



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**  
INSTITUTO DE ECOLOGÍA  
ECOLOGÍA

**MODELOS DINÁMICOS DE REDES ECOLÓGICAS PARA UN  
SISTEMA PRODUCTIVO COMPLEJO: LA MILPA MEXICANA**

# **TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

PRESENTA:

**RAFAEL LÓPEZ MARTÍNEZ**

**TUTORA PRINCIPAL DE TESIS: DRA. MARIANA BENÍTEZ KEINRAD**  
INSTITUTO DE ECOLOGÍA, UNAM

**COMITÉ TUTOR: DR. JUAN FORNONI AGNELLI**  
INSTITUTO DE ECOLOGÍA, UNAM  
**DR. LUIS GARCÍA BARRIOS**  
DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA  
SOCIEDAD Y AMBIENTE, ECOSUR

MÉXICO, D.F., NOVIEMBRE, 2017  
CD.MX.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.





**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**  
INSTITUTO DE ECOLOGÍA  
ECOLOGÍA

**MODELOS DINÁMICOS DE REDES ECOLÓGICAS PARA UN  
SISTEMA PRODUCTIVO COMPLEJO: LA MILPA MEXICANA**

# **TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

PRESENTA:

**RAFAEL LÓPEZ MARTÍNEZ**

**TUTORA PRINCIPAL DE TESIS: DRA. MARIANA BENÍTEZ KEINRAD**  
INSTITUTO DE ECOLOGÍA, UNAM

**COMITÉ TUTOR: DR. JUAN FORNONI AGNELLI**  
INSTITUTO DE ECOLOGÍA, UNAM  
**DR. LUIS GARCÍA BARRIOS**  
DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA  
SOCIEDAD Y AMBIENTE, ECOSUR

MÉXICO, D.F., NOVIEMBRE, 2017

Lic. Ivonne Ramírez Wence  
Directora General de Administración Escolar, UNAM  
Presente

Me permito informar a usted, que el Subcomité de Ecología y Manejo Integral de Ecosistema, en su sesión ordinaria del día 31 de julio de 2017, aprobó el siguiente jurado para la presentación del examen para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS** del Posgrado en Ciencias Biológicas, del alumno **LÓPEZ MARTÍNEZ RAFAEL** con número de cuenta **406010869** con la tesis titulada **"MODELOS DINÁMICOS DE REDES ECOLÓGICAS PARA UN SISTEMA PRODUCTIVO COMPLEJO: LA MILPA MEXICANA"**, bajo la dirección de la **DRA. MARIANA BENITEZ KEINRAD**:

Presidente:	DRA. EK DEL VAL DE GORTARI
Vocal:	M. EN C. EMILIO MORA VAN CAUWELAERT
Secretario:	DR. LUIS ENRIQUE GARCÍA BARRIOS
Suplente:	M. EN C. EVERARDO GUSTAVO ROBREDO ESQUIVELZETA
Suplente:	DR. LEV ORLANDO JARDÓN BARBOLLA

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

**A T E N T A M E N T E**  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**  
Cd. Universitaria, Cd. Mx., a, 24 de agosto de 2017

  
**DR. ADOLFO GERARDO NAVARRO SIGÜENZA**  
**COORDINADOR DEL PROGRAMA**



### **Agradecimientos institucionales**

Agradezco al Programa del Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM, a la beca CONACYT que se me proporcionó como parte del mismo (545790), al Programa de Apoyo a los Estudios de Posgrado (PAEP-2015) y al proyecto CONACYT (221341).

Agradezco a mi tutora principal la Dra. Mariana Benítez Keinrad, y a los miembros de mi comité tutor el Dr. Juan Enrique Fornoni Agnelli y el Dr. Luis Enrique García Barrios por sus aportaciones, comentarios y paciencia.

**Agradecimientos a título personal y dedicatoria**

... por y para todos ...

# Índice de contenido

Resumen.....	9
Introducción.....	10
Crisis de biodiversidad y conservación.....	10
La agricultura industrial y su papel en las crisis alimentaria y de biodiversidad.....	11
Agroecología, fusión del conocimiento tradicional y el conocimiento ecológico.....	14
La milpa, una alternativa agroecológica.....	16
Competencia con las arvenses o mutualismo con los quelites.....	18
Planta ↔ herbívoro, la red trófica elemental.....	19
¿Insectos=enemigos?.....	21
Manejo agroecológico de los herbívoros.....	23
El clima y sus variaciones.....	25
La milpa como un sistema complejo.....	26
Herramientas para el estudio de los sistemas complejos.....	30
Redes booleanas.....	31
Modelación dinámica de redes ecológicas.....	33
Hipótesis.....	36
Objetivos.....	36
Métodos.....	37
Conocimiento del sistema y construcción del modelo booleano.....	37
Definición de tratamientos a evaluar.....	38
Experimentación in silico.....	39
Construcción de la base de datos y análisis estadístico.....	40
Resultados.....	41
1. Modelo booleano de la milpa.....	41
Definición de los nodos de la red o elementos del modelo de la milpa.....	42
Definición de aristas de la red o interacciones del modelo de la milpa.....	45
Medidas estructurales de la red y visualización del grafo.....	45
2. Análisis e interpretación de la dinámica observada en los escenarios estables.....	46
Interpretación de los estados booleanos.....	46
Interpretación de los escenarios estables.....	48
Definición de las variables a medir, permanencia y riesgo relativo.....	49
Permanencia individual.....	49
Permanencia conjunta.....	50
Riesgo relativo o vulnerabilidad.....	51
3. Análisis estadístico de los resultados obtenidos.....	53
(1) Análisis individual del maíz.....	54
(2) Análisis individual del frijol enredador.....	56
(3) Análisis individual de la calabaza.....	58
(4) Análisis individual de los quelites.....	60
(5) Análisis conjunto de los cultivos y los quelites.....	60
Discusión.....	66
Supuestos y limitaciones del modelo.....	66
Discusión de los resultados del análisis estadístico.....	67

Modelación de la milpa mediante redes booleanas, sus alcances como una herramienta agroecológica.....	73
Conclusiones.....	77
Anexo 1.....	79
Tabla de interacciones.....	79
Referencias.....	86

## Índice de figuras

Figura 1.....	45
Figura 2.....	46
Figura 3.....	47
Figura 4.....	53
Figura 5.....	55
Figura 6.....	57
Figura 7.....	59
Figura 8.....	61
Figura 9.....	63
Figura 10.....	68
Figura 11.....	70

## índice de tablas

Tabla 1.....	15
Tabla 2.....	27
Tabla 3.....	64
Tabla 4.....	65
Tabla 5.....	79

## Resumen

La agroecología es una disciplina que busca replantear los objetivos del quehacer científico y de la práctica de la agricultura desde un marco conceptual que abarque las esferas económica, social y ecológica. Por su parte las ciencias de la complejidad brindan herramientas para combinar modelos que puedan representar sistemas que actúen a distintas escalas. En este trabajo se conjuntaron ambas ramas del conocimiento con el fin de generar un marco de modelación teórico para el agroecosistema milpa. Se construyó un modelo de redes booleanas para rescatar la dinámica ecológica de dicho sistema y poder poner a prueba mediante perturbaciones estocásticas el comportamiento del mismo a partir de las variables definidas como permanencias y riesgo relativo. Esto se hizo para distintos tratamientos con los que se evaluó el desempeño de distintas combinaciones de cultivos y de uso de insumos o prácticas de manejo. Los resultados obtenidos sugieren que la combinación óptima de cultivos de acuerdo con el modelo es el bicultivo maíz-frijol, manejado con desyerbe manual e insecticida, presentando este tratamiento sus mayores permanencias y menores vulnerabilidades bajo la perturbación del efecto de los herbívoros. Además el modelo realizado permite constatar la importancia de las relaciones de facilitación en los agroecosistemas y resaltar que este tipo de modelos rescatan una dinámica demasiado general como para generar sugerencias a los productores pero lo suficientemente característica como para cumplir con objetivos pedagógicos.

## Summary

*Agroecology is a discipline that looks for the restatement of the objectives pursued by the scientific activity and the agricultural practice from a framework that comprises the economical, social and ecological spheres. The complexity sciences provide from tools which are able to incorporate different multiscale systems in a qualitative way. In this work we merge this two knowledge branches with the aim of building a modelling framework for the milpa agroecosystem. A boolean network model was built for rescuing its ecological dynamics and evaluate the response of the variables defined as permanence and relative risk to stochastic perturbations. This was done for several treatments that consider diferente culture combinations and of management practices. The results obtained suggest that the more succesful combination was the corn-bean biculture with the use of manual weed control and the use of insecticide, presenting its biggest permanences and lower relative risks under the herbivores effect. Besides that, the model allows to confirm the importance of the facilitation relationship between the cultures of an agroecosystem and to highlite that this kind of models rescue a dynamic too general for givind suggestions for the farmers but enoughly characteristic to accomplish pedagogical endiings.*

# Introducción

*If I may...*  
*Um, I'll tell you the problem with the scientific power that you're using here,*  
*it didn't require any discipline to attain it.*  
*You read what others had done and you took the next step.*  
*You didn't earn the knowledge for yourselves,*  
*so you don't take any responsibility for it.*  
*You stood on the shoulders of geniuses*  
*to accomplish something as fast as you could,*  
*and before you even knew what you had,*  
*you patented it, and packaged it, and slapped it*  
*on a plastic lunchbox, and now... you're selling it,*  
*you wanna sell it. Well ...*  
(Ian Malcolm, Jurassic Park, 1993)

## Crisis de biodiversidad y conservación

¿Qué es la biodiversidad y por qué se dice que actualmente se está padeciendo una crisis al respecto? Este es un cuestionamiento que puede abordarse desde distintos enfoques, sin embargo aquí se hará un breve recuento de algo más concreto sobre la influencia que la actividad humana, y en particular la agrícola, ha tenido sobre los ecosistemas. La evidencia disponible sugiere que el humano ha provocado el aumento acelerado de las tasas de extinción en el último par de cientos de años de una manera comparable con las estimadas para los cinco eventos de extinción masiva de los que se tiene registro (Kolbert, 2014; Sodhi, Brook, & Bradshaw, 2009). Sodhi y colaboradores (2009) establecen que algunos de los fenómenos antropogénicos identificados como agentes causales de esta disminución drástica en la riqueza biológica de un lugar son: el cambio en el uso de suelo, la sobreexplotación de los recursos naturales (Lewontin & Levins, 2007), la introducción de especies invasoras, el surgimiento y el incremento en la incidencia de enfermedades, el calentamiento global y el aumento en las tasas de deposición del nitrógeno. Todos estos procesos están relacionados entre sí en mayor o menor medida y provocan una reducción o modificación del hábitat de los organismos a la cual no todos logran adaptarse y que suele convertirse en la principal causa de su desaparición (Sodhi et al., 2009). Este proceso multifactorial suele ser abordado por la biología de la conservación para tratar de entender y remediar la pérdida de una población o comunidad biológica, sin embargo, la complejidad del fenómeno hace que a veces se obvien posibles situaciones colaterales (e.g. coextinciones, dinámicas metapoblacionales, servicios ecosistémicos, el contexto económico global, la situación de las comunidades humanas cercanas al sitio de conservación) (Wilcove, 2009). Es por esto que en este trabajo se comenzará retomando cuáles son los efectos que las alteraciones de la biodiversidad y su dinámica ecológica tienen sobre los bienes y servicios que los ecosistemas le proveen al ser humano (Hooper et al., 2005) y más concretamente, cómo éstos se ven afectados por la agricultura y algunas de las distintas maneras de practicarla (Vandermeer, 2010).

