaga

Chapter 18

Biological control in the context of strategic integrated insect pest management

Diego F. Rincón,¹ Eduardo M. Espitia,¹ Casey W. Hoy^{2,3}

¹ Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA)
² Departament of Entomology, The Ohio State University
³ Agroecosystems Management Program, The Ohio State University, Ohio Agricultural Research and Development Center (OARDC)

Contenido

Introducción826

Contexto histórico y el concepto de MIP827

 Definición de umbrales828

 Planes de muestreo830

 Conservación del control natural832

El MIP y la teoría de sistemas complejos833

 El ciclo adaptativo y los sistemas agrícolas835

 Un nuevo enfoque838

Ejemplos de implementación exitosa de programas MIP en Colombia839

 El MIP en cultivos de papa en Colombia839

 El MIP en cultivos de habichuela y frijol en Colombia840

 El manejo de la broca del café841

Conclusiones843

Agradecimientos843

Referencias844

Resumen

El concepto tradicional de manejo integrado de insectos plaga (MIP) se conoce como una estrategia para reducir el uso de insecticidas químicos. Pese a los beneficios para el ambiente y para la salud pública que trajo la implementación de programas de MIP, el enfoque exagerado en el uso de insumos para eliminar plagas ha incrementado la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas a los cambios del entorno. En este capítulo, se presenta un enfoque estratégico de MIP a la luz de la teoría sobre sistemas complejos. Se analiza un paralelo entre el modelo de ciclo adaptativo y las dinámicas de los sistemas agrícolas, donde se consideran los factores que pueden incrementar la resiliencia de estos sistemas a los cambios ambientales y del mercado. Se presentan ejemplos de implementación de MIP en Colombia y se destacan las características que hicieron de estos casos ejemplos de programas exitosos para un control sostenible de plagas. Dado que el objetivo es incrementar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, la incorporación de métodos de control biológico en programas de MIP debe enfocarse en el fortalecimiento de los sistemas agrícolas a escala local y regional. Esto puede alcanzarse mediante la conservación y el uso sostenible de la biodiversidad, y de una distribución justa del conocimiento y de las capacidades de innovación.

Palabras clave

Biodiversidad, conocimiento, innovación, resiliencia, sistema, sostenibilidad

Abstract

The traditional concept of Integrated Insect Pest Management (IPM) is known as a strategy to reduce insecticide use. Despite the clear benefits for the environment and public health that IPM implementation provided, the strong focus on the use of external inputs to kill pests has increased vulnerability of agricultural systems to environmental changes. In this chapter, we present a strategic approach to IPM in light of the theory on complex systems. We analyze a parallel between the adaptive cycle model and the dynamics of agricultural systems, considering the factors that may increase resilience of these systems to changes in environment and market. We present examples of IPM implementation programs in Colombia, highlighting the characteristics that made these cases examples of successful programs for sustainable pest control. Because the goal is to increase sustainability in agricultural systems, inclusion of biological control strategies into IPM programs should focus on strengthening agricultural systems at both regional and local scales. This could be achieved through sustainable use and conservation of biodiversity, and fair distribution of knowledge and innovation capabilities.

Keywords

Biodiversity, innovation, knowledge, resilience, sustainability, system

Introducción

Por más de setenta años, el uso de compuestos tóxicos para eliminar organismos no deseados ha sido el principal enfoque de las diferentes estrategias para el control de plagas. Los problemas ambientales y de salud pública que se han presentado (y se siguen presentando) como consecuencia de tal enfoque dieron origen, a finales de la década de los años cincuenta y principios de los sesenta, al concepto de *manejo integrado de plagas* (MIP) (Levins, 2007; Gray, Ratcliffe, & Rice, 2008). El concepto nació como la *integración complementaria de controles químicos y biológicos*, usando umbrales de acción para determinar cuándo una intervención con insecticidas químicos es necesaria para evitar que las poblaciones de las plagas alcancen un umbral de daño económico predefinido. Pese a que fue concebido para el manejo de insectos plaga, el concepto de MIP se aplica también al manejo de malezas, patógenos y vertebrados plaga (Gray et al., 2008). Actualmente, el concepto tradicional de MIP es considerado un paradigma, y es la hoja de ruta más común de los gobiernos y las entidades privadas para el manejo de plagas agrícolas (Coble & Ortman, 2008; Morse, 2008; Van Lenteren, 2009).

Pese a los notables beneficios para la salud pública y para el ambiente que trajo consigo el uso del concepto tradicional de MIP, su posterior implementación ha resultado insuficiente para reducir la dependencia de los sistemas agrícolas de los agroquímicos (Lewis, Van Lenteren, Phatak & Tumlinson, 1997). En principio, el concepto original involucra medidas preventivas y múltiples alternativas de control, pero este se ha simplificado en un enfoque *terapéutico* (táctico) basado en la aplicación de insumos (biológicos o químicos) para controlar plagas puntuales. Este enfoque ha demostrado ser una solución a corto plazo y superficial de un problema sistémico (Levins, 2007).

El enfoque terapéutico del MIP tradicional ha estimulado una gran cantidad de desarrollos para el control de plagas, pero con un impacto discutible. Los mayores y más recientes avances se han dado en los campos de la química y la biología molecular con

productos o tecnologías cada vez más eficientes para eliminar organismos no deseados, y menos tóxicos para los humanos y el ambiente (Christou, Capell, Kohli, Gatehouse, & Gatehouse, 2006; Gordon & Waterhouse, 2007; Courtier-Orgogozo, Morizot, & Boëte, 2017). Sin embargo, el problema de fondo persiste.

El uso de plaguicidas en el mundo se incrementa en una media de 98.941 toneladas de ingrediente activo cada año (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2016), pero las pérdidas ocasionadas por plagas, enfermedades y malezas se mantienen entre el 30 % y el 40 % (Oerke, 2006). Además, entre 1990 y 2010 el uso de plaguicidas químicos se incrementó más rápidamente que el rendimiento por ha de los cultivos de frutas, hortalizas y cereales juntos (figura 18.1). Se calcula que por cada tonelada de rendimiento que se incrementa en estos cultivos, el uso de plaguicidas se incrementa en 110 toneladas de ingrediente activo cada año (FAO, 2016). Ante este panorama, muy inquietante en términos de sostenibilidad, el incremento en la productividad de los cultivos como resultado de la manipulación de la genética y de la fertilización química parece injustificable, especialmente si no se conciben nuevas estrategias para la protección de cultivos.

En este capítulo, se presenta un *enfoque estratégico de MIP* en el que la teoría socioecológica juega un papel central. Este enfoque incluye ideas introducidas por Lewis et al. (1997) y complementadas más tarde por Levins (2007). Nosotros profundizamos sobre el concepto a la luz de la teoría de sistemas complejos (*sensu* Holling & Gunderson, 2002), haciendo énfasis en la importancia de una *integración estratégica* de metodologías de control y en el papel del conocimiento para incrementar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Al final, se presentan algunos ejemplos de la integración efectiva de agentes de control biológico a programas de MIP y se destacan las características que hicieron de estos casos ejemplos de éxito en el control sostenible de plagas.

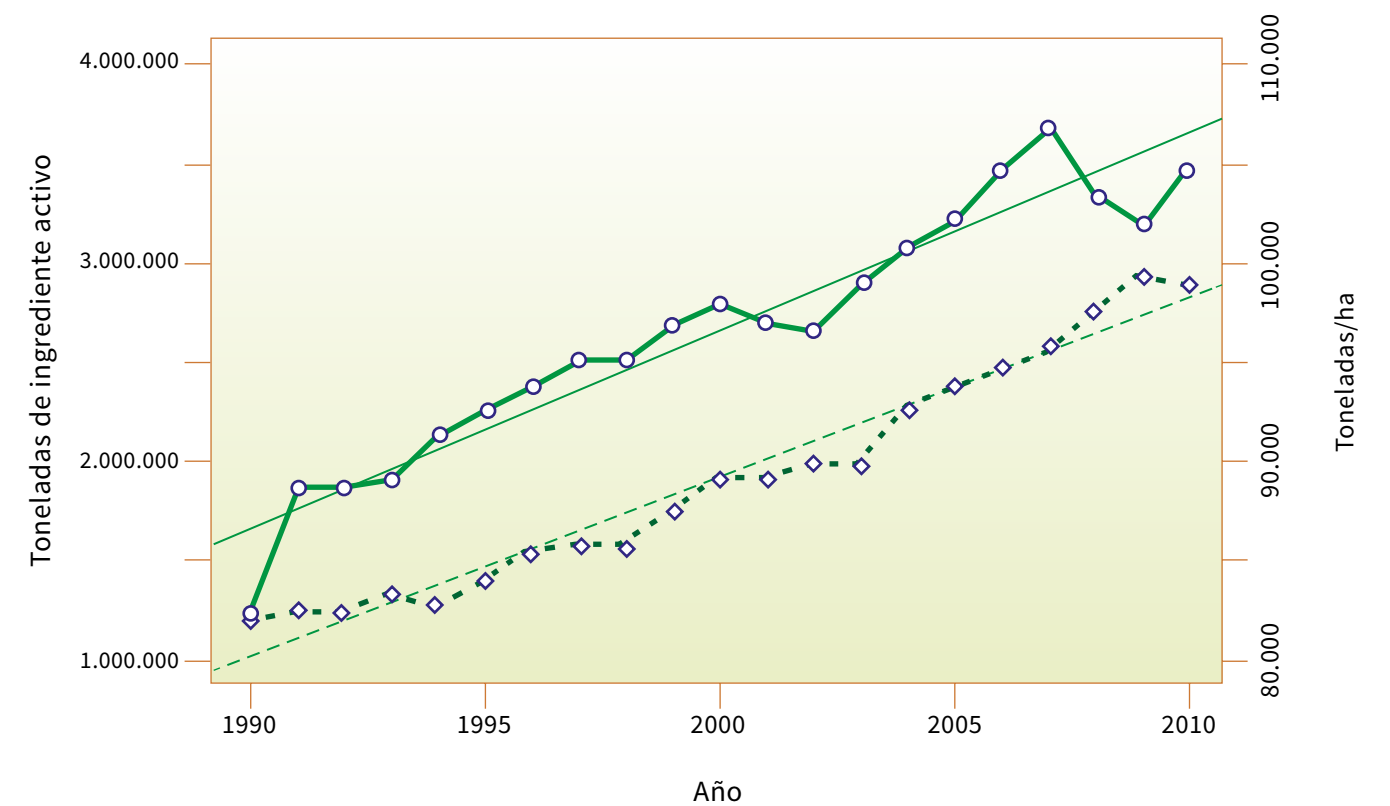


Figura 18.1. Comparación entre el crecimiento en el rendimiento global en cultivos de cereales, frutas y hortalizas (línea continua) y el uso de plaguicidas químicos (líneas discontinuas): la recta continua (pendiente = 98,941 [EE = 6,866]) y la discontinua (pendiente = 900,0 [EE = 42,74]) representan la regresión lineal del rendimiento y el uso de plaguicidas en el tiempo respectivamente.

Fuente: FAO (2016)

Contexto histórico y el concepto de MIP

La historia del MIP se deriva del uso de insecticidas en la agricultura, el cual podría ser tan antiguo como la agricultura misma. Sin embargo, los primeros registros del uso de compuestos direccionados para el control de plagas datan del 2500 a. C., varios milenios después de los primeros indicios de agricultura (Metcalf, 1994). Por siglos, los insecticidas se limitaron a sustancias extraídas de plantas y algunos compuestos inorgánicos simples que aparecieron a finales del siglo XIX. Con el descubrimiento de las propiedades insecticidas del DDT (1,1,1-tricloro-2,2-bis-etano) por el químico suizo Paul Herman Müller en 1939, se inició la era moderna de los insecticidas. El DDT fue utilizado con éxito durante la II Guerra Mundial para contener el peligroso avance de epidemias de enfermedades

transmitidas por insectos, como: fiebre amarilla, tifo, elefantiasis y malaria (Gray et al., 2008). En la agricultura, el DDT también favoreció la producción en cultivos alimenticios y forestales y en ganadería. El éxito inicial del DDT fue tal, que los insecticidas fueron prácticamente el único método de control de insectos entre 1950 y principios de la década de los ochenta. Como consecuencia, las evidencias de desbalances ecológicos severos se empezaron a acumular: resistencia a insecticidas, acumulación de clorinatos aromáticos en la cadena alimenticia, reducción de poblaciones de enemigos naturales, brotes de plagas secundarias, resurgencia de plagas primarias y aparición de residuos de insecticidas en frutas y vegetales (Metcalf, 1994).

A raíz de los evidentes desequilibrios ecológicos y los problemas de salud pública ocasionados por la dependencia de los insecticidas, cuatro científicos de California (EE. UU.) articularon el concepto de MIP (Stern, Smith, Van den Bosch, & Hagen, 1959). Como es sintetizado por Naranjo y Ellsworth (2009), el concepto original de MIP elaborado por Stern et al. (1959) está compuesto de cuatro elementos: 1) umbrales para determinar la necesidad de controlar las poblaciones plaga, 2) planes de muestreo para detectar los niveles críticos de las plagas, 3) comprensión y conservación del control natural ejercido por enemigos naturales presentes en el sistema, y 4) uso de insecticidas selectivos u otros métodos de control que complementen, mas no reduzcan, el control natural.

Definición de umbrales

Junto con la introducción del MIP, Stern et al. (1959) acuñaron y definieron varios conceptos relacionados

con los umbrales para determinar la necesidad de la aplicación de un control. La presencia de cierta plaga en un cultivo puede resultar en un *daño* fisiológico a las plantas, que se traduce en, por ejemplo, pérdida de área foliar o pérdida de capacidad fotosintética. Ese *daño*, a su vez, puede resultar en un *perjuicio* para el cultivo, el cual se expresa en términos de la reducción en cantidad o calidad del rendimiento. El *daño* es expresado en términos fisiológicos, mientras que el *perjuicio* en unidades que expresen la cantidad o la calidad de la cosecha (p. ej., bultos de papa, tallos de rosas con calidad de exportación, etc.). Si se conoce el precio de esta por kg, es posible determinar la densidad de plaga (insectos/planta, plantas con síntomas de enfermedad, etc.) que puede ocasionar un *perjuicio* cuyo costo equivalga al costo del control. Esa densidad de plaga se conoce como el *umbral de daño económico* (UDE). Sin embargo, muchos métodos de control no tienen un efecto inmediato sobre el *daño* que ocurre progresivamente, por lo que generalmente las medidas de control deben aplicarse en un nivel de plaga inferior al UDE. Ese nivel de plaga se conoce como *umbral económico* (UE) (figura 18.2).

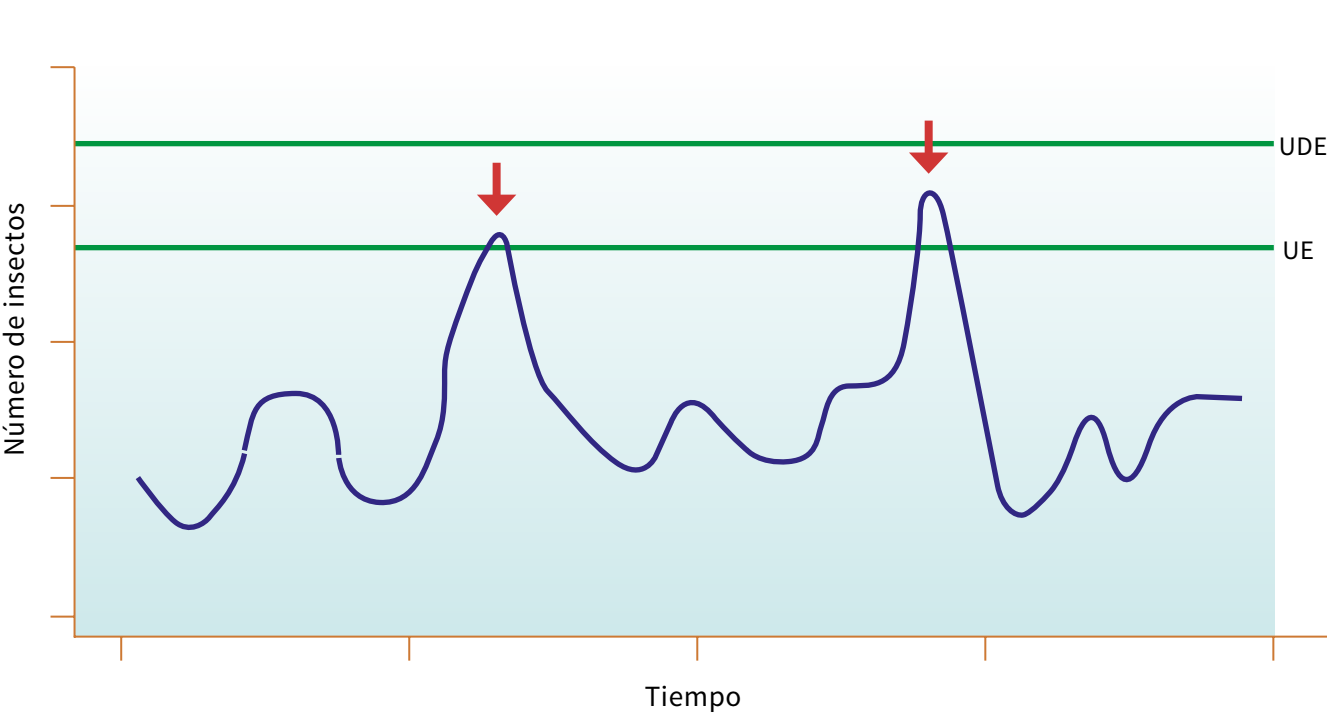


Figura 18.2. Dinámica de una plaga en la que se muestra la relación entre el umbral de daño económico (UDE) y el umbral económico (UE); las flechas indican la aplicación de una estrategia de control.

Fuente: Modificado de Pedigo y Rice (2014)

En el sentido más estricto, el cálculo del UE debe incorporar información sobre la tasa de crecimiento de la plaga. Debido a que la tasa de crecimiento de las plagas rara vez es predecible en las variables condiciones de campo, el UE convencionalmente se determina como un porcentaje (fijo o variable) del UDE (Pedigo & Rice, 2014). Actualmente, los conceptos de UDE y UE son usados ampliamente por técnicos, profesionales e investigadores del área del manejo de plagas (insectos, enfermedades y arvenses).

Para calcular el UDE, es necesario cuantificar la relación entre el daño ejercido por la plaga y el rendimiento del cultivo. Esta relación se basa en la respuesta de la planta al daño, la cual depende de cinco factores (Pedigo, Hutchins & Higley, 1986): 1) tiempo en el que ocurre el daño con respecto a fenología del cultivo, 2) parte de la planta sujeta al daño, 3) tipo de daño (defoliación, succión, etc.), 4) severidad del daño, y 5) factores ambientales. La consideración de algunos o de todos estos factores depende del cultivo y de la plaga que está bajo estudio, aunque la severidad (cantidad) del daño es el factor más importante para la definición de umbrales

en la mayoría de las interacciones daño-rendimiento. Una excepción notable son cultivos en los que la tolerancia al daño o el UDE resultan ser tan bajos que factores diferentes a la severidad del daño (p. ej., la parte de la planta sujeta al daño, el clima, etc.) pueden ser más prácticos para la definición de los umbrales (Hoy, McCulloch, Sawyer, Shelton, & Shoemaker, 1990).

Dos tipos de ensayos se usan para determinar la relación entre la severidad del daño y el rendimiento. El primero es un experimento controlado en el que se establecen unidades experimentales (parcelas) de cultivo sometidas a diferentes densidades de plaga, incluyendo parcelas sin plaga que sirven como control. Otra opción es un estudio observacional en el que se toman muestras de diferentes cultivos en zonas de producción que contengan información sobre la densidad de la plaga y el rendimiento. En ambos casos, el resultado es una curva de respuesta del rendimiento en función de la densidad de la plaga. Pedigo et al. (1986) presentan una curva de daño generalizada que describe la relación teórica entre la intensidad de daño y el rendimiento (figura 18.3).

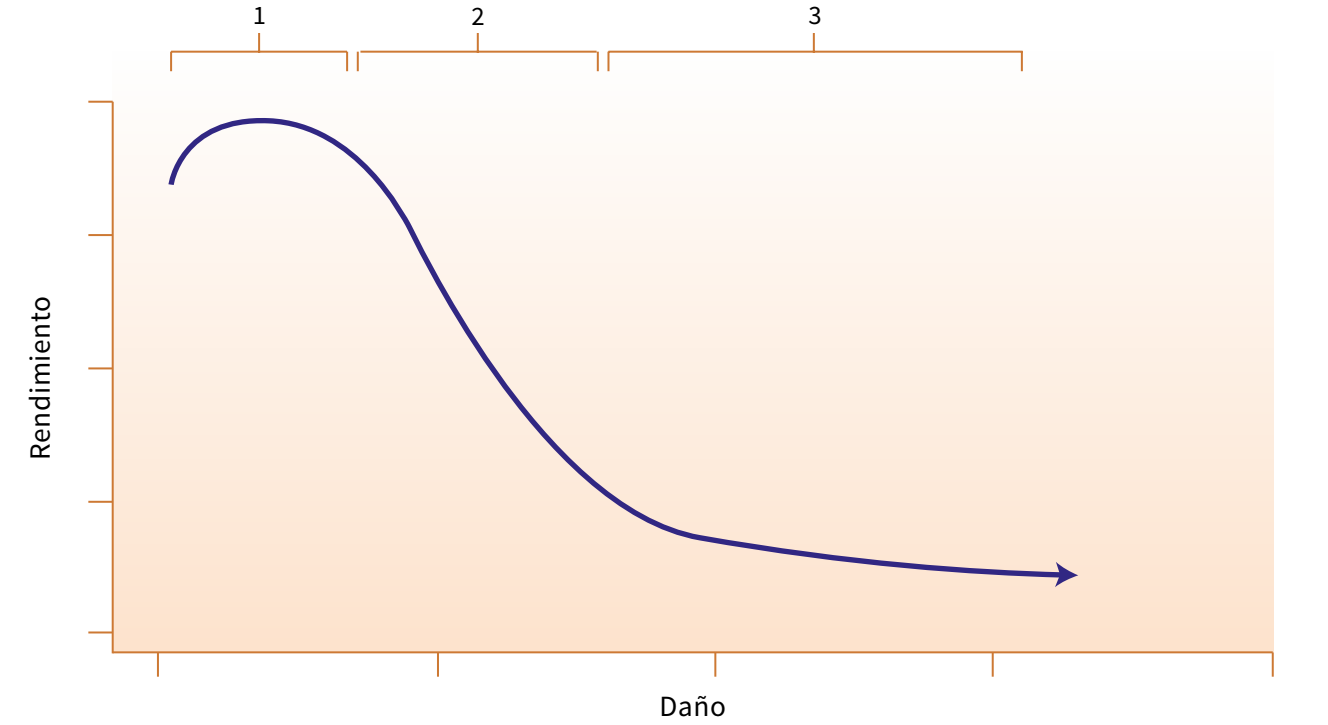


Figura 18.3. Relación teórica entre daño y rendimiento de un cultivo: la etapa 1 se refiere a la tolerancia/sobrecompensación; la etapa 2, a la reducción lineal del rendimiento, y la etapa 3, a la insensibilización de la respuesta del cultivo al daño.

Fuente: Modificado de Pedigo et al. (1986)

Inicialmente, el cultivo tiene una tolerancia al daño e incluso puede compensar o sobrecompensar el daño ejercido por una plaga. Posteriormente, se observa una relación lineal negativa entre el daño y el rendimiento, que es luego interrumpida por un periodo de disminución del incremento del daño por unidad de incremento de plaga (insensibilización) ocasionado por competencia entre individuos de la plaga.