## La agricultura industrial y su papel en las crisis alimentaria y de biodiversidad

La agricultura es uno de los principales medios a través de los cuales el ser humano ha impactado en los ecosistemas naturales mediante lo que Vitousek y colaboradores (1986) denominan: la apropiación humana de la producción primaria. Dicho impacto ha presentado distintos niveles de intensidad desde hace aproximadamente 9000 años, sin embargo, no fue sino hasta después de la revolución industrial que con las nuevas tecnologías y debido a las explosiones demográficas se presentó un incremento nunca antes visto en la expansión de las tierras destinadas a la producción de alimento (Foley, Monfreda, Patz, & Ramankutty, 2009). Este patrón de expansión no fue uniforme a nivel global sino que estuvo determinado por los intereses económicos y políticos de las potencias europeas y marcó el origen de lo que actualmente son las grandes regiones agrícolas y ganaderas del mundo (Foley et al., 2009). Estos territorios suman en total alrededor de 45 millones de kilómetros cuadrados (15 destinados a la agricultura y 30 a la ganadería), los cuales equivalen a aproximadamente 35% de la superficie terrestre no cubierta por hielo y en su mayoría representan casi la totalidad de las tierras consideradas como adecuadas para la práctica agrícola (Ramankutty, Evan, Monfreda, & Foley, 2008). Este proceso de expansión agrícola, junto con otros fenómenos como la deforestación y el crecimiento de los asentamientos humanos, han contribuido desde entonces a los cambios en la biodiversidad sobre todo en los ecosistemas tropicales, las regiones templadas del hemisferio sur, las sabanas, las praderas y los ecosistemas mediterráneos (Sala et al., 2000).

Este expansionismo agrícola alcanzó su límite, en lo que a superficie se refiere, durante la década de 1950-1960, después de la segunda guerra mundial, restando solamente por explotar (masivamente) las selvas de las regiones tropicales de América Latina, África e Indonesia (Foley et al., 2009). Posteriormente comenzaría un periodo conocido como revolución verde, el cual estuvo caracterizado por un aumento en la tecnificación y en la intensidad de las prácticas agrícolas promovido por varios gobiernos (*e.g.* Estados Unidos, Inglaterra, México, etc.) bajo el lema de “*incrementar la producción de alimentos para terminar con el hambre en el mundo*” (Perfecto et al., 2009). Dicho fenómeno se vio reflejado en un mayor uso de insumos de origen sintético industrial, los cuales eran regalados a los agricultores mediante programas gubernamentales de apoyo al campo y podían venir en forma de semillas “mejoradas”, fertilizantes y biocidas (insecticidas y herbicidas), o de maquinaria para la siembra, cosecha e irrigación de los cultivos (Perfecto et al., 2009). Estas prácticas darían origen al manejo agrícola de tipo industrializado o manejo convencional y repercutirían en los rendimientos mundiales logrando incrementos en la producción promedio de ciertos cultivos del 100% en un lapso de 40 años (1960-2000) (Foley, Defries, Asner, Barford, & Bonan, 2005). Sin embargo, el hambre en el mundo no terminó y lo que sí se ha observado es un aumento en la degradación de los ecosistemas promovido por este proceso de intensificación, lo que motiva el cuestionamiento de ¿por qué éste fue y sigue siendo promovido por los gobiernos?

Uno de los aspectos que caracteriza al manejo convencional es el uso de fertilizantes. La industria productora de fertilizantes surge en Europa desde finales del siglo XVIII como una respuesta hacia la degradación del suelo provocada por la práctica agrícola sostenida. Aunque tecnológicamente simple en sus inicios, potenció su influencia en la agricultura gracias al planteamiento de la Ley del Mínimo de Liebig, la cual marcó el principio bajo el cual se manejan “convencionalmente” los suelos de las

parcelas agrícolas hasta el día de hoy: “las plantas requieren de los nutrientes en distintas proporciones y aquel nutriente que se encuentre en menor disponibilidad en el suelo limitará su crecimiento, por lo tanto hay que añadir dichos nutrientes al suelo para tener un crecimiento óptimo”; esto, junto con la alta demanda de explosivos basados en nitratos motivada por las guerras del siglo XX catalizaría el crecimiento de esta industria (Perfecto et al., 2009). Paralelamente, la necesidad de contar con variedades vegetales que fueran capaces de aprovechar el exceso de nutrientes aportado por los fertilizantes pasó a formar parte fundamental de la agenda de investigación del siglo XX. Al inicio, los llamados agricultores científicos fueron bastante exitosos en el desarrollo de variedades que aumentarían los rendimientos mediante los procesos de cruce y selección, mas resultaba paradójico que se promovieran estas líneas de investigación siendo que durante las décadas de 1930 y 1960 se habían presentado dos grandes crisis económicas mundiales motivadas por la sobreproducción de algunos productos agrícolas (Perfecto et al., 2009). Por su parte la fabricación de biocidas vería su auge técnico durante la primera y segunda guerras mundiales (*e.g.* 2,4-D, DDT, paratión), periodo durante el cual pese a no haber sido utilizados durante los conflictos su desarrollo sería ampliamente promovido por los gobiernos de los países participantes (*e.g.* Estados Unidos, Alemania, Inglaterra, etc). No fue sino hasta la guerra de Vietnam que estos productos se utilizarían con fines bélicos, sin embargo el subsecuente periodo de paz representaba una amenaza para los excedentes de producción de esta creciente industria, por lo que era necesario reubicarlos en algún mercado para evitar su depreciación. Teniéndose entonces excedentes de producción en estas tres industrias fue que comenzó a construirse un nuevo discurso bélico, ya no en contra de los comunistas sino de las “plagas” y “malezas” que representaban una amenaza para los cultivos que alimentarían a la siempre creciente población mundial (Perfecto et al., 2009). En 1970 comenzaron a distribuirse primero en México y después en varios lugares del mundo los llamados paquetes verdes, los cuales se conformaban de: 1) variedades de semillas de alto rendimiento (sobre todo de maíz, trigo y arroz), 2) el fertilizante necesario para obtener dichos rendimientos, 3) el insecticida para remediar las consecuencias ecológicas de implementar grandes monocultivos en altas densidades (*e.g.* el aumento de la incidencia de herbívoros y fitopatógenos), y 4) la correspondiente infraestructura de riego en aquellos lugares donde los regímenes de lluvia no fueran favorables para satisfacer la demanda hídrica de los cultivos (Perfecto et al., 2009).

Foley (2011) menciona que la producción agrícola mundial solo ha aumentado un 20% en los últimos 20 años (~1990-2010), lo cual llama la atención si se considera que en décadas previas se había logrado doblar los rendimientos mundiales mediante la industrialización de la agricultura. Esto puede estar evidenciando el término de la fase exponencial de dichos incrementos y su entrada a la fase de decremento logarítmico que caracteriza a casi todas las curvas de rendimiento cuando abandonan su óptimo de eficiencia. Además resulta que del total de dicha producción solo 60% se destina para alimentar a las personas, el 35% se utiliza como alimento para ganado y 5% para fabricar biocombustibles (Foley, 2011); del porcentaje destinado a alimentación humana el 70% proviene de solo el 30% de las tierras cultivadas y dicha producción es llevada a cabo por aquellos agricultores denominados pequeños productores o campesinos (ETC, 2009). Considerando lo anterior y contrastándolo con una de las Metas de Desarrollo del Milenio propuestas en el año 2000 por las Naciones Unidas, en especial la de erradicar el hambre en el mundo, se tiene que aunque el número de personas en esta situación se ha reducido (de 1015 millones 1990-1992 a 805 millones 2015), la mayor parte se siguen ubicando en las mismas regiones (Sur y Sureste de Asia, África subsahariana) registrándose incluso aumentos en algunas de ellas (FAO, IFAD, & WFP, 2014). Por lo tanto, el aumento en la producción no está cumpliendo con el objetivo por el cual se promovió la

industrialización de la agricultura, ya que la comida no está llegando a las personas en situación de hambre crónica, y por el contrario, existen datos que muestran que los tipos de producción que en realidad están alimentando al mundo, aunque en algunos casos de manera insuficiente o ineficiente, son las implementadas por los campesinos locales de cada región muchas veces a través de métodos tradicionales (ETC, 2009). Por otra parte los efectos colaterales de la industrialización de la agricultura en el ambiente pueden notarse en la importante contribución que estas prácticas tienen en la emisión de gases de efecto invernadero ( $N_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ) (Foley et al., 2009; Power, O'Rourke, & Drinkwater, 2009), el surgimiento de zonas hipóxicas en los cuerpos de agua por la contaminación debida al mal uso de fertilizantes (Bennet, Carpenter, & Caraco, 2001; Foley, 2011), el aumento de la obesidad junto con la desnutrición en la población mundial debido al cambio de las dietas (Frison, Chérfa, Eyzaguirre, & Johns, 2006), el incremento en la incidencia de enfermedades como la malaria por el aumento de los hábitat favorables para la reproducción de su vector (Patz et al., 2004), la mayor incidencia de diversos tipos de cáncer asociados al uso de plaguicidas (Bassil et al., 2007) y la ya mencionada desaparición de especies, no solo silvestres sino también domesticadas (Vandermeer, 2010).

Sin embargo, existen y han existido diversos tipos de agricultura o de manejos agrícolas que no necesariamente impactan al ambiente de la misma manera que el manejo industrializado. Algunos de estos tipos son: agricultura campesina, familiar o tradicional; agricultura basada en la ecología de sistemas naturales o agroecología; agricultura orgánica; agricultura de precisión; e incluso ciertos usos de la misma agricultura industrial o también llamada convencional entre otras (Perfecto et al., 2009). Esta clasificación busca resaltar, aunque cualitativamente, el nivel de uso o de acceso que los agricultores tienen a distintos tipos de insumos, siendo menor en las primeras categorías mencionadas y mayor hacia las últimas. Es de importancia considerar estas alternativas ya que la sociedad moderna está enfrentando una crisis alimentaria y de biodiversidad que resulta estar íntimamente relacionada con la manera en la que se produce y distribuye el alimento en el mundo. Este último aspecto es conocido como sistema agro-alimentario y su implementación repercute a su vez en la conservación de la biodiversidad. En palabras de Tittonell (2013): "... el modelo hegemónico de la agricultura actual es obsoleto. Es incapaz de alimentar al mundo, es termodinámica y socialmente insostenible, contamina el ambiente, es directa e indirectamente responsable de la pérdida de biodiversidad e impacta seriamente la salud humana. Incluso si colocamos los valores y la ética de lado, existe evidencia de que la agricultura convencional es simplemente incapaz de alimentar al mundo hoy en día y lo será menos en 50 años". Es en este contexto que la generación de alternativas o recuperación de métodos existentes viables para modificar el sistema agro-alimentario necesita verse enriquecida mediante la colaboración de varias disciplinas que usualmente han trabajado desvinculadas.