En la práctica, la curva de respuesta del rendimiento rara vez luce como la figura 18.3. Por cuestiones logísticas, el rango de densidades de plaga que es posible evaluar en relación con el rendimiento es limitado. Por ejemplo, rara vez es posible detectar el periodo de tolerancia o sobrecompensación, por lo que muchas veces la curva es monotónica decreciente (p. ej., exponencial negativa o lineal negativa). Los modelos empíricos más usados para describir la relación e intensidad de daño-rendimiento son: monomolecular negativo, exponencial negativo y logístico negativo. En cualquier caso, los datos generalmente se ajustan a varios modelos y luego se lleva a cabo la selección del modelo más adecuado utilizando métodos formales, como el criterio de información de Akaike (AIC, por su sigla en inglés), el criterio de información bayesiano (BIC, por su sigla en inglés) o el coeficiente de determinación. Existen excelentes libros de texto que presentan los modelos empíricos, explican el paso a paso de la estimación de parámetros y el procedimiento para seleccionar el mejor modelo (p. ej., Madden, Hughes, & Bosch, 2007; Bolker, 2008).

Para estimar el UDE, primero debe calcularse el rendimiento potencial (RP) y el rendimiento real (RR). Estos parámetros se calculan con el modelo daño-rendimiento: RP corresponde al valor predicho cuando la densidad de la plaga es 0, y RR corresponde a RP menos el costo del control expresado en términos de kg cosechado (Cc). El UDE es la densidad de la plaga cuando el rendimiento corresponde al RR. El valor de RR se inserta en el modelo daño-rendimiento, y este se resuelve para la densidad de la plaga (es decir, variable independiente de modelo daño-rendimiento). Es importante tener en cuenta que el UDE no es un valor fijo, sino que puede variar en función del precio del producido, del Cc o de ambos.

Planes de muestreo

El diseño de un plan de muestreo eficiente y práctico para determinar el estado de las poblaciones de la plaga objetivo con relación al UDE puede ser una limitante para la aplicación del MIP. De hecho, Stern et al. (1959) reconocen que el muestreo y el diagnóstico de los niveles de una población de insectos plaga deben ser llevados a cabo por entomólogos profesionales, debido a que la mayoría de los métodos de muestreo toman más tiempo y esfuerzo del que muchos agricultores aceptarían. Afortunadamente, algunos avances posteriores en estadística han facilitado el desarrollo de planes de muestreo de máxima eficiencia que podrían ser usados por agricultores.

La idea es clasificar (no necesariamente estimar) el tamaño de las poblaciones de la plaga en una de al menos dos categorías: por encima del UE (umbral económico) o por debajo del UE. La forma más eficiente de llevar a cabo con tal clasificación es a través de un muestreo secuencial. En este tipo de muestreo, al tiempo en el que los conteos de la plaga son recolectados (x_i), el acumulado ($\sum x_i$) se va actualizando y comparando con el tamaño de la muestra hasta ese momento. El muestreo termina cuando la curva del acumulado de conteos en función del tamaño de la muestra cruza una de las dos (o más) líneas críticas predefinidas. Dependiendo de la línea que se cruzó (umbral inferior o superior), se decide si debe aplicarse o no un método de control (figura 18.4a) y, en algunos casos (es decir, más de dos líneas críticas), la frecuencia de los muestreos subsiguientes (figura 18.4b).

Para desarrollar un plan de muestreo secuencial, el procedimiento más popular se conoce como la razón de probabilidades secuencial de Wald (SPRT, por su sigla en inglés) (Wald, 1945). El SPRT fue desarrollado por Abraham Wald, un húngaro judío que emigró a los EE. UU. durante la II Guerra Mundial, para determinar con precisión el estado del armamento antiaéreo aliado usando el menor número de muestras posible. La idea general del SPRT, aplicado a un plan de muestreo de MIP, es llevar a cabo una prueba de hipótesis para clasificar la densidad de la plaga, m , una vez se cuente con evidencia suficiente para alcanzar un nivel de precisión predefinido. La hipótesis nula, H_0 , en la que $m = m_0$, es confrontada con la hipótesis alterna, H_a ,

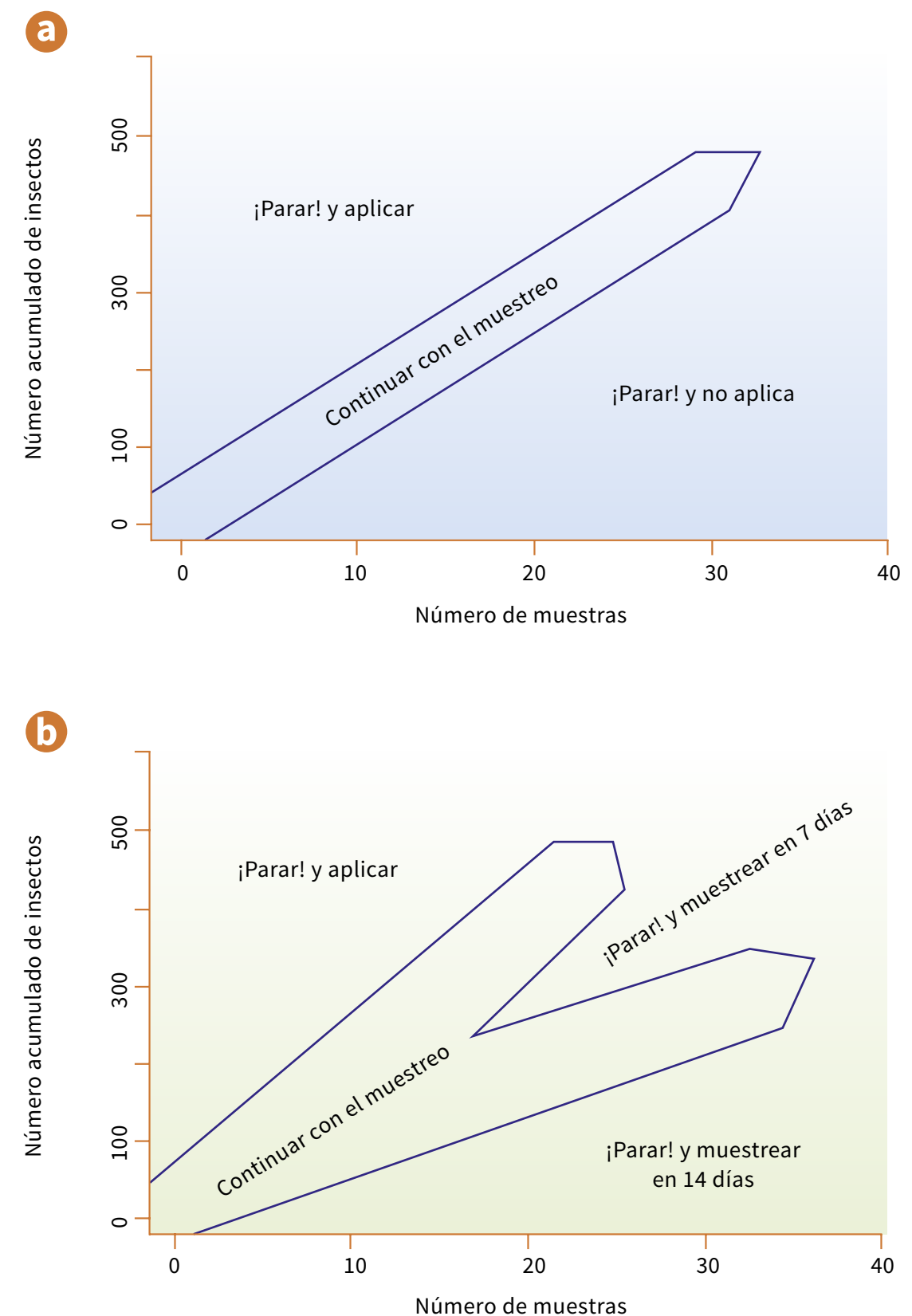


Figura 18.4. Ejemplos hipotéticos de planes de muestreo secuencial: el usuario toma muestras del cultivo y va marcando el número acumulado de insectos con el número de muestras recolectadas. El muestreo se termina cuando la línea de acumulado cruza alguna de las líneas de la gráfica, cuando se toma la decisión respectiva. El plan de muestreo puede basarse en dos (a) o más líneas críticas (b).

Fuente: Modificado de Binns et al. (2000)

que significa que $m = m_1$, donde $m_0 < UE \leq m_1$. Para calcular las líneas críticas de un plan de muestreo SPRT, además de conocer el UE, se debe contar con suficiente información para estimar los parámetros de un modelo de distribución de probabilidades que describa los conteos de la población de la plaga por unidad de muestreo (p. ej., distribución binomial negativa, distribución binomial, etc.).

Un segundo método para desarrollar un plan de muestreo secuencial fue desarrollado por Iwao (1975) y se conoce como el método de muestreo secuencial de Iwao (ISP, por su sigla en inglés). Este método se basa en el intervalo de confianza del UE y tiene la ventaja de que no es necesario ajustar los conteos de la plaga por unidad de muestreo a alguna distribución de probabilidades. En cambio, el requisito para implementar el ISP es que la varianza de las muestras pueda ser modelada en función del promedio. Para esto, existen dos modelos empíricos que pueden ser ajustados a datos de varianzas y promedios recolectados en campo. Uno de estos se conoce como la relación varianza-media de Iwao (IVM, por su sigla en inglés) y el otro como la ley de potencia de Taylor (TPL, por su sigla en inglés). Ambos modelos se han usado ampliamente para describir varianzas en función de promedios, aunque la TPL parece funcionar para un rango más amplio de especies y el significado ecológico de sus parámetros ha sido más estudiado que el de aquellos del IVM (Taylor, Woiod, & Perry, 1978; Taylor, Lindquist, & Shipp, 1998; Kendal, 2004). Además, la mayoría de las funciones establecidas para determinar líneas críticas, parámetros de distribuciones de probabilidades y procedimientos de validación de planes de muestreo (función de características operativas y curva del promedio del número de muestras) se encuentran desarrolladas en términos de los parámetros de la TPL (Binns, Nyrop, & Werf, 2000).

Un tercer método de muestreo expone una debilidad clave de los programas de MIP basados en el uso de insecticidas de acuerdo con umbrales y para plagas puntuales. El muestreo de intensidad variable (Hoy, Jennison, Shelton, & Andaloro, 1983; Binns & Nyrop, 1992) requiere de una estimación secuencial, pero la precisión y el esfuerzo de muestreo se van reajustando de acuerdo al UE. El método requiere de un muestreo más intensivo cuando el tamaño de la población de la

plaga está cerca al UE, porque este momento es cuando se necesita una mayor precisión para tomar una decisión de intervención. Cuando la población está muy por encima o muy por debajo del umbral, se necesita menos precisión y el esfuerzo de muestreo es menos intensivo y requiere de menos tiempo (figura 18.5). Otro aspecto práctico de este método es que el muestreo se lleva a cabo a lo largo de todo el universo de muestras (es decir, a lo largo de uno o más transectos que atraviesan el cultivo). Así, aunque la intensidad del muestreo se basa en la observación de una plaga puntual, el agricultor tiene la oportunidad de recorrer el cultivo e inspeccionar la presencia de otras plagas. Aunque las plagas más dañinas requieren de una mayor atención, todas las plagas que ocurren deberían ser muestreadas y vigiladas.

Desafortunadamente, los programas de MIP convencionales tienden a enfocarse en plagas y umbrales puntuales, ignorando la complejidad inherente del manejo integrado de los ensamblajes de plagas que atacan a los cultivos de manera simultánea. El enfrentar esta realidad más compleja requiere de un cambio en la concepción de los cultivos, del control químico para una especie plaga puntual que alcanza un UE puntual hacia un enfoque de ecología de poblaciones, comunidades y paisajes que incluya todas las plagas y organismos benéficos asociados al sistema. Este cambio de concepción del cultivo y su manejo se explora en las secciones “El MIP y la teoría de sistemas complejos” y “Ejemplos de implementación exitosa de programas MIP en Colombia” del presente capítulo.