El mismo Tittonell (2013) propone una "intensificación ecológica de la agricultura", la cual es una propuesta que promueve un sistema de producción que tienda gradualmente hacia un híbrido entre el sistema orgánico y los sistemas de producción tradicionales (*i.e.* que sea un sistema menos dependiente de los combustibles fósiles). Dicha transición debe considerar los distintos contextos locales, ya que una sustitución radical del tipo de insumos utilizados sin una rotación y asociación de cultivos adecuada u otras medidas para el manejo integral de los nutrientes y los herbívoros, puede tener consecuencias inmediatas como el decremento drástico de los rendimientos. Es en este sentido que los promotores de la agricultura convencional cuestionan la capacidad de provisión de los sistemas alternativos, argumentando que para mantener los rendimientos actuales mediante otro tipo de

producción debería de incrementarse en seis veces la extensión de las zonas de cultivo (Perfecto & Vandermeer, 2010; Tittonell, 2013). Sin embargo, comparando los rendimientos productivos de algunos esquemas orgánicos y otros convencionales a lo largo del mundo, dos estudios independientes encontraron que el de los primeros es, en promedio, 20% menor que el de los segundos (de Ponti, Rijk, & van Ittersum, 2012; Seufert, Ramankutty, & Foley, 2012) mientras que por su parte Badgley y colaboradores (2006) hicieron una revisión de 293 casos y una proyección a partir de los mismos en las que los esquemas de producción orgánica resultaron potencialmente capaces de mantener e incluso incrementar la producción mundial de alimento sin aumentar la superficie agrícola, proveyendo de seguridad alimentaria a las comunidades y ayudando a disminuir la pobreza y el desempleo. Pese a que es claro que un cambio radical en el esquema de producción mundial es un gran reto, una manera en la que dicha migración puede comenzar a explorarse es mediante el incremento de la investigación científica enfocada hacia este tipo de problemáticas, buscando situar en la agenda académica actual la necesidad de incrementar el conocimiento ecológico de los sistemas agrícolas pero desde un enfoque diferente al promovido durante los siglos pasados (Badgley et al., 2006; Vandermeer & Perfecto, 2013).

## **Agroecología, fusión del conocimiento tradicional y el conocimiento ecológico**

La agroecología es una disciplina que estudia a los agroecosistemas buscando integrar las aproximaciones provenientes de diversas disciplinas (e.g. ecología, agronomía, antropología, economía) junto con los conocimientos teóricos y prácticos de la agricultura tradicional o campesina (Ruiz-Rosado, 2006). Un agroecosistema o agrosistema puede definirse como el conjunto que emerge como resultado de las interacciones que se dan en el predio agrícola entre factores biológicos, ambientales y de manejo humano (Altieri, 1999). La agroecología promueve la investigación científica de los agroecosistemas rescatando el conocimiento *folk* o tradicional con el fin de remediar parte de la ignorancia que existe sobre las dinámicas ecológicas locales y así diseñar estrategias prácticas que permitan migrar a sistemas agrícolas mejor adaptados a cada contexto (Vandermeer & Perfecto, 2013). La necesidad de realizar ésta o alguna fusión entre los enfoques tradicionales y las disciplinas científicas queda esbozada en la llamada paradoja de Levins: “el conocimiento tradicional es profundo pero local mientras que la teoría ecológica es general pero superficial” (Lewontin & Levins, 2007).

Mencionando un ejemplo de lo anterior, tenemos el trabajo llevado a cabo por Morales y Perfecto (2000) junto con los campesinos mayas cakchiquel del poblado de Patzún en las montañas de Guatemala, quienes al ser entrevistados respecto a los problemas que las plagas generaban en sus cultivos respondieron en su mayoría negando la existencia tanto de plagas como de problemas asociados a las mismas. Sin embargo, al eliminar la palabra “problema” de la entrevista e intercambiar la palabra “plaga” por las de “insectos que se alimentan en su milpa” los campesinos mencionaron a 18 de los 22 grupos reportados como plagas potenciales por expertos del programa de manejo integral de plagas. Aunado a esto, cabe mencionar que de los cuatro grupos que los campesinos no mencionaron, tres son difíciles de observar a simple vista y el otro probablemente es identificado como miembro de otro grupo. Estas diferencias conceptuales también se vieron reflejadas en la mayoría de las respuestas obtenidas al preguntarle a los campesinos sobre las medidas de control que ejercían para evitar que los insectos se comieran sus cultivos, ya que respondieron que ellos no ejercían medidas de control (*i.e.* uso de insecticidas orgánicos o sintéticos) sino que en muchos casos los niveles de herbivoría no

generaban un problema económico, además de que manifestaron conocimientos sobre el clima, suelo, plantas y animales de la región que, junto con sus prácticas religiosas, constituían sus medidas de prevención.

La conservación de la biodiversidad es un área cuyo discurso suele construirse como antagónico al de la producción agrícola. Usualmente se coloca a la segunda como una razón importante de que la primera sea necesaria y, por otra parte, la primera resulta una especie de obstáculo para la segunda. La agroecología surge en parte motivada por este antagonismo y busca construir un marco conceptual desde el que puedan discernirse los matices existentes entre la visión productivista y la conservacionista. Esta conciliación permite plantear la pregunta, ¿es la agricultura una causa de la pérdida de biodiversidad o lo es el tipo de agricultura?

La agricultura campesina, tradicional, familiar o la implementada por pequeños productores representa un conjunto de contextos, técnicas y manejo de biodiversidades sumamente heterogéneo. Sin embargo, existen ciertas características que la identifican como diferente del esquema convencional, industrializado y extensionista esbozado en los apartados anteriores (Altieri, Funes-Monzote, & Petersen, 2012). Para facilitar el tratamiento de ambos tipos de agricultura se referirá al primero como manejo tradicional y al segundo como manejo convencional. En la Tabla 1 puede observarse una comparación de algunas de sus características, las cuales fueron extraídas de varios trabajos por Altieri y colaboradores (2012).

*Tabla 1: Comparación de manejos tradicionales y convencionales*

<b><i>Manejo tradicional</i></b>	<b><i>Manejo convencional</i></b>
<i>Alto nivel de biodiversidad (cultivada y asociada)</i>	<i>Bajo nivel de biodiversidad (cultivada y asociada)</i>
<i>Diversidad de tecnologías y sistemas para el manejo y conservación de los recursos con base en el conocimiento tradicional</i>	<i>Homogeneidad en el tipo de tecnologías empleadas con base en conocimientos generales de la práctica agronómica y de laboratorios externos</i>
<i>Representan agroecosistemas que exhiben resiliencia y robustez hacia perturbaciones humanas y ambientales minimizando el riesgo de varibabilidad</i>	<i>Son sistemas altamente sensibles a perturbaciones climáticas, por herbivoría y por aumento en la incidencia de las arvenses</i>
<i>El uso de insumos industriales tiende a ser bajo</i>	<i>El uso de insumos industriales es alto</i>

Si se considera a la eficiencia como un parámetro para comparar a la agricultura campesina u orgánica con la agricultura convencional, la primera lo suele ser más que la segunda. Dicha eficiencia puede calcularse como el cociente de la cantidad de productos obtenidos entre la cantidad de insumos invertidos por unidad de área y tiempo, *i.e.* el rendimiento (Masera & Astier, 1993). La ineficiencia energética de la agricultura industrial o convencional simplemente es el reflejo del gran desperdicio ya discutido y que como efectos secundarios tiene, la contaminación del aire, agua y suelo de la zona en donde se implementa la actividad agrícola, pero también de las zonas circundantes. De la mano con lo anterior se tiene un decremento de la biodiversidad tanto agrícola como de toda la biota nativa del lugar. Esta pérdida de diversidad también se ve reflejada en la alimentación de las personas y

consecuentemente en su salud, hoy en día el 90% del sistema alimentario gira alrededor de la producción de 120 especies de plantas cultivadas, y de éstas, solo cuatro (maíz, arroz, papa y trigo) aportan más de la mitad de los rendimientos destinados a alimentación humana (Boege, 2009). Para los casos de la agricultura orgánica y la campesina también pueden tenerse ineficiencias, pero esta situación es más rara comparada con los sistemas convencionales y existe una gran cantidad de alternativas y planteamientos dependiendo de la región que se esté estudiando (Perfecto & Vandermeer, 2010).

En el caso concreto de México, el agroecosistema basado en el maíz sembrado en policultivo y conocido como milpa ha sido históricamente un sistema altamente eficiente caracterizado por presentar una alta diversidad de cultivos y de biota asociada. Su implementación o adaptación, posiblemente mediante un manejo orgánico, en ciertas zonas que actualmente se encuentran bajo distintos grados de explotación convencional podrían brindar una alternativa para incrementar la calidad de la matriz en la que están embebidas las áreas de vegetación primaria. De manera paralela se promovería la conservación de la biodiversidad, la seguridad alimentaria de las comunidades, la disminución del uso de insumos sintéticos y preservar las tradiciones y costumbres locales (Perfecto et al., 2009).

## **La milpa, una alternativa agroecológica**

La palabra milpa proviene del náhuatl *milli* (cultivo) y *pan* (en o sobre) y suele traducirse al español textualmente como: lugar de cultivo. Esta palabra también hace referencia a un policultivo espacial suplementario de origen prehispánico que actualmente se sigue practicando en distintas versiones en varias regiones de México y América Latina (Ebel, Pozas Cárdenas, Soria Miranda, & Cruz González, 2017). Las especies y variedades cultivadas en la milpa suelen tener usos alimentarios, medicinales, ornamentales, comerciales, como abonos y como materiales de construcción (Buenrostro, 2008). Esta diversidad de usos generalmente va acompañada de una alta diversidad biológica, *e.g.* se han reportado hasta 65 plantas diferentes dentro de una milpa en Totonacapan, Veracruz (Kato-Yamakake, Mapes-Sánchez, Mera-Ovando, Serratos-Hernández, & Bye, 2009). Buenrostro (2008) menciona que junto con la implementación de este policultivo se desarrolló una visión integral por parte de los indígenas y campesinos hacia las hierbas o herbívoros nativos asociados a la milpa, visión que es distinta de la que se tiene desde el sistema convencional. Algunos de estos organismos, que podrían clasificarse como malezas o plagas, en varias regiones de Mesoamérica no lo son (Morales, 2000), e incluso, suelen ser ingredientes o alimentos potenciales de muchos lugares del centro y sur de México (*e.g.* los arvenses como el epazote o el pápalo-quelite, insectos como el chapulín y el gusano elotero, u hongos como el cuitlacoche).

La domesticación y diversificación de la agrocomunidad asociada a la milpa fue guiada por esta visión integral de los cultivos y las arvenses, promoviendo así un proceso coevolutivo que se vio afectado por distintas condiciones ambientales, en consecuencia se tienen distintas versiones de milpa, en lo que a su composición se refiere, que se corresponden con la diversidad climática y cultural características de Mesoamérica (Boege, 2009). La composición de la agrocomunidad milpa varía dependiendo de la región, pero en casi todas puede encontrarse algún subconjunto del grupo de plantas conocidas como “las tres hermanas”: el maíz (*Zea mays*), frijol (*Phaseolus vulgaris*) y calabaza (*Cucurbita* spp) (Aguilar et al., 2003). Actualmente existe una tendencia a la simplificación de este agrosistema ya sea hacia bicultivo, siendo usualmente el maíz el cultivo principal, o hacia monocultivo de maíz (Ebel et

al., 2017). Dicha tendencia tiene que ver principalmente con factores socioeconómicos como la promoción gubernamental de la mecanización y los monocultivos durante la Revolución Verde (Vandermeer, 2010) o con la alta demanda de mano de obra que suelen requerir los policultivos espaciales debido a que la mecanización de su manejo no suele ser viable (Ebel et al., 2017). Ebel y colaboradores (2017) mencionan que la milpa tradicional, entendiendo este término de acuerdo con el apartado anterior, suele implementarse junto con el temporal y sin mayor uso de agromaquinaría que diversas técnicas de desyerbe mecánico. La fertilidad del suelo es mantenida mediante la práctica alternada de los periodos de barbecho con la roza-tumba-quema que también aporta nutrientes a estos policultivos (Mariaca-Méndez, 1988). No obstante, también debe de mencionarse que en muchas regiones de México el cultivo de la milpa se lleva a cabo mediante el uso de insumos convencionales (herbicidas, insecticidas y fertilizantes), viéndose éste fomentado o limitado por el contexto de cada agricultor.

La agrobiodiversidad asociada a la milpa es una estrategia para enfrentar herbívoros, arvenses y enfermedades (Ebel et al., 2017). El implementar este sistema de policultivo genera un decremento de la competencia interespecífica mediante el fortalecimiento de la intraespecífica el cual puede ser óptimo o no dependiendo de las densidades de siembra de cada cultivo y de las interacciones ecológicas existentes entre los mismos (Ebel et al., 2017; Vandermeer, 2010). El contar con varios cultivos en densidades y distribución adecuadas puede permitir una mayor área de captación lumínica al interior de la parcela, también la disminución de la erosión del suelo gracias a una mayor cobertura, así como la distribución del riesgo de pérdida del cultivo principal en los cultivos secundarios (Liebman & Dyck, 1993). De igual forma ciertas combinaciones, como la de “gramínea-legumbre” se caracterizan por presentar rendimientos por planta y por parcela por encima de los esperados (Ebel et al., 2017; Vandermeer, 2010), fenómeno que en parte se explica por la repartición de nichos deducida a partir de su fisionomía aérea y subterránea (Postma & Lynch, 2012). En el sistema milpa, el maíz se caracteriza por servir de sostén a la variedad enredadora de frijol y debido a la forma de las hojas de ambos, lanceoladas las del maíz y más pequeñas y redondeadas las del frijol, la competencia lumínica es prácticamente nula. Por su parte, la calabaza ocupa el estrato inferior del policultivo, sus hojas anchas evitan la pérdida de humedad superficial en el suelo y además compite por la luz con las arvenses jóvenes reduciendo su abundancia (Buenrostro, 2008; Ebel et al., 2017; Postma & Lynch, 2012). Al mismo tiempo, las raíces de cada uno de estos cultivos logran predominar en distintos niveles del suelo, reduciendo así la competencia por la asimilación de nutrientes (Postma & Lynch, 2012).

El potencial alimentario del sistema milpa ha sido y es remarcable, ejemplos de su eficiencia son las chinampas características del valle de México o los cultivos de maíz sembrados en el suelo calcáreo de la península de Yucatán (Chappell et al., 2013; Mariaca-Méndez, 2015). Como todo agroecosistema, no está exento de requerir un cierto nivel de manejo humano y éste puede ser más o menos intervenido dependiendo tanto del nivel y tipo de insumos utilizados como del grado de simplificación de la riqueza de cultivos y vegetación asociada. ¿Cómo afecta esto la productividad del sistema y su resiliencia respecto a ciertos disturbios? Es una pregunta que los productores responden empíricamente año con año, sin embargo, la vulnerabilidad en la que caen por hacer esto puede ser muy alta y pueden ver comprometida su ya de por sí precaria autonomía alimentaria. Es por esto que en este trabajo se busca abordar el estudio de la dinámica del agroecosistema milpa desde una perspectiva sí agroecológica, pero también teórico-matemática. Agroecológica porque se busca sistematizar la información disponible de la dinámica del agroecosistema milpa y teórico-matemática porque la experimentación

con un modelo abstraído a partir de estas propiedades puede permitir explorar de manera *a priori* y sin consecuencias reales el desempeño de distintos manejos bajo distintos escenarios. Siguiendo esta línea de pensamiento, a continuación se hablará de tres de los principales factores contextuales que afectan a los rendimientos de la milpa, estos son: 1) la competencia que se da entre los cultivos y las arvenses asociadas, 2) la incidencia de los herbívoros y sus efectos y 3) la variabilidad climática reflejada sobre todo en el cambio en los regímenes de lluvias.

## Competencia con las arvenses o mutualismo con los quelites

Desde una visión convencional, las arvenses, usualmente referidas como malezas, son aquellas plantas que, en un momento o lugar dado y en una cantidad determinada, resultan molestas, perjudiciales o indeseables en los cultivos o en cualquier otra área o actividad realizada por el hombre (Martínez-Domínguez, 2006). Las formas en que las arvenses pueden afectar negativamente a los cultivos son mediante la competencia por los recursos (espacio, luz, agua y nutrientes minerales) o como parásitas de los mismos (Martínez-Domínguez, 2006; Oerke, 2006). Respecto a los efectos de dicha interacción en los rendimientos individuales de ciertos cultivos, Oerke (2006) menciona que las arvenses pueden llegar a ocasionarle pérdidas al agricultor de hasta un 34% del rendimiento potencial promedio (dato estimado para la producción mundial de trigo, maíz, arroz, soya, algodón y papa en el periodo 2001-2003). Dichas pérdidas son las mayores en comparación con las provocadas por cualquier otro tipo de organismo o condición meteorológica y pareciera ser que la única manera de mitigarlas fuera mediante la implementación de algún tipo herbicida (se estima que alrededor del 50% de la producción mundial de 2001-2003 se logró gracias a estos mecanismos de protección) (Oerke, 2006). Aunque estas cifras parecen desalentadoras permiten sugerir que el manejo que se le dé a las arvenses repercutirá de manera sustancial en los rendimientos esperados (Oerke, 2006). Además es importante mencionar que el efecto de las arvenses en los rendimientos de los cultivos de la milpa ha sido poco estudiado desde un enfoque que considere que la disminución de los mismos puede enmascarar aspectos benéficos relacionados con la presencia de esta vegetación asociada en la parcela.

En México, los quelites (del náhuatl *quilitl*) engloban a distintos grupos de arvenses que crecen comúnmente dentro y alrededor de la milpa (*e.g. Amaranthus hybridus, Galinsoga quadriradiata, G. parviflora, Simsia amplexicaulis, Brassica rapa, Echinopepon milleflorus, Medicago polymorpha, Malva parviflora, Lopezia racemosa y Sycios deppei*) (Vieyra-Odilon & Vibrans, 2001). Su uso varía de lugar a lugar, yendo desde su empleo como ingredientes culinarios hasta como remedios medicinales. Su potencial forrajero, por otra parte, es un aspecto que destaca por tratarse de un alimento con un alto contenido nutricional y también por presentar rendimientos por hectárea que pueden llegar a superar el de otros forrajes comerciales (*e.g. Medicago, Vicia y Sorghum*). Ejemplo de lo anterior se tiene con algunos campesinos de Tlaxcala que se han dado a la tarea de estimar la cantidad de arvenses necesarias para alimentar a una vaca en relación con el tamaño de su parcela, o también está el caso de productores del Estado de México que han obtenido rendimientos de los quelites hasta 55% mayores que los del cultivo principal (Vieyra-Odilon & Vibrans, 2001). Por otra parte hay, algunas especies de quelites (*e.g. Amaranthus, Brassica, Rumex, Malva, Chenopodium, Raphanus, Medicago, Teloxys, Polygonum y Portulaca*) que pueden comercializarse en los mercados locales y así proveer de un ingreso extra a los agricultores, promoviendo así no solo su autonomía económica sino también la diversificación de su dieta y la de los consumidores (Vieyra-Odilon & Vibrans, 2001). Contrastando esto con lo planteado en el párrafo anterior, se tiene que dependiendo de

la localidad, las arvenses no necesariamente son consideradas malezas y que incluso hay casos en los que se les considera “buen monte”. Por tanto, no es posible generalizar cómo es su influencia en los rendimientos de los cultivos a nivel mundial, ya que esto depende del valor de uso que tengan éstas para cada productor y de la proporción relativa en la que se encuentran.

Ahora bien, así como varía la concepción que se tiene sobre las arvenses, también lo hace su manejo. De acuerdo con Bahena (2008) algunas técnicas son:

1. Control químico (uso de herbicidas).
2. Control físico (desyerbe o escarda con arado y yunta).
3. Técnicas indirectas (rotación de cultivos, labranza del terreno, empleo de variedades competitivas, diseño espacial del cultivo, implementación de policultivos, uso de acolchados, manejo del agua, entre otras).
4. Control biológico (uso de enemigos naturales locales y exóticos).

Como es el caso en muchas clasificaciones, las categorías anteriores no son excluyentes, ni así lo es la aplicación de alguno de estos manejos. Hay agricultores que combinan prácticas prehispánicas, como el desyerbe manual o la cosecha y consumo de los quelites asociados a la milpa, con otras técnicas adaptadas, como la cría de distintos tipos de ganado o el uso ocasional de algún herbicida e insecticida (Basurto-Peña, 2000; González-Rodríguez, 2014; Vieyra-Odilon & Vibrans, 2001). En cuanto al control físico en la milpa, la recolección de las malezas es una labor ardua que se ve facilitada por la fisionomía del maíz a diferencia de lo que sucede en cultivos de menor altura como el trigo y la avena, los cuales pueden ser dañados al realizar esto (Vieyra-Odilon & Vibrans, 2001). Cuando el maíz es pequeño (<35-50 cm) la escarda (desyerbe y remoción de la tierra entre surcos después de haber sido sembrada la planta) puede realizarse con un tractor, pero cuando éste crece es necesario utilizar la labor manual y el arado mediante la “yunta” (tracción animal) (Vieyra-Odilon & Vibrans, 2001). Koch (1982) señala que en los trópicos hasta un 70% de la mano de obra humana se utiliza para el desyerbe mecánico o manual (Martínez-Domínguez, 2006).