Conservación del control natural

Aunque la implementación del MIP puede favorecer el control natural, la mayoría de intervenciones de control de las plagas no buscan deliberadamente su restablecimiento. En la práctica, pocas veces los programas de MIP establecen medidas activas para favorecer el control natural. Las técnicas aplicadas, en cambio, priorizan la rapidez en la supresión de poblaciones de una plaga (o grupo de plagas) a la vez, a una escala de tiempo y espacio limitada al lote de cultivo. El impacto de estas técnicas dificulta ulteriormente el aprovechamiento del control natural y puede incluso facilitar la emergencia de brotes de plagas secundarias (p. ej., Hill, Macfadyen, & Nash, 2017).

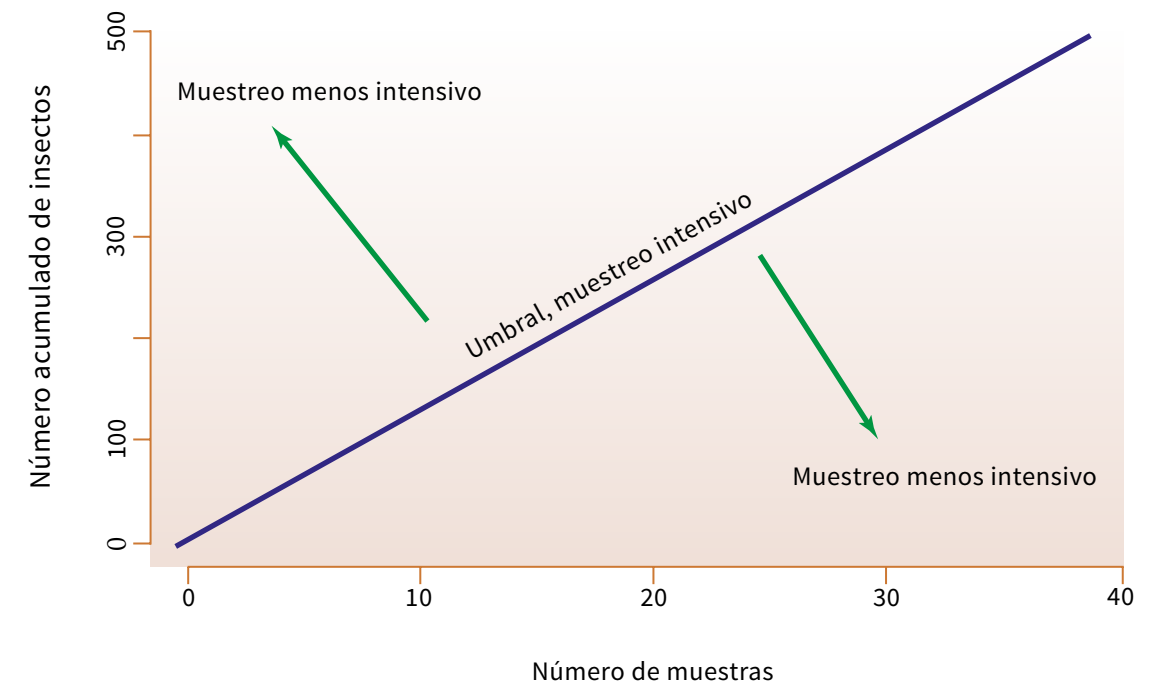


Figura 18.5. Ejemplo hipotético de un plan de muestreo de intensidad variable: el muestreo se realiza en etapas; por ejemplo, cuatro plantas seleccionadas al azar, en cada una de las etapas, que se ubican equidistantes a lo largo de un transecto que atraviesa el cultivo. Después de llevar a cabo el muestreo en cada etapa, se toma una decisión acerca de qué tan intenso debe ser el muestreo en la siguiente etapa. Al menos una planta debe ser muestreada en cada etapa a lo largo del transecto completo. El muestreo es menos intensivo si el número de insectos está muy por encima o muy por debajo del umbral económico.

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, los métodos de control implementados en programas de MIP se han limitado a la aplicación de técnicas o al uso de insumos de menor impacto directo sobre el ecosistema. Si bien estas técnicas son preferibles a las de mayor impacto, podrían ser insuficientes para favorecer la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. El uso indiscriminado de plaguicidas en la agricultura

comercial ha continuado (Epstein & Bassein, 2003), a pesar de años de trabajo en la integración de controles alternativos. La relevancia que debe tener el control natural en la propuesta de un MIP más estratégico se explora en las secciones “El MIP y la teoría de sistemas complejos” y “Ejemplos de implementación exitosa de programas MIP en Colombia” del presente capítulo.

El MIP y la teoría de sistemas complejos

Los cultivos agrícolas son esencialmente sistemas adaptables, complejos e integrados, en donde la naturaleza se mezcla inevitablemente con intereses socioeconómicos. El proceso consiste en sembrar semillas y realizar las labores necesarias para producir bienes a partir de las mismas. Los ciclos se repiten una y otra vez: se configura un ambiente adecuado, buscando que una o varias especies vegetales exploten de la manera más eficiente un recurso con el propósito de

acumular una producción. La producción es extraída del sistema (idealmente por el agricultor, aunque puede ser reducida por los insectos plagas o por las enfermedades) y el remanente del cultivo es removido para permitir la reorganización de un nuevo ciclo.

Los ciclos del sistema también pueden visualizarse a escalas espaciales y temporales más amplias (figura 18.6). En ciertas regiones de vocación agrícola, las

comunidades de agricultores acumulan capacidades, conocimiento e infraestructura para la producción de determinados bienes. Con el tiempo, la funcionalidad y la productividad del sistema se hacen progresivamente más eficientes y, al mismo tiempo, dependientes de unas pocas tecnologías o prácticas adoptadas por la mayor parte de la comunidad de agricultores. Eventualmente, el efecto de ciertos factores externos al sistema, tales como la incertidumbre en los precios del mercado, el clima o los brotes de plagas o patógenos, pueden causar el colapso o la destrucción del sistema tal como se encontraba configurado. El sistema luego se reorganiza

para restablecer su funcionalidad y productividad, usando el capital acumulado de materia, capacidades, conocimiento e infraestructura para así volver a iniciar un nuevo ciclo de acumulación de materia y capital.

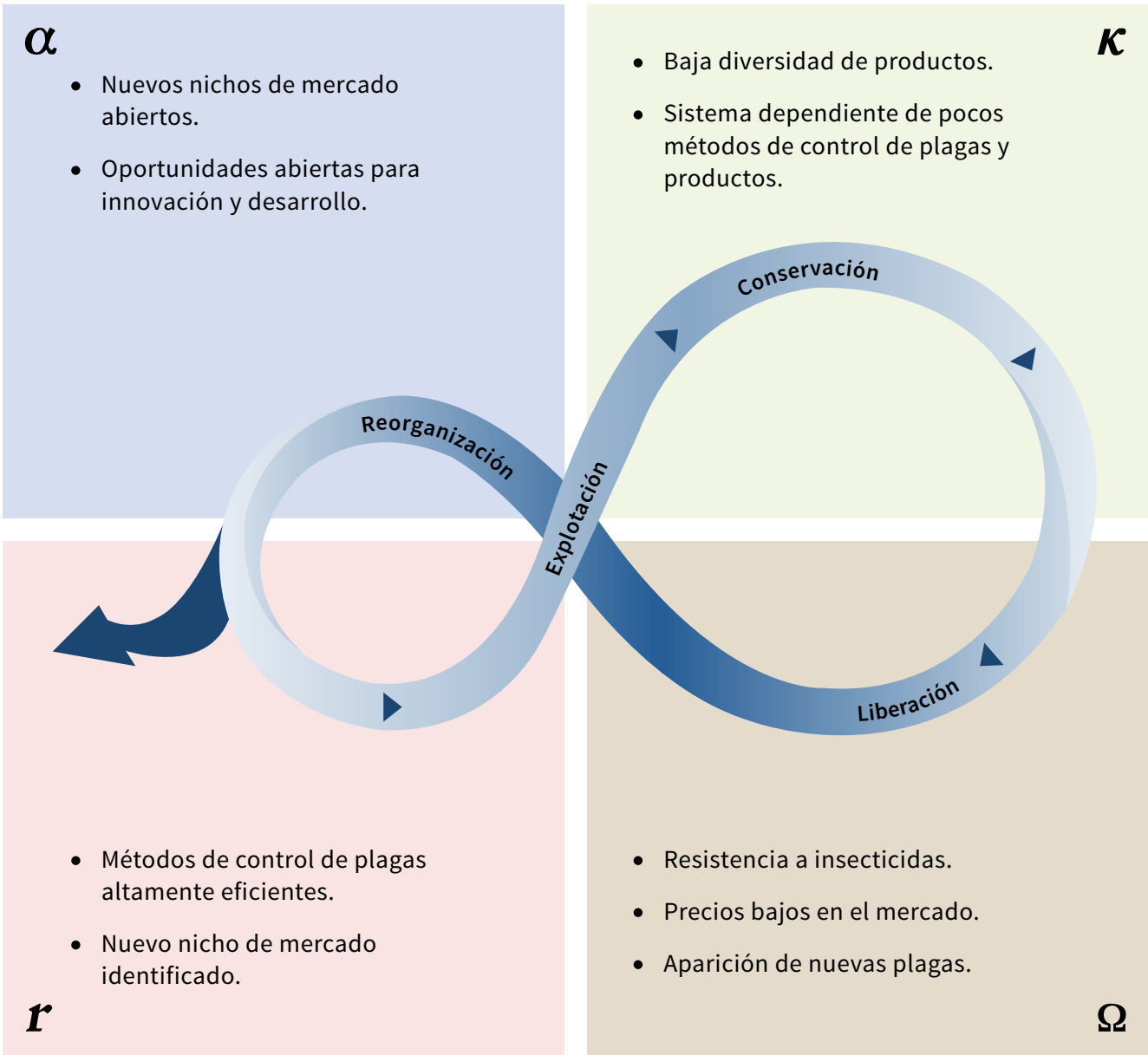
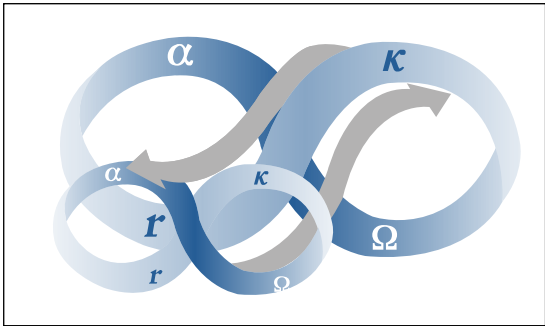


Figura 18.6. Ciclo adaptativo de sistemas complejos aplicado al control de plagas en sistemas agrícolas a escala regional: en la esquina superior derecha se muestra la interacción del ciclo con otros que operan a diferentes escalas.

Fuente: Modificado de Holling y Gunderson (2002)

El ciclo adaptativo y los sistemas agrícolas

Los ciclos de los sistemas agrícolas se ajustan al modelo de ciclo adaptativo propuesto por Holling (1985), el cual es usado como herramienta para comprender las dinámicas de sistemas complejos a diferentes escalas. El modelo de ciclo adaptativo ha sido usado para explicar *procesos ecológicos* como la sucesión en bosques (Holling & Gunderson, 2002) y la estacionalidad de comunidades (Sommer et al., 2012); *procesos sociales* como el apogeo y el declive de civilizaciones antiguas (Diamond, 2005) y los cambios en las sociedades occidentales contemporáneas (Gilpin, 2000), así como *procesos socioecológicos*, como la dinámica de la aparición de poblaciones resistentes a insecticidas químicos (Hoy, 2008) y varios sistemas agroecológicos (Walker, Holling, Carpenter, & Kinzig, 2004). La figura 18.6 muestra una representación gráfica del ciclo adaptativo y de la interacción entre sistemas que operan a diferentes escalas. En breve, la trayectoria del ciclo generalizado alterna entre largos periodos, lentos y sostenidos, de acumulación y transformación de recursos (de fase r a fase K) y periodos más cortos de innovación y reorganización (de fase Ω a fase α). Durante la lenta transición entre r y K, la conectividad y la estabilidad del sistema se incrementan y se acumula capital en forma de materia o conocimiento (fase de explotación). En los ecosistemas, por ejemplo, se acumulan biomasa y nutrientes, y las interacciones entre especies y recursos se vuelven progresivamente más fuertes y rígidas, evitando así que nuevos competidores puedan ingresar al sistema (Holling, 1973). En sistemas socioeconómicos, se acumula infraestructura, habilidades y conocimiento, mientras que la confianza mutua crece en las relaciones humanas, haciendo las redes de interacciones cada vez más predecibles y dependientes (Holling & Gunderson, 2002).

La acumulación de materia y el incremento en la rigidez de las interacciones hacen que el sistema pierda capacidad para conservar la funcionalidad y la estructura frente a disturbios ocasionados por el clima, los precios del mercado o los brotes de plagas o patógenos (fase de conservación). La pregunta ya no es si el sistema colapsará, sino si será capaz de recobrar su función y estructura después del colapso. La siguiente fase se conoce como *liberación* y se caracteriza por

la abrupta pérdida de funcionalidad del sistema tal como estaba configurado. De acuerdo con la teoría de sistemas complejos, esta capacidad de reorganización después del colapso dependerá del capital acumulado (es decir, materia, capacidades, conocimiento e infraestructura) durante ciclos anteriores (fase de reorganización) (Holling & Gunderson, 2002; Folke, Hahn, Olsson, & Norberg, 2005).

Los sistemas adaptables no están aislados. Estos generalmente hacen parte de una panarquía de sistemas que operan a diferentes escalas espaciotemporales (Holling & Gunderson, 2002). Los factores que incrementan el riesgo de colapso (transición de fase K a fase Ω) generalmente vienen de las escalas más pequeñas. Por ejemplo, la emergencia de nuevas plagas ocurre en cultivos a escala local, pero eventualmente tiene un impacto regional. Por el contrario, los ciclos que operan a escalas más grandes tienen la capacidad de proveer capital para contribuir con la reorganización de ciclos que operan a escalas más pequeñas, ya que estos pueden acumular una mayor cantidad de capital y sus colapsos ocurren en intervalos de tiempo más largos. Por ejemplo, ante la emergencia de una nueva plaga, es de esperarse que parte de las soluciones a escala local provengan de instituciones de investigación y desarrollo o de políticas agrícolas que hacen parte de ciclos adaptativos de escalas superiores (figura 18.6).

La capacidad del sistema para persistir, conservado sus interacciones más importantes y absorbiendo cambios importantes causados por disturbios, es lo que Holling (1973) define como *resiliencia*. Esta capacidad poco tiene que ver con la estabilidad o la capacidad del sistema para permanecer en equilibrio con una producción sostenida de recursos aprovechables. De hecho, la manipulación de un sistema para maximizar (y estabilizar) su productividad puede reducir su resiliencia, es decir que un evento catastrófico que antes pudo haber sido absorbido, ahora puede desencadenar la pérdida total de la integridad estructural del sistema (Walker et al., 2004). La pérdida de resiliencia generalmente se deriva de una simplificación y especialización del sistema para lograr una economía de escala. El enfoque convencional del manejo de sistemas agrícolas tiene como objetivo la conservación de la estabilidad muy cerca de un punto de máxima productividad. Esto se logra normalmente mediante la especialización de los sistemas en la producción de uno o pocos productos y

la búsqueda de una economía de escala. Sin embargo, para lograr una economía de escala generalmente es necesaria una producción uniforme, y a gran escala, de un solo producto a expensas de la diversidad biológica necesaria para la integración efectiva de diversos controles biológicos y físicos naturales e introducidos artificialmente. En una economía de escala, la diversidad de controles del sistema es remplazada por el uso de insecticidas y otros insumos químicos o biológicos. Estos insumos son fáciles de justificar económicamente, reducen la necesidad de mano de obra y simplifican, de alguna manera, el manejo del cultivo. No obstante, el uso constante de insumos también conduce a que el funcionamiento y la productividad de los sistemas agrícolas dependa de la adquisición y la aplicación de insumos externos.

El enfoque de escala es muy útil si se trata de conservar la utilidad de un sistema ideado por un ingeniero para desarrollar una tarea específica dentro de un rango de condiciones bien delimitado. En este caso, el enfoque de contrarrestar cualquier fluctuación por fuera de un punto de equilibrio puede ser el más eficiente. Sin embargo, los sistemas adaptables (p. ej., sistemas agrícolas) se encuentran profundamente afectados por cambios en variables externas que no son fácilmente controlables ni predecibles (Lewis et al., 1997; Holling & Gunderson, 2002). En este caso, la conservación de un determinado estado del sistema (estabilidad) pierde relevancia, mientras que la promoción de elementos que favorezcan la *capacidad adaptativa* del sistema y su *persistencia* en el tiempo (resiliencia) se convierten el objetivo primordial.

Con el propósito de llevar a la práctica la construcción de resiliencia en sistemas socioecológicos, se han identificado cuatro factores que la pueden favorecer (Berkes, 2007). A continuación, se describen estos factores a la luz de un MIP convencional en agricultura:

1. *Aprender a vivir con el cambio y la incertidumbre*: este factor implica dos requisitos: a) la construcción de una memoria colectiva y de una capacidad de aprender de eventos catastróficos pasados, y b) una actitud proactiva ante la incertidumbre mediante el fomento del desarrollo de soluciones ante nuevos problemas que puedan presentarse en el futuro. En el contexto del manejo de plagas agrícolas, un evento catastrófico podría ser la aparición de

una nueva plaga o la evolución de resistencia a insecticidas de una ya existente. Ante la aparición un evento de este tipo, el MIP convencional cuenta con un sistema apropiado para el cumplimiento del primer requisito. Los programas de desarrollo de nuevas moléculas o formulaciones de plaguicidas o bioplaguicidas de ciertas instituciones privadas y públicas cuentan con una aceptable capacidad de reacción ante la aparición de resistencia o la emergencia de nuevas plagas. Estos desarrollos, generalmente, se basan en experiencias de eventos pasados similares. Sin embargo, el sistema es inapropiado en cuanto a la actitud proactiva hacia la incertidumbre (requisito 2), ya que convive con el fuerte supuesto de que siempre habrá un nuevo insecticida efectivo cada vez que sea necesario. Más aún, se convive con el supuesto de que los costos de los insumos, de los que la producción a escala depende, no cambiarán significativamente en el tiempo. En este escenario, las capacidades de reacción se concentran en los ciclos que operan a escala institucional (Hoy, 2008), dejando los ciclos que operan a escalas más locales sin herramientas de conocimiento, experiencia o infraestructura para reaccionar ante un evento catastrófico.

2. *Promover la diversidad para la renovación y la reorganización*: la diversificación es una estrategia universal para reducir el riesgo de colapso e incrementar las opciones en épocas de crisis (Turner et al., 2003). Por ejemplo, empresas e instituciones públicas y privadas de todas las escalas y naturalezas incrementan la diversidad de sus negocios y objetivos como medio para reducir su vulnerabilidad, incluso a costa de la reducción en la calidad del producto (Rumelt, 1982; Michel & Shaked, 1984). El concepto de diversidad biológica (es decir, biodiversidad) es bastante amplio, ya que se refiere a la variedad de los organismos considerando en todos los niveles, es decir, desde la variedad genética de las poblaciones, pasando por la variedad de las diferentes categorías taxonómicas hasta la variedad de los ecosistemas (Begon, Townsend, & Harper, 2006; Chao & Just, 2012). Una localidad con alta biodiversidad no solo cuenta con un gran número de especies, sino que las poblaciones que allí habitan deben mantener el suficiente acervo genético para perdurar en un ambiente de cambios constantes. La heterogeneidad

espacial es el gran generador de la diversidad de adaptaciones que reducirá el riesgo de colapso e incrementará las opciones en épocas de crisis (p. ej., invasiones biológicas, brotes de plagas o catástrofes ambientales). Sin embargo, la implementación de sistemas agrícolas, con frecuencia, implica la homogeneización del ambiente. En particular, las economías agrícolas de escala requieren que los agricultores se especialicen en uno o en pocos productos, lo que generalmente implica una producción uniforme a escalas espaciales masivas para justificar la enorme inversión de capital en equipos y tecnología. Las economías de escala promueven la producción de bienes (por definición, productos estandarizados para los cuales el origen es irrelevante) al menor costo posible a escala global, pero la producción misma alcanza escalas que no son propicias para estrategias de control que integren múltiples tácticas, especialmente de control biológico o cultural. Los programas de MIP convencionales implican (en teoría) la conservación de una diversa gama de métodos de control que deben ser usados sinérgicamente (integrados), pero no implican necesariamente la promoción de la biodiversidad como una estrategia integrada. Además, con el tiempo, las estrategias preventivas (culturales) de control de plagas usualmente van perdiendo relevancia, y el MIP convencional tiende a simplificarse en un sistema para decidir cuándo aplicar insecticidas (Lewis et al., 1997). Pese a que la diversidad (biodiversidad y diversidad de métodos de control de plagas) es un capital que puede generar resiliencia en ciclos productivos en las escalas más pequeñas, la excesiva simplificación del sistema y la creciente dependencia en la aplicación de insecticidas deja a los ciclos que operan a estas escalas sin capacidades para reducir riesgos ni opciones para afrontar crisis.

3. *Combinar diferentes clases de conocimiento para favorecer el aprendizaje*: este factor implica la combinación del conocimiento tradicional con la ciencia. En teoría, el MIP tradicional promueve la *integración* del conocimiento acumulado por generaciones de agricultores con métodos de control más modernos. Sin embargo, esto no se traslada a la práctica. Con frecuencia, el desarrollo de sofisticadas moléculas de insecticidas conlleva

al desplazamiento del control biológico y de otras tecnologías tradicionales para el manejo de plagas (Thomas, 1999). Son varios los casos en los que la aparente eficiencia de una nueva molécula ha desplazado la combinación de estrategias en programas de MIP que tardaron décadas en implementarse. Por ejemplo, luego de 15 años de trabajo articulado y continuado en Europa para la implementación de programas de MIP, estos terminaron por ser desplazados por los piretroides, un grupo de insecticidas que fue introducido en el mercado durante los años ochenta (Van Lenteren, 2009). Algo similar ocurrió con el desplazamiento del uso de *Encarsia formosa* Gahan (Hymenoptera: Aphelinidae) para el control de la mosca blanca de los invernaderos *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) (Hemiptera: Aleyrodidae) con la aparición de una nueva generación de insecticidas después de la II Guerra Mundial (Van Lenteren & Woets, 1988). En la práctica, la mayor parte de los programas de MIP terminan por desplazar el conocimiento tradicional y se convierten esencialmente en sistemas de monitoreo para reducir el uso de plaguicidas químicos. De esta manera, el capital de conocimiento se concentra en las escalas institucionales, mientras que aquel desarrollado y acumulado en escalas más pequeñas se pierde debido a su incompatibilidad con los desarrollos institucionales.