Un aspecto fundamental para obtener rendimientos en la milpa radica en el momento del ciclo agrícola en que se implementa el control de las arvenses, ya que de esto depende que se favorezca la exclusión competitiva por parte de los cultivos hacia éstas (Vandermeer, 2010). Ahora bien, si se permite el establecimiento de las arvenses durante el periodo posterior a la etapa crítica de crecimiento del maíz (en general después de 3 a 5 semanas) (Martínez-Domínguez, 2006), esto puede incidir positivamente en la disminución de la erosión del suelo y en el aumento de la biodiversidad en la zona de cultivo. Este último aspecto está muy relacionado con la disminución del riesgo en la incidencia de herbívoros debido al correspondiente aumento en las poblaciones de posibles controles biológicos de éstos, influyendo así de manera positiva en los rendimientos de los cultivos (Bahena, 2008). Al igual que en el caso de las arvenses, los herbívoros y su manejo pueden ser analizados desde distintas perspectivas, sin embargo, no puede negarse la íntima relación que tiene el manejo de las primeras sobre las dinámicas poblacionales de los segundos.

## **Planta ↔ herbívoro, la red trófica elemental**

El aprovechamiento de las arvenses y la visión de las mismas como “buen monte” afecta aspectos

alimenticios, medicinales y forrajeros; sin embargo, su influencia en los herbívoros con potencial de convertirse en plagas y sus depredadores también es un aspecto que dependiendo del manejo puede derivar en incrementos en los rendimientos. Por ejemplo, Hernández-Gutiérrez (2010) menciona que para controlar las poblaciones de *Spodoptera frugiperda* (gusano cogollero) en cultivos de maíz, la rotación de cultivos así como el permitir el crecimiento de plantas no comerciales durante los periodos de barbecho son técnicas de control que pueden ser muy útiles y que no requieren de una inversión extra sustancial. Algunos cultivos que no son plantas hospedantes para el gusano cogollero son: girasol (*Helianthus annuus* L.), papa (*Solanum tuberosum* L.), ajonjolí (*Sesamum indicum* L.), soya (*Glycine max* L.), boniato (*Ipomea batatas* L.), frijol (*P. vulgaris*) y gandul (*Nicotiana glauca* L.) (Hernández-Gutiérrez, 2010) y junto con éstos se tiene a varios de los quelites mencionados en el apartado anterior. Este mismo fenómeno ya había sido observado por Altieri y Whitcomb (1980) quienes estimaron las densidades de *S. frugiperda* en parcelas de maíz que fueron sembradas junto con comunidades de arvenses inducidas o asociadas (*e.g.* *Solidago altissima*, *Amaranthus* sp., *Heterotheca subaxillaris*, *Ambrosia artemisiifolia*, *Chenopodium ambrosioides* & *Daucus carota*) y las compararon con las de parcelas libres de malezas, encontrando que las de las primeras fueron significativamente menores que las de las segundas. Aunado a esto la diversidad de depredadores naturales del gusano cogollero presentó la misma tendencia. Sin embargo, debe de mencionarse que los rendimientos netos del maíz fueron sistemáticamente mayores en las parcelas libres de arvenses sugiriendo una posible situación de *trade off*.

El diseño de este tipo de métodos de control no es sencillo, en parte por la complejidad inherente a cualquier ecosistema pero también porque los experimentos de validación suelen ser anuales y tienen repercusiones reales en la economía de los agricultores. Un ejemplo de dicha complejidad es planteado por Altieri y Letourneau (1983), quienes mencionan que para construir estas propuestas de manejo que implementen policultivos en asociación con arvenses es necesario considerar la región biogeográfica donde se ubica la parcela de cultivo y no solo la parcela en sí. Esto porque la vegetación silvestre de la que los herbívoros con potencial de convertirse en plaga se alimentan suele estar emparentada con los cultivos a los que suelen afectar, *e.g.* en el caso de los cereales, las legumbres y las plantas de forraje se sugiere la implementación de barreras vivas de árboles leñosos. Estos investigadores también comentan que el campo de cultivo puede entenderse como una isla susceptible de ser colonizada, ellos encontraron que la diversidad de artrópodos decrecía desde los bordes, en donde la diversidad vegetal era mayor, hacia el centro de dicho campo. Por lo tanto, plantean que mediante la manipulación de la diversidad vegetal presente en los bordes del cultivo uno puede promover la presencia de ciertos organismos benéficos, *e.g.* sembrando epazote y vara de oro alrededor de diversos cultivos en Florida promovieron el incremento en la población de coccinélidos debido al correspondiente aumento de la población de áfidos que habitaban en dichas plantas (Altieri & Whitcomb, 1980).

De igual manera los herbívoros pueden ser aprovechados para controlar biológicamente ciertas arvenses. Es importante recordar que la palabra control no quiere decir erradicar, sino mantener las densidades poblacionales por debajo de umbrales que permitan el desarrollo de la actividad agrícola sin perjudicar al campesino y promoviendo la funcionalidad del agroecosistema (Bahena, 2008). Dicho control consiste en el empleo de organismos de hábitos tanto especialistas como generalistas que permitan reducir la población de alguna planta objetivo al grado de que, por mera exclusión competitiva, los cultivos puedan desplazarla. La efectividad del control suele aumentar conforme lo hace su nivel de especialización hacia la planta objetivo. Cuando esto sucede el consumo de especies

deseadas es mínimo o nulo y la facilidad con la que el control se alimenta y digiere a la arvense en cuestión es mayor (Van Driesche, Hoddle, & Center, 2008). Conviene diferenciar entre distintos tipos de arvenses, ya que estas pueden ser hospederas completas o solo hospederas de desarrollo, además de que la velocidad con la que un agricultor puede observar resultados del control dependerá de el tipo de daño que el control ejerza sobre la planta en cuestión (Van Driesche et al., 2008). Existe una gran cantidad de controles que han sido utilizados con distintos niveles de éxito (vertebrados, artrópodos, nemátodos, hongos, entre otros), desde las carpas para el control del lirio acuático hasta la polilla *Cactoblastis cactorum* que permitió controlar la población de nopales en Australia (De Bach, 1964). Sin embargo, en el caso del maíz y en concreto del agroecosistema milpa hacen falta más estudios que busquen explotar la ecología y biología de los organismos nativos de cada región con el fin de reducir la intensidad de las labores manuales o mecánicas.

## ¿Insectos=enemigos?

El término plaga, al igual que maleza, hace referencia a la interacción que tienen los insectos u otros organismos con el ser humano cuando le causan daño a sus cultivos, a sus animales o a sus propiedades, en una cantidad tal que a éste le resulta inaceptable económicamente (Bahena, 2008). Las repercusiones que los herbívoros tienen sobre la producción agrícola global se estima en decrementos de entre el 10% y el 40% (Del Val, Arnés, Gaona, & Astier, 2013), sin embargo, dicha cifra enmascara si dichos efectos se presentan por igual sobre aquellos sistemas que manejan distintos niveles de intervención y uso de insumos industrializados. Para aclarar lo anterior no se cuenta con resultados globales concluyentes, sin embargo, están los ejemplos locales como el trabajo realizado por Del Val y colaboradores (2013) en el que se evaluó durante tres años la influencia del complejo gallina ciega sobre parcelas bajo distintos tipos de manejo: convencional, de rotación de cultivos y con fertilización orgánica. Dicho estudio encontró una mayor abundancia de gallina ciega en aquellas parcelas donde el uso de herbicidas, insecticidas y fertilizantes fue mayor, es decir bajo los manejos clasificados como convencionales. No obstante, los rendimientos del maíz fueron también mayores en las mismas parcelas, aunque es de señalarse que no se consideraron mediciones como la razón equivalente de la tierra (RET)<sup>1</sup> que en el caso de aquellos manejos en los que se implementaron policultivos tipo milpa podía ser una medida que volviera más comparables sus rendimientos con los del maíz en monocultivo. En el mismo estudio se mencionan otros trabajos en los que se evalúa el comportamiento de las densidades de gallina ciega en relación con el tipo de manejo empleado en las parcelas, sin embargo, debido a sus peculiaridades y discrepancias no es posible homologar conclusiones respecto del efecto del tipo de manejo en los herbívoros.

Un resultado importante del trabajo de Del Val y colaboradores (2013) radica en que el uso de insecticida parece no estar logrando eliminar la presencia de gallina ciega en las parcelas convencionales sino sólo llevarla a niveles similares a los de aquellas manejadas más orgánicamente. Este es solo uno de muchos ejemplos en los que el uso indiscriminado de insumos puede no ser la

---

1  $RET = \sum_{i=1}^n \frac{CP_i}{CM_i}$ , el RET es una medida que pondera los rendimientos de un cultivo implementado en policultivo respecto de su rendimiento en monocultivo, *CP* es el rendimiento del cultivo *i* en policultivo, *CM* es el correspondiente en monocultivo. Si el RET suma más que uno esto implica que el policultivo implementado resulta más productivo por unidad de área que los correspondientes monocultivos de cada uno de los cultivos que lo conformen (Vandermeer, 2010).

alternativa más eficiente para mejorar la producción agrícola, situación que parece consolidarse en un discurso internacional que plantea la máxima de: “es necesario reducir el uso de insecticidas sintéticos” (Vandermeer, 2010). La Organización Mundial de la Salud estima que al menos tres millones de trabajadores agrícolas son intoxicados cada año debido a la aplicación de insecticidas y alrededor de 20,000 muertes son atribuidas al uso directo de agroquímicos (Bahena, 2008). En México se cuenta con un registro oficial que reporta para la segunda mitad de la década de los 90 a más de 5000 campesinos intoxicados y se reconoce un subregistro que puede ser de cinco a 50 veces mayor (Bahena, 2008). El impacto en otros organismos no es menor, está el trabajo de Hayes y colaboradores (2003) en el que se observaron cambios hormonales en algunas especies de ranas sometidas a concentraciones de insecticida consideradas como aceptables para la salud del ser humano.

Históricamente el manejo de los herbívoros ha empleado una diversidad de técnicas que van desde medidas espirituales y de tipo religioso como el juicio y la excomulgación de los gusanos cortadores en la Suiza medieval, hasta las sofisticadas prácticas químicas empleadas por los sumerios para controlar ácaros mediante el uso de azufre, o desde el baile que practicaban las mujeres romanas alrededor de los cultivos para contrarrestar las plagas de orugas hasta el empleo que los chinos hacían del arsénico, mercurio y extractos vegetales como herramientas de fumigación y tratamiento para sus semillas, desde hace más de 1400 años (Vandermeer, 2010). Sin embargo, no sería sino hasta el siglo XX que el uso indiscriminado de insecticidas se dispararía acompañando a la revolución verde y a una migración generalizada hacia esquemas de producción que hicieran un uso más intensivo de los biocidas de amplio espectro.