4. *Crear oportunidad para la autoorganización*: este factor implica dos requisitos (Folke et al., 2005): a) fortalecimiento del manejo comunal de los sistemas, y b) construcción de capacidades de manejo y gestión entre diferentes escalas. El primer requisito se refiere a la capacidad del sistema de mantener lazos sociales y políticos para encarar eventos catastróficos. En un contexto de manejo de plagas, este requisito se refiere a la necesidad de la implementación de MIP regionales, y no en cultivos o fincas aisladas. Esto implica una conciencia entre los agricultores de que las plagas son un fenómeno regional, que debe ser abordado como tal. Pese a que los beneficios de implementar sistemas de toma de decisión regional en comparación con aquellos más locales (dentro de lotes de cultivo) han sido ampliamente documentados, los programas de MIP regionales exitosos son relativamente escasos

(Brewer & Goodell, 2012). El segundo requisito implica una capacidad de transferir soluciones entre ciclos adaptativos que operan a diferentes escalas. En ocasiones, los problemas no pueden ser solucionados apropiadamente únicamente a través de la asociación entre varios sistemas locales. En estos casos, es necesario el concurso de instituciones que hagan parte de ciclos a escalas superiores que provean salidas que no son fácilmente vislumbradas por los actores de escalas locales. Un buen ejemplo de esta situación es la problemática generada por la epidemia del virus del amarillamiento de las venas de la papa (PVV) en la cadena agroalimentaria de la papa en Colombia. El PVV es transmitido por la mosca blanca de los invernaderos y puede causar pérdidas de hasta el 50 % en cultivos de papa severamente afectados. La más reciente epidemia de PVV, ocurrida entre 2014 y 2016, fue precedida de un incremento bastante inusual en las poblaciones de *T. vaporariorum* en cultivos de papa. Por tal razón, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), la autoridad regulatoria del sector agrícola de Colombia, enfocó los esfuerzos al manejo de la mosca blanca de los invernaderos. Las medidas tuvieron pocos efectos inmediatos. Posteriormente, se evidenció que la transmisión por el vector no podía explicar la distribución de la epidemia a escala nacional. Tan sólo un 27 % de los casos reportados podían ser explicados por la presencia del vector. Es decir, los esfuerzos locales (individuales y colectivos) enfocados al control del vector probablemente estaban contribuyendo muy poco a la solución del problema (Cuadros et al., 2017). Un modo alternativo de transmisión de PVV es través de tubérculos infectados que sean usados para semilla. De acuerdo con Cuadros et al. (2017), la estrategia de intervención más efectiva está más relacionada con la calidad del proceso de certificación de semilla y de su apropiada distribución entre las diferentes zonas productoras del país que con el manejo local del vector.

Un nuevo enfoque

A la luz de los factores descritos, el concepto tradicional de MIP, cuyo objetivo principal es reducir la aplicación de insecticidas o sustituirlos por unos menos tóxicos,

puede estar fallando en proveer sostenibilidad a los sistemas agrícolas. Por una parte, la capacidad de respuesta ante la aparición de problemas relacionados con plagas (p. ej., resistencia, reemergencia o nuevas regulaciones) se concentra en los procesos que ocurren a escalas institucionales o superiores. La mayor parte del capital se acumula a escalas grandes y, en lugar de enriquecer el capital de los ciclos a escalas de cultivo, se reduce y se limita la capacidad de respuesta del sistema entero a las opciones y el capital de desarrollo e innovación de algunas instituciones. Además, la constante presión del mercado para reducir costos y aumentar producción a corto plazo desestimula la capacidad de respuesta regional de los núcleos de producción ante los problemas de plagas.

En consecuencia, es necesario un enfoque distinto del MIP. Uno cuyo objetivo primordial vaya más allá del manejo responsable de insecticidas químicos o de su sustitución por productos menos tóxicos. Si aceptamos que el objetivo debe ser el incremento en la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, el conocimiento y la capacidad de innovación deben ser valorados y distribuidos adecuadamente a través de todas las escalas que involucran la producción agrícola. La clave está en la reducción del enfoque *terapéutico*, para favorecer los métodos basados en la comprensión del ecosistema en su conjunto.

Las instituciones, más que convertirse en proveedores de insumos, deben propender por el desarrollo y la implementación de componentes de manejo que construyan resiliencia en los sistemas agrícolas a escala local. Por un lado, es importante promover los cultivos asociados, de rotación, arreglos multiespecie y multiestrato, y el control biológico y cultural, pues todos estos son vías prácticas para favorecer la diversidad biológica y productiva. Por otro lado, es determinante involucrar a los agricultores en la construcción del conocimiento mediante procesos participativos, con el fin de favorecer la construcción de capacidades de adaptación al cambio. Además, las instituciones públicas y privadas involucradas con la agricultura deben enfocarse en el bien común, en lugar de la sola venta de productos. Estas instituciones también deben propender por la búsqueda de alternativas a la producción orientada a la economía de escala, a través del fomento de economías que satisfagan las necesidades de la población y que favorezcan la diversidad biológica y de mercados.

Ejemplos de implementación exitosa de programas MIP en Colombia

El MIP en cultivos de papa en Colombia

Para el manejo de las principales plagas de la papa en la zona central de Colombia (altiplano cundiboyacense), el Centro Internacional de la Papa (CIP) introdujo en Colombia la estrategia de manejo integrado del gorgojo de los Andes o gusano blanco (como es conocido en Colombia) *Premnotrypes vorax* (Hustache) (Coleoptera: Curculionidae) en la década de los noventa. La estrategia consistía en la divulgación y la validación de un grupo de prácticas gestadas principalmente en el Perú. Estas prácticas incluían: 1) seguimiento y evaluación con zanjas perimetrales, 2) trampas o barreras, y 3) recolección masiva nocturna de adultos. Estrategias similares de múltiples prácticas de control fueron planteadas para otras plagas de la papa en esa región. La apropiación del conocimiento disponible ha conllevado a la formulación de programas de manejo integrado que aún están en proceso de validación completa.

Con base en el reconocimiento de aspectos biológicos y de comportamiento de la polilla guatemalteca de la papa *Tecia solanivora* (Povolný) (Lepidoptera: Gelechiidae) (la otra plaga clave en la mayoría de áreas de esta región), se evaluaron y validaron tecnologías de manejo integrado que incluyen: el aporque con apisonamiento en la corona de la planta (como barrera para disminuir la entrada de larvas pequeñas en la zona de tubérculos), el uso adecuado del riego, la recolección y la disposición adecuada de los residuos de cosecha (López-Ávila & Barreto, 2004).

Se determinó que la época crítica para el ataque de la plaga es a partir de la tuberización y hasta cosecha. Las hembras ovipositan cerca de la base del tallo de las plantas y la mayor cantidad de posturas se presenta al final de la madurez fisiológica (Barreto, 2004). Se evidenció la presencia de enemigos naturales del gusano blanco y de la polilla guatemalteca en Colombia que pueden ser favorecidos con la implementación de programas de MIP en el cultivo (López-Ávila &

Espitia-Malagón, 2000). Diferentes cepas de virus y otros microorganismos han sido evaluadas, con un potencial aún por consolidar en cuanto a medidas de manejo prácticas y disponibles para los productores.

Recientemente, se evaluó la integralidad de los componentes y se incorporaron criterios económicos y de impacto ambiental como indicadores de los beneficios de la implementación del MIP en el cultivo de la papa. Los costos de producción se pueden incrementar en parcelas donde se implemente el manejo integrado (especialmente por labores como el seguimiento de plagas), pero la producción y la rentabilidad se ven favorecidas, además de tener menor impacto ambiental por el menor uso de plaguicidas empleados. La tasa de impacto ambiental en los lotes de manejo convencional es tres veces mayor que las de los lotes con MIP evaluados (Espitia, 2014).

Actualmente, el impacto el gusano blanco parece haber disminuido en Colombia, aunque en muchos casos se asocia a la dependencia del control químico. En cambio, la polilla guatemalteca de la papa presenta hoy un comportamiento alternante que se agrava de manera importante en las épocas de sequía (Matheus Gomez, 2005). El alcance de la implementación del MIP logrado hasta ahora está aún por determinar. Dos factores han dificultado esta implementación: la dificultad para disponer de algunos insumos y herramientas de MIP desarrollados y la inestabilidad del valor del producto cosechado, que desestimula la participación de actores de la cadena productiva.

En este proceso dispar de implementación del MIP en papa, la sensibilización de los agricultores incluye estrategias de transferencia del conocimiento de las plagas, especialmente su comportamiento, para entender la aplicabilidad de los componentes del MIP. Los talleres de MIP para agricultores permitieron establecer, con metodologías participativas, la sensibilización de los productores acerca de la importancia de conocer las plagas y la implementación de técnicas de manejo integrado través de este conocimiento (Trillos González, Fierro Guzmán, & Corzo Carrillo, 1997). La implementación del MIP en papa claramente muestra

el beneficio de la disminución en la aplicación de insecticidas, especialmente cuando hay bajos niveles de población de las plagas (Espitia, 2014).

Los factores que puedan contribuir a la implementación de un MIP con enfoque estratégico en la producción de papa en Colombia están aún por evaluarse. Las zonas productoras de papa en Colombia se ubican cerca al centro de origen de la especie y de muchas de sus variedades, y tienen condiciones agrícolas y climáticas afines al cultivo (Castaneda Alvarez et al., 2015). Sin embargo, los factores asociados a la biodiversidad en estos agroecosistemas no se han aprovechado aún en la producción comercial del tubérculo. Los arreglos multiespecie, con cultivos también originarios de estas zonas o con variedades diferentes (pero con atributos complementarios), podrían aportar en la consolidación de un manejo de plagas y enfermedades eficiente y sostenible (Straub & Snyder, 2008; Civitello et al., 2015). Estos arreglos permitirían al sistema, en su conjunto, tener mayor resiliencia frente a factores dominantes externos al sistema, como el clima, el mercado y la desvalorización de la moneda y de los productos cosechados.

Al cultivar en arreglos con diferentes especies de tubérculos andinos se pueden conformar sinergias ecológicas para reducir los ataques de insectos plagas y de enfermedades (Lewis et al., 1997; Clavijo, Barón, & Combariza, 2014), mejorar la dieta de los productores del campo (Burgos, Amoros, Morote, Stangoulis, & Bonierbale, 2007) y conservar un flujo de caja constante, sin depender de uno o de pocos productos. En últimas, esta diversidad, además de sus beneficios agronómicos, favorece la seguridad alimentaria y posibilita el acceso a alimentos más balanceados.

En las décadas iniciales del siglo XXI se vive una etapa crucial para el rescate del conocimiento y el aprovechamiento de especies cultivables autóctonas debido a que la última generación que conoció y aprovechó estos recursos genéticos en su diversidad está pasando (Clavijo et al., 2014). La provisión y el intercambio de alimentos con suficiencia y calidad a nivel local evitará el coste y el gasto ambiental de recurrir a esas fuentes alimentarias desde otras regiones, disminuyendo además la huella de carbón (Hilbert et al., 2016). La recuperación de fincas y veredas con la inclusión de sistemas diversos en las

zonas altas de los Andes colombianos (donde se cultiva la papa) daría lugar a la posibilidad de un nuevo arraigo de las comunidades con su territorio.

El MIP en cultivos de habichuela y fríjol en Colombia

A principios de la década de los noventa, se propuso un esquema de manejo integrado de la mosca blanca de los invernaderos en cultivos de fríjol y habichuela. La estrategia de MIP, inicialmente para la región del Sumapaz, parte de la base de un conocimiento de la plaga, de su adaptación en las zonas de impacto, de las alternativas de control y su eficacia (Cardona, Prada, Rodríguez, Ashby, & Quirós, 1991). Incorpora las escalas de evaluación como herramienta que permite detectar claramente la presencia de la plaga, pero induce la tolerancia por debajo de los niveles críticos. La combinación criteriosa de las técnicas de control basadas en el UDE que se confirma con técnicas de seguimiento y valoración de los niveles de población alcanzados muestran un consistente método de control (Cardona et al., 1991).

Algunas empresas de plaguicidas de síntesis química se vienen vinculando a la promoción del MIP. Nuevos productos químicos (según la dinámica de desarrollo por parte de los fabricantes) entran permanentemente al mercado. En esta particular estrategia, las nuevas sustancias son el eje de la recomendación, con el lógico interés promocional y comercial, frecuentemente, sin establecer criterios de UDE. Sin embargo, el enfoque de integralidad que ya adoptan estas empresas es, al menos, una oportunidad para incorporar otras prácticas y el concepto de los niveles de tolerancia por debajo del UDE.

El trabajo conjunto entre el sector privado y el público ha permitido avances importantes en zonas productoras de habichuela y fríjol: la recolección de envases y los programas de capacitación en el uso seguro y eficaz de plaguicidas acompañan fuertemente la implementación del MIP. La creciente aceptación de modelos productivos que sigan las buenas prácticas agrícolas (BPA) también es una oportunidad para la implementación del MIP en su extensión. Los modelos

agronómicos de implementación donde se aplican integralmente las estrategias de MIP con otras del cultivo son cada vez más comunes y consistentes.

El manejo de la broca del café

Originalmente, el café fue concebido como un cultivo inmerso en agroecosistemas ricos en biodiversidad, por lo que inicialmente no se reportaban problemas significativos asociados a plagas. Además, el origen africano del material genético no mostraba susceptibilidad a la entomofauna colombiana. Sin embargo, el ensamblaje de herbívoros se fue adaptando a la concentración de recursos ofrecida por los cultivos de café y, con el tiempo, se fueron registrando varios insectos plaga. Sin embargo, los primeros reportes se mantuvieron generalmente por debajo del UDE.

Desde su aparición en Colombia en 1988, la broca del café *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae) se convirtió en la especie plaga más importante de este cultivo con una rápida dispersión en el país. La estrategia institucional, desarrollada fundamentalmente por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC), se orientó a la búsqueda de métodos de control sostenible y de bajo impacto, con un especial interés en el control cultural y el control biológico. A continuación se describen los pilares del programa de MIP que se diseñó con el objetivo de manejar la broca del café en Colombia (Bustillo, 2008a).

Ya que el café es el principal cultivo de exportación de Colombia, el criterio de mantener la producción de manera competitiva se incorporó a los elementos de MIP. La estrategia generada por la FNC involucra: medidas agronómicas de control preventivo que reducen las poblaciones o previenen el crecimiento de las mismas, y medidas de control cultural, biológico y químico. El control biológico incluye enemigos naturales, primordialmente parasitoides, de la zona de origen de la plaga (África ecuatorial) y enemigos naturales que surgieron en las regiones colombianas de cultivo, principalmente el hongo *Beauveria bassiana*. Los elementos que componen el manejo integrado de la broca (MIB) incluyen: muestreo y UDE, uso de trampas para el monitoreo de poblaciones de la broca, control

cultural, el uso de controladores biológicos (por su efecto tanto en los frutos en el árbol como en el suelo), así como el uso de insecticidas (Bustillo, 2008b).

El control cultural es un pilar fundamental en esta estrategia. Aunque es una práctica de difícil implementación, la contribución del control cultural en el MIB es muy clara por su decisivo aporte a la reducción de poblaciones que atacan nuevos frutos. Este control incluye: la recolección de frutos maduros y sobremaduros en rama y suelo, la eliminación total de frutos antes del proceso de renovación, el uso de árboles trampa (que son árboles en los que se dejan todos los frutos en el contorno de lotes soqueados para allí recoger los frutos infestados) y el manejo de frutos atacados en el suelo durante en la cosecha y la poscosecha (Bustillo, 2008b).

La implementación del MIB en los lotes se inicia con la recolección pormenorizada de todos los frutos secos, que se tratan con agua caliente o, si son cantidades grandes, en un silo a 50 °C por 30 minutos. Luego se establece, con base en el seguimiento del cultivo y según las condiciones ambientales, un programa de cosechas oportunas de frutos maduros y sobremaduros con el cual se evita que estos caigan o permanezcan secos en los árboles. La colecta eficiente de frutos caídos, o evitar que estos caigan al suelo, es una medida crucial en este punto. El pase y repase para recoger frutos en rama y la recolección de frutos del suelo se denominó y promocionó con el apelativo de “Re-Re” (Bustillo, 2008b).

Se deben realizar las evaluaciones en los lotes para determinar el estado de infestación. La técnica de evaluación recomendada es la de la rama, en la cual se deben tomar 30 sitios/ha ubicados de manera representativa en todo el lote. En cada sitio se toma una rama en un árbol determinado, que tenga una zona de producción con 30 a 100 frutos. Se cuenta la cantidad de frutos brocados. El umbral para el control químico se estableció en el 2%. El muestreo en los 30 sitios/ha permite además detectar focos donde se deben concentrar las acciones de control y seguimiento. Si se ha aplicado un control químico, se debe hacer evaluación para determinar el porcentaje de supresión alcanzado (Bustillo, 2008a).

El uso de los entomopatógenos se recomienda para niveles de infestación cercanos al del UE. Se recomienda

tratar tanto los árboles como el suelo en el contorno. La liberación de avispa parasitoides es principalmente recomendada al final de la cosecha para controlar las brocas en los frutos que permanecen en los lotes. Las medidas de control incluyen también el manejo poscosecha que se basa en evitar que los adultos de la broca regresen a los lotes, aislando su posible salida en todas las fases del proceso de beneficio del grano (Bustillo, 2008a).

Durante el periodo de soqueo, la instalación de árboles trampa ha permitido concentrar y controlar los adultos remanentes en el lote. Se permite la llegada de los adultos a los frutos de estos árboles, y luego estos se tratan adecuadamente. Los frutos del café soqueado que se encuentran en el suelo se asperjan tanto como sea necesario con el hongo *Beauveria bassiana* (Bustillo, 2008a).

El MIB incluye prácticas que se relacionan con otros componentes del cultivo: el uso de variedades resistentes a la roya para disminuir las aplicaciones

de fungicidas, la disposición alineada de árboles en el lote para facilitar el manejo agronómico y cultural, la renovación periódica y oportuna de los lotes, el manejo selectivo de arvenses (que favorece la fauna benéfica) y el beneficio ecológico del café, que reduce el escape de la broca hacia los lotes. La implementación del MIB se ha traducido en una disminución significativa del daño y las pérdidas ocasionadas por la plaga. La adopción de esta estrategia ha sido relativamente alta en Colombia (> 60 % de apropiación entre los productores), al punto en que se considera un caso especialmente exitoso de implementación de MIB en el país (Bustillo, 2008b).

Una recuperación balanceada de los arreglos multiespecie asociados al cultivo de café permitiría aprovechar el servicio ambiental de esos arreglos en la disminución de la incidencia de plagas. Para implementarlos, las zonas cafeteras colombianas cuentan con el clima, los suelos y recursos genéticos abundantes.



Conclusiones

En Colombia, los sistemas agrícolas se desarrollan en un entorno ambiental y socioeconómico cambiante y difícil de predecir. Esta incertidumbre del entorno expone a todos los sistemas agrícolas a factores de colapso, tales como la invasión de plagas, el incremento en precios de insumos clave o la disminución del valor de los productos en el mercado. La invasión de plagas en cultivos de papa y café y la inestabilidad de precios del café, el frijol y la papa en el mercado son ejemplos claros de factores que constantemente incrementan la vulnerabilidad de estos sistemas en el país. La naturaleza impredecible de los factores de colapso provenientes del entorno exige una capacidad de respuesta por parte de todos los actores del sistema que involucre una amplia diversidad de estrategias. En el caso del ataque de plagas, por ejemplo, la capacidad de respuesta no solo debe incluir medidas de prevención y control a diferentes escalas espaciales y temporales, sino una distribución homogénea de oportunidades para la innovación constante de estrategias entre los diferentes actores del sistema. Las capacidades de innovación son especialmente necesarias para sistemas de cultivo que, por alguna razón, compiten con sistemas convencionales de altísima rentabilidad en un mercado global. En estos casos, la implementación de estrategias de manejo sostenibles requiere de la creación e identificación coordinada de vías de producción y mercado que valoren el enorme beneficio ambiental que supone la producción de bienes en agroecosistemas amigables para todos.

El paradigma del MIB, entendido como la definición de umbrales para reducir la aplicación de insecticidas químicos o su sustitución por sustancias menos tóxicas, es insuficiente para la construcción de sistemas agrícolas sostenibles. Los ejemplos de programas de MIB exitosos en Colombia evidencian tres características comunes que incrementan la probabilidad de adopción y éxito: 1) investigación científica enfocada en la comprensión del agroecosistema, 2) la incorporación del criterio de niveles de tolerancia de poblaciones bajas de plagas por debajo del umbral de acción, y 3) un enfoque de trabajo participativo con los productores. Por su parte, la incorporación de métodos de control biológico en programas de MIB debe evitar el enfoque *terapéutico* tradicional, para orientarse más hacia el fortalecimiento del capital de los sistemas agrícolas a escala local y regional. Esta meta aún requiere de mucho trabajo para ser alcanzada, e implicará cambios tecnológicos, políticos y estructurales. La formulación de políticas eficientes, que promuevan la conservación y el uso apropiado de la biodiversidad, y la distribución justa del conocimiento y de las capacidades de innovación son excelentes puntos de partida.

Agradecimientos

Los autores estamos agradecidos con Carolina Camargo (Universidad de Antioquia - Sociedad Max Planck), H. Fernando Rivera y Diego F. Sánchez (AGROSAVIA) por las ilustradas discusiones que llevaron al discernimiento de las ideas presentadas en este capítulo. El apoyo salarial y para la investigación de Casey W. Hoy se proporciona con fondos estatales y federales de los EE. UU. asignados al Ohio Agricultural Research and Development Center (OARDC) de Ohio State University. Los autores asumimos total responsabilidad por la interpretación de los resultados y las ideas presentadas.