El caso de los agricultores de algodón en Nicaragua resulta ilustrativo para explicar las consecuencias que el incremento en el uso de insecticidas puede tener. En 1950 se tenía reportada la incidencia de una plaga conocida como picudo o gorgojo del algodón, diez años después la plaga era el gusano del algodón junto con otras nueve que antes no lo eran y para 1970 el número e incidencia de plagas había aumentado tanto que en los años ochenta se abandonó el cultivo de algodón en Nicaragua (Vandermeer, 2010). Este ejemplo, pese a representar un caso extremo, no es tan aislado como uno pensaría, *e.g.* el caso de la roya del café y su siembra en Sri Lanka (Vandermeer, 2010). De manera análoga a lo que sucede con el uso indiscriminado de antibióticos para combatir una infección, tanto los herbívoros como las enfermedades se adaptan, pueden resurgir y, en el caso de los agroecosistemas, otros insectos que antes no eran plagas ahora serlo, esto por la disminución en las poblaciones de sus depredadores naturales debido al amplio espectro de muchos insecticidas (Bahena, 2008). En consecuencia se necesita aplicar una cantidad cada vez mayor de insecticida, situación que queda reflejada en el hecho de que desde hace 40 años el uso generalizado de estos agroquímicos ha aumentado entre 15 y 20 veces y la pérdida de cultivos por la acción de herbívoros también lo ha hecho de manera significativa: se estima que actualmente alrededor del 10% de los cultivos del mundo se pierden antes de la cosecha debido a la acción de éstos (Oerke, 2006). El caso de la milpa mexicana no solo no es la excepción, sino que fue de los primeros agroecosistemas afectados por lo anterior y en el que los efectos apenas comienzan a ser visibles décadas después (Vandermeer, 2010).

Hoy en día en México existe una corriente de cuestionamiento hacia la manera en que el gobierno promovió programas como el del manejo integrado de plagas (MIP) (Alatorre Rosas, Bravo Mojica, Leyva Vásquez, & Huerta De la Peña, 2004), el cual parece haber resultado ser más un programa para el manejo óptimo de los insecticidas que uno en el que se replanteara la necesidad de su uso (Bahena,

2008). En respuesta a esto, Bahena (1999) propuso una alternativa denominada: manejo agroecológico de plagas (MAP), en la cual las medidas de control de los herbívoros radican en promover la biodiversificación planeada de los agroecosistemas mediante distintos esquemas de rotación de cultivos y de policultivos, el uso de arvenses para atraer polinizadores y organismos para el control biológico de las poblaciones de los insectos-plaga y la sustitución del uso de insecticidas sintéticos por productos semioquímicos, bioinsecticidas o extractos vegetales. Esto aunado a otras prácticas culturales tendrían el fin de mantener a los herbívoros por debajo de un umbral poblacional que no repercutiera en la economía del agricultor, pero que no buscaría la erradicación de los mismos (Bahena, 2008). Actualmente las técnicas más empleadas para controlar a los herbívoros pueden ubicarse en alguna de cinco categorías: i) el uso de biocidas sintéticos, ii) el uso de variedades resistentes e injertos, iii) el uso de los llamados enemigos naturales, iv) el abandono de la producción del cultivo en cuestión y v) todas aquellas técnicas propias de una localidad (Vandermeer, 2010).

## Manejo agroecológico de los herbívoros

Una manera en la que el MAP busca contrarrestar los efectos económicos de los herbívoros es mediante su control biológico. Éste se define como aquél servicio ecosistémico en el que mediante distintas técnicas se facilita que los depredadores, parasitoides o patógenos, naturales o exóticos, de ciertos herbívoros con potencial de convertirse en plagas mantengan a las poblaciones de éstos por debajo de un umbral, lo cual evita o reduce las pérdidas económicas de los agricultores (Miguel Angel Altieri, 1999; Bahena, 2008). Se estima que el 50-90% del control de las plagas en los cultivos del mundo se debe a este tipo de control, ya sea inducido por el agricultor o no (Pimentel, 2005). Los antecedentes históricos del control biológico aplicado tienen referentes en todo el mundo, *e.g.* en el año 1200 los chinos empleaban hormigas para controlar una plaga defoliadora de algunos cítricos o en 1888 cuando se introdujo en California a la catarinita *Rhodolia cardinalis* para contrarrestar el efecto de la escama algodonosa de los cítricos (Bahena, 2008).

Bahena (2008) menciona que las características ideales que un control biológico debe de tener son: alta especificidad, alta capacidad reproductiva, buena adaptabilidad, alta capacidad de búsqueda, densodependencia con la población de su presa, capacidad de sobrevivir aún en ausencia de ésta y facilidad para ser criados masivamente. Casi ningún organismo cumple con todos los puntos anteriormente citados; sin embargo, no suena descabellado que mediante el conocimiento tradicional y la teoría ecológica se diseñen asociaciones ecológicas de depredadores que pudieran cubrir varias características de dicho control ideal. Es importante mencionar que el control biológico no debería aplicarse de forma indiscriminada y sin una cuidadosa planeación. Martín y colaboradores (2013) encontraron en un experimento montado en Corea del Sur, que la complejidad del paisaje es un factor que puede contribuir a incrementar la abundancia y diversidad del banco de depredadores de una región y que esto puede promover la eficiencia del control biológico o reducirla, dependiendo de si estos organismos presentan interacciones de antagonismo, redundancia funcional, partición del nicho o facilitación. Lo anterior ejemplifica la necesidad de un mayor entendimiento de las interacciones existentes entre los controles y de éstos con su ambiente. En el caso del agroecosistema milpa, hace falta diseñar más experimentos cuyo fin sea discernir las relaciones existentes entre los organismos controles y sus presas, hospederos o competidores y de éstos con su entorno, considerando el efecto de la localidad y el tipo de agricultura que se esté implementando.

La restauración de la biodiversidad funcional en los agroecosistemas se ha visto como una medida que favorece la presencia de organismos control. Algunas técnicas mediante las que esto puede implementarse son (Bahena, 2008):

1. Diversificación espacial de los cultivos, *e.g.* cultivos de barrera, diseño en mosaico o franjas, implementación de policultivos, combinación de variedades resistentes con variedades tolerantes.
2. Diversificación temporal de los cultivos, *e.g.* rotación de cultivos, periodos de descanso o barbecho.
3. Promover la diversidad vegetal asociada dentro del área de cultivo o a su alrededor, *e.g.* implementación de sistemas agroforestales, facilitar el desarrollo de ciertas arvenses productoras de néctar o fijadoras de nitrógeno, implementación de cultivos de cobertura, entre otras medidas.
4. Realizar una o varias introducciones, dependiendo de la plaga en cuestión, de cierta cantidad de organismos control, tanto nativos como exóticos, mediante su adquisición o compra en criaderos y laboratorios.
5. Inocular o promover la presencia de organismos patógenos para las plagas de interés.

Estas medidas favorecen la presencia de organismos control y el que éstos cuenten con refugio, lugares para hibernar o nidificar y fuentes de alimento alternativas, ya sea porque la mayor diversidad vegetal atraiga una mayor diversidad de presas o por el hecho de que muchos controles son de hábitos omnívoros o polinizadores potenciales (Altieri et al., 1983; Bahena, 2008). De igual forma la presencia de artrópodos retribuye al agroecosistema al favorecer el reciclaje de nutrientes en el suelo por la mineralización que se da cuando éstos digieren la materia orgánica presente en éste o al promover mecánicamente la aireación del mismo, facilitar la infiltración o el enraizamiento, *e.g.* hormigas en cafetales de sombra (Vandermeer, 1992). Por su parte Poveda y colaboradores (2008) reportan que incluso pueden obtenerse incrementos en los rendimientos bajo la presencia de los herbívoros, siendo el caso en el cultivo de la papa andina bajo la influencia de la larva de la polilla guatemalteca de la papa. En el caso de la milpa, existen reportes de que el cultivo de maíz junto con frijol o haba y calabaza ha mostrado reducciones en las poblaciones de herbívoros como las chicharritas (*Empoasca* sp y *Dalbulus* sp), el crisomélido *Diabrotica balteata*, el barrenador del tallo *Diatraea lineolata* y el gusano cogollero *S. frugiperda* (Trujillo-Arriaga & Altieri, 1990). Es importante conocer los ciclos de vida de los herbívoros, sus posibles controles y la planta que se ve afectada, por lo que la colaboración de agroecólogos y agricultores es fundamental. Finalmente debe de recordarse que dentro del MAP existen otras alternativas auxiliares a las del control biológico (*e.g.* uso de semioquímicos como feromonas sexuales que confundan a los herbívoros (Alatorre Rosas et al., 2004), los bioinsecticidas como el extracto de tabaco o ajo, el control genético como el uso de biocontroles estériles y el control físico como las cubiertas de aislamiento o las trampas), pero que éstas deben de utilizarse sobre todo de manera preventiva (Bahena, 2008).

Todas estas interacciones entre los cultivos, sus herbívoros y los depredadores de éstos, los polinizadores, los nutrientes presentes en el suelo y los campesinos se dan al mismo tiempo dentro de un contexto climático muy variable dependiendo del lugar de México que se considere. A lo largo de todo su territorio pueden encontrarse diversas zonas ecológicas (*e.g.* árida y semiárida, tropical subhúmeda, templada subhúmeda, tropical húmeda, templada húmeda y alpina) y en todas éstas existe

algún tipo de sistema agrícola vinculado con el cultivo del maíz (Aguilar, J., Illsley, C., & Marielle, 2003). Estas condiciones afectan y han afectado naturalmente la implementación de la milpa, sin embargo los cambios actuales en la estabilidad de dichas condiciones y los cambios más drásticos que se prevean pueden repercutir negativamente en la vulnerabilidad de los agricultores. Esto puede darse mediante el aumento en la incidencia de las arvenses o los herbívoros debido al cambio de las condiciones climáticas o a cambios en los regímenes de lluvias (FAO, 2008). Debido a esto es que a continuación se esbozará brevemente el papel del clima como uno de los factores que afecta a los rendimientos de la milpa que se revisará en este trabajo.

## **El clima y sus variaciones**

En general las variables consideradas para definir al clima son: temperatura del aire, presión atmosférica y precipitación. La temperatura del aire está correlacionada positivamente con la cantidad de radiación solar que incide sobre la superficie terrestre y la mayor parte de esta energía se concentra en las regiones ecuatoriales y disminuye conforme la latitud aumenta (Tarbuck, Lutgens, & Pinzke, 2012). Por su parte la distribución de la humedad sigue un patrón similar al de la temperatura, siendo mayor en el ecuador y tendiendo a ser menor hacia los polos. Ambos factores se relacionan de tal manera que conforme aumenta la temperatura de un lugar también tienden a hacerlo así la tasa de evaporación y la capacidad del aire para retener humedad (Uriarte-Cantolla, 2003). Este aire más húmedo puede almacenar a su vez más energía calorífica proveniente de la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre por lo que se cae en un ciclo de retroalimentación positiva, que permite explicar el aumento de la temperatura ambiente en las regiones tropicales (Soden, Jackson, Ramaswamy, Schwarzkopf, & Huang, 2005).