Referencias

- Barreto, N. (2004). Nuevos aportes al conocimiento y manejo integrado de la polilla guatemalteca de la papa *Tecia solanivora* (Povolny) en Colombia. En Sociedad Colombiana de Entomología (Socolen), *Memorias XXXI Congreso de la Sociedad Colombiana de Entomología* (pp. 93-100). Bogotá, Colombia: Socolen.
- Begon, M., Townsend, C. R., & Harper, J. L. (2006). *Ecology: from individuals to ecosystems*. Malden, EE. UU.: Blackwell Publishers.
- Berkes, F. (2007). Understanding uncertainty and reducing vulnerability: lessons from resilience thinking. *Natural Hazards*, 41(2), 283-295. doi:10.1007/s11069-006-9036-7.
- Binns, M. R., & Nyrop, J. P. (1992). Sampling insect populations for the purpose of IPM decision-making. *Annual Review of Entomology*, 37, 427-453. doi:10.1146/annurev.en.37.010192.002235.
- Binns, M. R., Nyrop, J. P., & Werf, W. (2000). *Sampling and monitoring in crop protection: the theoretical basis for developing practical decision guides*. Wallingford, Reino Unido: CABI Publishing.
- Bolker, B. M. (2008). *Ecological models and data in R*. Princeton, EE. UU.: Princeton University Press.
- Brewer, M. J., & Goodell, P. B. (2012). Approaches and incentives to implement integrated pest management that addresses regional and environmental issues. *Annual Review of Entomology*, 57, 41-59. doi:10.1146/annurev-ento-120709-144748.
- Burgos, G., Amoros, W., Morote, M., Stangoulis, J., & Bonierbale, M. (2007). Iron and zinc concentration of native Andean potato cultivars from a human nutrition perspective. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(4), 668-675. doi:10.1002/jsfa.2765.
- Bustillo, A. E. (2008a). Aspectos sobre la broca del café *Hypothenemus hampei* en Colombia. En A. E. Bustillo (Ed.), *Los insectos y su manejo en la caficultura colombiana* (pp. 388-418). Chinchiná, Colombia: Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé).
- Bustillo, A. E. (2008b). El manejo de cafetales y el control de la broca del café. En A. E. Bustillo (Ed.), *Los insectos y su manejo en la caficultura colombiana* (pp. 419-426). Chinchiná, Colombia: Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé).
- Cardona, C., Prada, P., Rodríguez, A., Ashby, J., & Quirós, C. (1991). *Bases para establecer un programa de manejo integrado de plagas de habichuela en la provincia de Sumapaz (Colombia)*. [Documento de Trabajo N° 86]. Recuperado http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/Digital/SB608.B3_B38C.2_Bases_para_establecer_un_programa_de_manejo_integrado_de_plagas_de_habichuela.pdf.
- Castaneda Alvarez, N., Haan, S., Juarez, H. , Khoury, C. K., Achicanoy, H., Sosa Arango, C., ... Spooner, D. M. (2015). *Ex situ* conservation priorities for the wild relatives of potato (*Solanum* L. section *Petota*). *Plos One*, 10(4), e0122599. doi:10.1371/journal.pone.0122599.
- Civitello, D. J., Cohen, J., Fatima, H., Halstead, N. T., Liriano, J., McMahon, T. A., ... Rohr, J. R. (2015). Biodiversity inhibits parasites: Broad evidence for the dilution effect. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(28), 8667-8671. doi:10.1073/pnas.1506279112.
- Clavijo, N., Barón, M., & Combariza, J. (2014). *Tubérculos andinos: conservación y uso desde una perspectiva agroecológica*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Coble, H. D., & Ortman, E. E. (2008). The USA National IPM Road Map. En E. B. Radcliffe, R. E. Cancelado, & W. D. Hutchison (Eds.), *Integrated Pest Management: Concepts, Tactics, Strategies and Case Studies* (pp. 471-478). Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Courtier-Orgogozo, V., Morizot, B., & Boëte, C. (2017). Agricultural pest control with CRISPR-based gene drive: time for public debate. Should we use gene drive for pest control? *EMBO Reports* 18(6), 878-880. doi:10.15252/embr.201744205.
- Cuadros, D. F., Hernández, A., Torres, M. F., Torres, D. M., Branscum, A. J., & Rincon, D. F. (2017). Vector Transmission Alone Fails to Explain the Potato Yellow Vein Virus Epidemic among Potato Crops in Colombia. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1654. doi:10.3389/fpls.2017.01654.
- Chao, A., & Just, L. (2012). Diversity measures. En A. Hastings, & L. Gross (Eds.), *Encyclopedia of Theoretical Ecology* (pp. 203-207). Berkeley, EE. UU.: University of California Press.
- Christou, P., Capell, T., Kohli, A., Gatehouse, J. A., & Gatehouse A. M. R. (2006). Recent developments and future prospects in insect pest control in transgenic crops. *Trends in Plant Science*, 11(6), 302-308. doi:10.1016/j.tplants.2006.04.001.
- Diamond, J. M. (2005). *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*. Nueva York, EE. UU.: Viking.
- Epstein, L., & Bassein, S. (2003). Patterns of pesticide use in california and the implications for strategies for reduction of pesticides. *Annual Review of Phytopathology*, 41, 351-375. doi:10.1146/annurev.phyto.41.052002.095612.
- Espitia, E. (2014). *Estrategias evaluadas de manejo integrado de las limitantes tecnológicas del cultivo de la papa con miras a obtener un producto limpio (año uno)*. [Informe técnico final de producto]. Mosquera, Colombia: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), Centro de Investigación Tibaitatá.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2016). *Pesticides Use database*. Recuperado de <http://www.fao.org/faostat/en/#data/RP>.
- Folke, C., Hahn, T., Olsson, P. & Norberg, J. (2005). Adaptive governance of social-ecological systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 30, 441-473. doi:10.1146/annurev.energy.30.050504.144511.
- Gilpin, R. (2000). *The Challenge of Global Capitalism: The World Economy in the 21st Century*. Princeton, EE. UU.: Princeton University Press.
- Gordon, K. H. J., & Waterhouse, P. M. (2007). RNAi for insect-proof plants. *Nature Biotechnology*, 25(11), 1231-1232. doi:10.1038/nbt1107-1231.
- Gray, M. E., Ratcliffe, S. T., & Rice, M. E. (2008). The IPM paradigm: concepts, strategies and tactics. En E. B. Radcliffe, R. E. Cancelado, & W. D. Hutchison (Eds.), *Integrated Pest Management: Concepts, Tactics, Strategies and Case Studies* (pp. 1-13). Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Hilbert, N., Evans-Cowley, J., Reece, J., Rogers, C., Ake, W., & Hoy, C. (2016). Mapping the Cost of a Balanced Diet, as a Function of Travel Time and Food Price. *Journal of Agriculture, Food Systems, and Community Development*, 5(1), 105-127. doi:10.5304/jafscd.2014.051.010.
- Hill, M. P., Macfadyen, S., & Nash, M. A. (2017). Broad spectrum pesticide application alters natural enemy communities and may facilitate secondary pest outbreaks. *PeerJ*, 5, e4179. doi:10.7717/peerj.4179.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1-23. doi:10.1146/annurev.es.04.110173.000245.
- Holling, C. S. (1985). Resilience of ecosystems: local surprise and global change. En W. C. Clark, & R. Munn (Eds.), *Sustainable development of the biosphere* (pp. 292-317). Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Holling, C. S., & Gunderson, L. H. (2002). *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Washington , EE. UU.: Island Press.
- Hoy, C. W. (2008). Pesticide resistance management. En E. B. Radcliffe, R. E. Cancelado, & W. D. Hutchison (Eds.), *Integrated Pest Management: Concepts, Tactics, Strategies and Case Studies* (pp. 192-204). Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Hoy, C. W., Jennison, C., Shelton, A. M., & Andalaro, J. T. (1983). Variable-intensity sampling - a new technique for decision-making in cabbage pest-management. *Journal of Economic Entomology*, 76(1), 139-143.
- Hoy, C. W., McCulloch, C. E. , Sawyer, A. J., Shelton, A. M., & Shoemaker, C. A. (1990). Effect of Intraplant Insect Movement on Economic Thresholds. *Environmental Entomology*, 19(5), 1578-1596. doi:10.1093/ee/19.5.1578.
- Iwao, S. (1975). A new method of sequential sampling to classify populations relative to a critical density. *Researches on Population Ecology*, 16(2), 281-288. doi:10.1007/BF02511067.
- Kendal, W. S. (2004). Taylor's ecological power law as a consequence of scale invariant exponential dispersion models. *Ecological Complexity*, 1(3), 193-209.
- Levins, R. (2007). From simple IPM to the management of agroecosystems. En M. Kogan, & P. Jepson (Eds.), *Perspectives in Ecological Theory and Integrated Pest Management* (pp. 45-64). Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.

Lewis, W. J., Van Lenteren, J. C., Phatak, S. C., & Tumlinson, J. H. (1997). A total system approach to sustainable pest management. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(23), 12243-12248.

López-Ávila, A., & Espitia-Malagón, E. (2000). *Plagas y benéficos en el cultivo de la papa en Colombia*. [Boletín técnico divulgativo]. Bogotá, Colombia: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).

López-Ávila, A., & Barreto, N. (2004). *Generación de componentes tecnológicos para el manejo integrado de la polilla gutatmalteca de la papa Tecia solanivora (Povolny) con base en el conocimiento de la biología, comportamiento y dinámica de población de la plaga* [Informe Técnico]. Bogotá, Colombia: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).

Madden, L. V., Hughes, G., & Bosch, F. v. d. (2007). *The study of plant disease epidemics*. Saint Paul, EE. UU.: American Phytopathological Society.

Matheus Gomez, H. (2005). Sistema de vigilancia fitosanitaria para la polilla guatemalteca de la papa en Colombia. En A. Lopez-Ávila (Ed.), *Memorias: III Taller Internacional sobre la polilla guatemalteca de la papa, Tecia solanivora* (pp. 17-23). Lima, Perú: Centro Internacional de la Papa (CIP).

Metcalf, R. (1994). Insecticides in pest management. En R. L. Metcalf, & W. H. Luckmann (Eds.), *Introduction to Insect Pest Management* (pp. 245-312). Nueva York, EE. UU.: John Wiley & Sons.

Michel, A., & Shaked, I. (1984). Does business diversification affect performance? *Financial Management*, 13(4), 18-25.

Morse, S. (2008). IPM: ideals and realities in developing countries. En E. B. Radcliffe, R. E. Cancelado, & W. D. Hutchison (Eds.), *Integrated Pest Management: Concepts, Tactics, Strategies and Case Studies* (pp. 458-470). Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.

Naranjo, S. E., & Ellsworth, P. C. (2009). Fifty years of the integrated control concept: moving the model and implementation forward in Arizona. *Pest Management Science*, 65(12), 1267-1286. doi:10.1002/ps.1861.

Oerke, E. C. (2006). Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science*, 144(1), 31-43. doi:10.1017/S0021859605005708.

Pedigo, L. P., & Rice, M. E. (2014). *Entomology and Pest Management* [6.a ed.]. Long Grove, EE. UU.: Waveland Press.

Pedigo, L. P., Hutchins, S. H., & Higley, L. G. (1986). Economic injury levels in theory and practice. *Annual Review of Entomology*, 31, 341-368. doi:10.1146/annurev.en.31.010186.002013.

Rumelt, R. P. (1982). Diversification strategy and profitability. *Strategic Management Journal*, 3(4), 359-369. doi:10.1002/smj.4250030407.

Sommer, U., Adrian, R., Domis, L. D. S., Elser, J. J., Gaedke, U., Ibelings, B., ... Winder, M. (2012). Beyond the

plankton ecology group (PEG) model: mechanisms driving plankton succession. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 43, 429-448. doi:10.1146/annurev-ecolsys-110411-160251.

Stern, V. M., Smith, R. F., Van den Bosch, R. & Hagen, K. S. (1959). The integration of chemical and biological control of the spotted alfalfa aphid: The integrated control concept. *Hilgardia*, 29(2), 81-101. doi:10.3733/hilg.v29n02p081.

Straub, C. S., & Snyder, W. E. (2008). Increasing enemy biodiversity strengthens herbivore suppression on two plant species. *Ecology*, 89(6), 1605-1615. Recuperado de <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1890/07-0657.1>.

Taylor, L. R., Woiwod, I. P., & Perry, J. N. (1978). Density-dependence of spatial behavior and rarity of randomness. *Journal of Animal Ecology*, 47(2), 383-406. doi:10.2307/3790.

Taylor, R. A. J., Lindquist, R. K., & Shipp, J. L. (1998). Variation and consistency in spatial distribution as measured by Taylor's power law. *Environmental Entomology*, 27(2), 191-201. doi:10.1093/ee/27.2.191.

Thomas, M. B. (1999). Ecological approaches and the development of "truly integrated" pest management. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(11), 5944-5951. doi:10.1073/pnas.96.11.5944.

Trillos González, O., Fierro Guzmán, L. H., & Corzo Carrillo, P. J. (1997). *Metodología para un curso-taller de manejo integrado de plagas en la papa* [Boletín técnico Corpoica N.º 1]. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/22297657/Metodologia-para-un-curso-taller-de-manejo-integrado-de-plagas-en-la-papa>.

Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., ... Schiller, A. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), 8074-8079. doi:10.1073/pnas.1231335100.

Van Lenteren, J. C. (2009). IPM in greenhouse vegetables and ornamentals. En E. B. Radcliffe, W. D. Hutchison, & R. E. Cancelado (Eds.), *Integrated Pest Management: Concepts, Tactics, Strategies and Case Studies* (pp. 354-365). Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.

Van Lenteren, J. C., & Woets, J. (1988). Biological and integrated pest control in greenhouses. *Annual Review of Entomology*, 33, 239-269. doi:10.1146/annurev.en.33.010188.001323.

Wald, A. (1945). Sequential Tests of Statistical Hypotheses. *The Annals of Mathematical Statistics*, 16(2), 117-186. doi:10.1214/aoms/1177731118.

Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R., & Kinzig, A. (2004). Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 9(2), 5. Recuperado de <https://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/>.