Las nubes se forman cuando el agua se condensa en la atmósfera y los efectos que tienen sobre la temperatura ambiente pueden ser opuestos. Por un lado pueden incrementar el albedo de una región evitando que parte de la radiación solar llegue a la superficie terrestre, pero también pueden promover el efecto invernadero evitando que la radiación proveniente de la superficie terrestre escape hacia el espacio. El balance neto entre ambos efectos dependerá del tamaño de las gotas, de la nube en sí, su densidad, su espesor, su altura y su temperatura, sin embargo, se propone que dicho efecto neto tiende a ser más de enfriamiento que de calentamiento (L'Ecuyer, Wood, Haladay, Stephens, & Stackhouse, 2009). De manera general se tiene que en las regiones tropicales los estratocúmulos bajos característicos de la Zona de Convergencia Intertropical tienden a generar un enfriamiento, en los desiertos tropicales los cirros altos un calentamiento, en las latitudes medias las grandes coberturas nubosas asociadas a frentes de baja presión generan enfriamientos por el aumento del albedo, mientras que en los polos el efecto resultante es de calentamiento debido a que el albedo de la superficie terrestre suele ser mayor que el de la cubierta nubosa (Uriarte-Cantolla, 2003).

Considerando lo anterior y sabiendo que la cantidad y época en que se presentan las lluvias en un lugar dependerá de su latitud, altitud y continentalidad, puede generalizarse que en el hemisferio Norte las mayores precipitaciones ocurren en verano (Beck, Grieser, & Rudolf, 2005), situación que se cumple también en México. Parte de este fenómeno puede explicarse porque al aumentar la irradiancia solar durante los veranos se generan condiciones de baja presión continental que atraen a los vientos cargados de humedad provenientes del océano (Oki & Kanae, 2006). Esto aumenta la humedad y la temperatura ambiental, satura la capacidad de retención de agua del aire, esta agua se condensa, se

forman nubes y al bajar la temperatura aumenta la presión atmosférica, baja la capacidad de retención hídrica del aire y como consecuencia llueve, graniza o neva. En contraparte al disminuir la irradiancia, se generan condiciones de alta presión que disminuyen la cantidad de humedad que ingresa al continente y puede formar nubes de lluvia.

Este análisis del clima sirve para realizar una descripción global del patrón de lluvias que la región mesoamericana cercana al trópico de Capricornio debería de tener. Sin embargo, si se considera una escala de variación no decadal sino interanual, los movimientos en los patrones de lluvia y de sequía repercuten seriamente en aspectos económicos y de seguridad alimentaria para las familias ligadas a la actividad agrícola. En este sentido el cambio climático parece representar una amenaza a distintos niveles dependiendo de la región que se analice, Altieri y Nichols (2009) aclaran a grandes rasgos que de todo el mundo las regiones tropicales serán las que más seriamente afectadas se verán, presentándose aumentos en la cantidad e intensidad de lluvias en las regiones costeras y acentuándose las sequías en las regiones semiáridas, áridas o templadas. Debido a lo anterior en este trabajo se modelará la influencia de la sequía en el desempeño y vulnerabilidad de los cultivos, ya que la mitad del territorio de México corresponde a climas áridos o semiáridos y en conjunto con la zona templada representa a la mayoría de las tierras donde se implementa alguna versión de milpa (Aguilar, J., Illsley, C., & Marielle, 2003).

Esta dinámica climática junto con los elementos bióticos y de manejo antes mencionados constituyen el sistema objeto de estudio de este trabajo, el cual definimos como milpa. Con el fin de modelarlo se recurrirá a las herramientas de los sistemas complejos. A continuación se enmarca a la milpa dentro del contexto de las ciencias de la complejidad con el fin de entender por qué es un sistema complejo y cómo la sistematización del conocimiento disponible desde este formalismo pudo permitir la construcción de un modelo cualitativo de la milpa.

## La milpa como un sistema complejo

“Si alguien se pusiera a analizar las nociones y muletillas de moda hoy por hoy, en la lista aparecería [la palabra] sistemas entre los primeros lugares”. Esta afirmación hecha por el biólogo Ludwig Von Bertalanfy (1965) es la oración introductoria de su libro “Teoría General de los Sistemas” y probablemente podría actualizarse añadiendo el calificativo de complejos. Este tipo de sistemas representan el objeto de estudio de las llamadas, valga la redundancia, ciencias de la complejidad. Dichas ciencias se enfocan en el estudio de aquellos sistemas de mesoescala caracterizados por decenas, cientos o miles de interacciones y utilizan distintas herramientas de análisis cuantitativo y cualitativo íntimamente ligadas al uso de la experimentación *in silico*<sup>2</sup>. Sin embargo, ¿qué es un sistema complejo? o ¿cómo puede ser caracterizado?

Holland planteó en 1995 una lista de siete propiedades comunes a todos los sistemas [complejos adaptativos], no obstante, no existía en ese entonces un método general para su estudio, por lo que dichas propiedades sentaron las bases de una teoría que, en parte, buscó generar dicho método. Catorce años después, Mitchell (2009), reafirmó esta idea sintetizándola en tres propiedades y le añadió la necesidad del trabajo interdisciplinario como elementos esenciales para poder estudiar a los sistemas complejos. Es importante aclarar que de aquí en adelante se manejará el término sistemas complejos

2 Utilizando simulaciones computacionales.

adaptativos, utilizado por Holland, como equivalente al de sistemas complejos, empleado por Mitchell.

Bajo esta definición, los sistemas complejos están compuestos por agentes (o agentes adaptables). Un agente se caracteriza por operar dentro del sistema a partir de una serie de reglas de la siguiente forma:

$$\textit{Si estímulo entonces respuesta}$$

$$E \Rightarrow R$$

Estas reglas se definen a partir de la información disponible sobre cada agente y representan abstracciones que no pretenden emular en su totalidad al sistema real sino rescatar una parte de su comportamiento y en consecuencia algunas de sus propiedades. Esto implica que si se determina un conjunto de reglas en contextos diferentes es posible que observemos propiedades distintas del mismo sistema (Holland, 1995). Un conjunto de estos agentes adaptables genera lo que Holland llama agente agregado, el cual exhibe propiedades que no siempre pueden deducirse o comprenderse a partir de los agentes individuales. Esta característica casi imposible de abordar en términos cuantitativos puede volverse solo difícil si aceptamos tener una visión cualitativa de las variables de un sistema. Lo anterior no está exento de complicaciones técnicas o limitaciones conceptuales, sin embargo, permite construir modelos teóricos de sistemas antes pensados como imposibles de matematizar, ya fuera porque la disciplina que lo estudiaba no conocía los desarrollos matemáticos o computacionales del momento o porque los desarrollos no habían sido ensamblados con el objetivo de abordar ese tipo de problemas.

La milpa es un sistema agroecológico compuesto por distintos elementos o grupos de elementos que pueden modelarse como agentes individuales y constituir subsistemas que constituyan meta-agentes que a su vez constituyan al meta-agente milpa. Con el fin de justificar la afirmación anterior a continuación, en la Tabla 2, se describe cómo el sistema milpa puede ser considerado un sistema complejo de acuerdo a con las propiedades requeridas por Holland y por Mitchell.

Tabla 2: La milpa como un sistema complejo de acuerdo con Holland y con Mitchell

<b>Propiedad según Holland (1995)</b>	<b>Definición de la propiedad</b>	<b>¿Cómo la milpa cumple esta propiedad?</b>
<i>Agregación</i>	Definir una propiedad de agregación es equivalente a definir un predicado lógico que sirva para evaluar elementos de un “Universo” y determinar su pertenencia o exclusión a un conjunto o sistema. Esta acción nos permite tratar a los agentes que hagan verdadero al predicado evaluado como elementos equivalentes y pertenecientes al sistema o meta-agente.	En el caso de la milpa tiene que definirse un tipo de interacción que vuelva equivalentes a los nodos y permita modelarlos como parte de un mismo sistema. Esta interacción puede ser definida en términos de la temporalidad con la que suelen darse los procesos ecológicos, de manejo y climáticos alrededor de la milpa.
<i>Etiquetado de sus componentes</i>	En la naturaleza, la subselección y agregación de agentes individuales	La milpa como agroecosistema está constituida por los cultivos y la biota

	<p>procedentes de un “Universo” de posibilidades no es efectuada por un modelador, sino que se trata de un comportamiento usualmente motivado por los agentes mismos. Esto surge debido a su capacidad de interactuar y reconocer en su entorno a aquellos agentes que cuentan con el “etiquetado” adecuado. Esta propiedad es la que permite que la agregación emerja y en una segunda instancia que, gracias a dicha agregación, pueda observarse la emergencia de propiedades.</p>	<p>asociada, los cuales interactúan y puede decirse que se reconocen como parte de un sistema ecológico. El ser humano y su influencia sobre los elementos de la milpa sugiere también un reconocimiento de los elementos que maneja. En el caso del clima aunque éste no recibe interacciones directas por parte de los elementos de la milpa, sí determina que el temporal pueda darse y que los cultivos al reconocer estas condiciones comiencen a crecer.</p>
<i>No linealidad</i>	<p>En matemáticas la característica de no linealidad suele definirse como “aquello que no es lineal”, o en otras palabras como la incapacidad de descomponer al todo como una combinación lineal de las partes.</p>	<p>Dentro de la milpa se dan dinámicas no lineales de tipo depredador-presa, competencia y facilitación. Asimismo los compuestos y manejos practicados se llevan a cabo sobre una cierta unidad de área en una intensidad que no obedece necesariamente una relación lineal. Por otra parte el contexto climático está compuesto por variables que típicamente forman parte de modelos no lineales.</p>
<i>Flujos</i>	<p>El concepto de flujo implica “la existencia de algo que fluye (recurso), la vía física o conceptual a través de la que lo hace (el conector o arista) y los emisores y receptores entre los que viaja (nodos)”. En otras palabras, el concepto de flujo induce una red que representa al meta-agente o agente agregado y en la que los nodos son los agentes individuales y los conectores determinan las reglas de interacción entre los mismos.</p>	<p>Los flujos en la milpa y en general en cualquier ecosistema pueden interpretarse como flujos de energía entre los distintos niveles tróficos, los biocidas sobre los organismos, el clima sobre todos los elementos, etc. Estos flujos son representados explícitamente en los modelos mediante el establecimiento de ciertas aristas y sus especificaciones.</p>
<i>Diversidad</i>	<p>Dado un meta-agente debe de observarse a su interior una variedad de procesos y redundancia de los mecanismos para llevarlos a cabo.</p>	<p>El sistema milpa conjunta diversos subsistemas en los que se llevan a cabo distintos procesos y ciclajes. La redundancia de los mismos puede observarse al considerar que no sólo los cultivos son fuente de alimento para el humano y los herbívoros, o en que el uso</p>

		de insecticida es similar al efecto que tienen los depredadores de los herbívoros sobre éstos.
<i>Modelos internos</i>	Este punto hace referencia a la capacidad de anticipación como una propiedad distintiva de los sistemas complejos. Esta anticipación recurre a una memoria y dicha memoria está constituida por una serie de reglas y propiedades que le permiten al sistema generar lo que él denomina como modelos internos. Los modelos son contruidos al interior del sistema a partir de la eliminación de detalles particulares y esto se ve reflejado en la agregación diferencial de los agentes individuales con el fin de responder a los estímulos externos.	En el caso de el agrosistema milpa la anticipación o creación de modelos internos está dada por la genética de los organismos, también por la planeación que el agricultor realiza respecto a la siembra y al manejo de las arvenses y herbívoros. La adaptación por parte de éstos últimos hacia el herbicida o insecticida implementado, es otro ejemplo.
<i>Bloques de construcción</i>	La identificación de los bloques de construcción representa, en palabras de Holland, “la mejor técnica [con la que contamos] para avanzar en la construcción de modelo alguno”. En un sentido más abstracto, un tipo fundamental de bloque de construcción que vale la pena definir de manera precisa es el de los nodos/elementos/agentes que pertenecen a una gráfica/sistema/meta-agente, otro tipo sería el de las relaciones entre los mismos, mas vale la pena notar que ambas definiciones no son ajenas una de otra y que esclarecer una nos permitirá precisar la otra.	Los elementos y subsistemas que componen al sistema milpa, representan explícitamente sus bloques de construcción.
<b>Propiedades según Mitchell (2009)</b>	<b>Definición de la propiedad</b>	<b>¿Cómo la milpa cumple esta propiedad?</b>
---	El número de entidades (variables) que constituyen al sistema es demasiado grande como para construir una expresión analítica que permita estudiar la dinámica de su	El sistema milpa está constituido por un gran número de variables. Sin embargo, en este trabajo se utilizan solamente 23. No obstante, este número es lo suficientemente grande como para

	comportamiento (una ecuación diferencial), pero al mismo tiempo no es tan grande como para extraer una serie de mediciones que en promedio permitan definir características estadísticas del sistema.	convertir a cualquier expresión que pretenda estimar 23 parámetros en un reto computacional y matemático. Por otra parte estos componentes no son tan homogéneos ni indistinguibles como para hacer estadística sobre sus variaciones.
---	Las entidades o partes del sistema interactúan de manera no lineal entre sí, por lo que no puede reconstruirse una dinámica aditiva a partir de las interacciones pareadas de las mismas y usualmente suelen obtenerse comportamientos caóticos.	Ver propiedad de no linealidad de Holland.
---	Como consecuencia de las dos características anteriores el sistema en su totalidad tiende a exhibir comportamientos o patrones ordenados conocidos como propiedades emergentes que no podrían ser reconstruidas a partir de la descripción o entendimiento de las interacciones pareadas de sus entidades constitutivas.	El ensamblaje de los distintos subsistemas que constituyen a la milpa refleja ciclos y dinámicas que no pueden inferirse a partir del análisis por separado de su comportamiento. Por ejemplo, el ciclo climático tiene sentido en sí mismo, mientras que el ciclo depredador-presa entre herbívoros y sus controles también lo tiene. Sin embargo, al momento de juntar a ambos con la dinámica de los cultivos y su manejo promovida por el campesino, se tienen escenarios de cosecha, incidencia de herbívoros, etc. Situación que no podía deducirse de la observación por separado de los dos subsistemas mencionados.

## Herramientas para el estudio de los sistemas complejos

Considerando al sistema milpa como un sistema complejo, ahora se hablará sobre algunas herramientas empleadas para el estudio de este tipo de sistemas. En particular se hará hincapié en un tipo de modelos conocido como redes booleanas. Éste fue el tipo de formalismo que se empleó en este trabajo y permite: construir implementaciones computacionales, utilizar información cualitativa o cuantitativa para definir y establecer las relaciones entre los elementos del sistema, generar resultados fácilmente traducibles al lenguaje coloquial, ser modificado de manera sencilla mediante la adición o eliminación de información (István Albert, Thakar, Li, Zhang, & Albert, 2008; Alon, 2006; Saadatpour & Albert, 2013). Posteriormente se mencionarán algunos antecedentes de trabajos y estudios en donde se le ha dado uso a este tipo de modelos en otras áreas y se discutirán las implicaciones que ha tenido dicho uso con respecto a los resultados obtenidos.

Jorge Luis Borges (1944) plantea en su cuento “Funes, el memorioso” la siguiente frase: “pensar es olvidar diferencias, es generalizar, abstraer”. En dicho cuento se destaca la habilidad del protagonista de recordar y conocer todo y, curiosamente, su consecuente incapacidad de aprender. Los modelos, cualesquiera que éstos sean, pretenden permitirnos observar distintas propiedades de algún fenómeno a partir del olvido de algunos de sus elementos o relaciones y el resalte de otras. Levins (1966) refina esta idea añadiéndole un componente de *tradeoff* inherente a la acción de modelar, el cual oscila entre tres conceptos: generalidad, precisión y realismo. Los distintos tipos de modelos en matemáticas suelen presentar dos de estas tres características.

Aquellos modelos reales y precisos son modelos que suelen representar casos particulares, cuentan con datos experimentales y son capaces de generar predicciones cuantitativas contrastables con el comportamiento del fenómeno en cuestión (e.g. García-Barrios, Mayer-Foulkes, Franco, Urquijo-Vásquez, & Franco-Pérez, 2001). Los modelos generales y precisos emplean expresiones analíticas para generar predicciones cuantitativas sobre algún sistema, suelen reflejar principios generales, ejemplos de este tipo de modelos son los sistemas Lotka-Volterra o las ecuaciones que describen la ley de la gravitación de Newton. Finalmente, los modelos generales y reales, suelen ser modelos de tipo cualitativo, no buscan generar una predicción cuantitativa precisa sino tratan de rescatar comportamientos generales de sistemas reales para generar inferencias cualitativas sobre los mismos (e.g. Levins, 1966; MacArthur, 1955; R. M. May, 1971; Vandermeer, 1970).

Seguido de esto puede construirse el siguiente cuestionamiento: ¿con qué tipo de modelo puede o debe estudiarse la dinámica agroecológica de la milpa?, sin embargo, para contestarlo vale la pena también realizar éste: ¿qué se quiere aprender de la milpa?. La diferencia entre contestar primero uno u otro cuestionamiento marcará una fuerte tendencia en lo que se podrá conocer sobre un sistema, ya que si elegimos el tipo de modelo de manera *a priori* restringiremos el espacio de respuestas de nuestra pregunta de investigación y, por el otro lado, si planteamos primero nuestra pregunta puede que nos topemos con que no conocemos o dominamos las herramientas que deberían de utilizarse para responderla. Debido a la naturaleza de los sistemas complejos, los modelos precisos, ya sean también reales o generales, suelen ser poco prácticos por los comportamientos no lineales característicos de los sistemas complejos. En este trabajo se utilizará lo que en la clasificación de Levins sería un modelo general y real, las redes booleanas.

## Redes booleanas

Una red es, en su versión más simple, una colección de puntos unidos en pares por líneas. A estos puntos se les conoce como vértices, nodos, conceptos o elementos y a las líneas como aristas, arcos, enlaces o relaciones. En este trabajo se utilizarán las acepciones de nodo y arista. Muchos fenómenos pueden ser representados como redes y el hacerlo así puede revelar propiedades interesantes sobre ellos. Formalmente hablando, las redes son gráficas y la teoría de gráficas tiene su origen con Euler en el siglo XVIII, sin embargo, no es sino hasta mediados del siglo XX que con el desarrollo de las herramientas informáticas y computacionales su uso como instrumento de modelación cobró una importancia considerable, esto debido en gran medida a su versatilidad para describir casi cualquier fenómeno a partir de su capacidad de incorporar parte de la información relacional existente entre sus

partes (Newman, 2010).

Un tipo de modelo de redes muy empleado en biología y otras disciplinas son las redes booleanas (Greil, 2009). Se trata de un tipo de sistema dinámico discreto conocido como autómatas celulares en el que tanto la variable independiente (usualmente el tiempo) como la dependiente (el estado de la red) son discretas (Gershenson, 2002). Las redes booleanas son gráficas dirigidas cuyos nodos representan elementos de un sistema, sus aristas representan relaciones de regulación entre los mismos y todo nodo puede encontrarse en alguno de dos estados: inactivo (0) o activo (1) (István Albert et al., 2008; Saadatpour, Albert, & Albert, 2010). Este tipo de modelos fue introducido al estudio de los sistemas biológicos por Kauffman (1969) y Thomas (1973) con el fin de modelar redes de regulación genética. Un aspecto característico de estas redes es que las interacciones (aristas) entre los genes (nodos) son establecidas de manera aleatoria, *i.e.* la construcción de las funciones de regulación o funciones lógicas que determinan el estado de cada nodo dentro de la red es un proceso combinatorio que sucede de acuerdo con una distribución de probabilidad uniforme (Saadatpour & Albert, 2013). Este mecanismo de construcción resultó particularmente útil para explorar estadísticamente las propiedades de éste y otros sistemas biológicos, como las redes de señalización proteica (*e.g.* vías metabólicas) o las de interacción celular (*e.g.* propagación de una enfermedad en un sistema vivo) (Greil, 2009). Sin embargo, se ha observado que de existir información disponible en la literatura esta aproximación estocástica puede dejarse de lado, y puede construirse un modelo lógico a partir de dicha información para evaluar cualitativamente otros aspectos del sistema. Ejemplos de ambos protocolos de modelación pueden encontrarse en varios trabajos (István Albert, Thakar, Li, Zhang, & Albert, 2008; Alon, 2006; Álvarez-Buylla et al., 2008; Benítez & Álvarez-Buylla, 2010; Benítez, Espinosa-Soto, Padilla-Longoria, & Álvarez-Buylla, 2008; Thakar & Albert, 2010).

Un aspecto fundamental de los sistemas dinámicos discretos radica en la existencia y aplicación reiterativa de una función de transferencia. Dicha acción es conocida como iteración y se caracteriza por tomar un estado del sistema, aplicarle dicha función y generar un nuevo estado susceptible de ser objeto de este mismo procedimiento. En el caso de las redes booleanas, los distintos estados que la red irá tomando en cada instante temporal son vectores binarios en donde cada entrada representa el estado de activación de cada nodo. Los cambios en dichos estados dependen de una función de transferencia o modelo lógico del sistema, el cual está constituido por el conjunto de las funciones regulatorias de cada nodo. Estas funciones individuales básicamente son proposiciones lógicas conformadas en el caso más simple por los operadores lógicos de negación ( $No\ A = \neg A$ ), conjunción ( $A\ y\ B = A \wedge B$ ) y disyunción ( $A\ o\ B = A \vee B$ ), determinando así el que un nodo permanezca o cambie de estado. Esta actualización de los estados a partir de las funciones lógicas puede darse de manera sincrónica, actualizando el estado de todos los nodos en una sola iteración, o asincrónica, no haciendo lo anterior, en este trabajo se trabajará bajo el primer esquema. Es importante mencionar que la teoría matemática que rige el cómo operan las proposiciones lógicas es conocida como álgebra booleana y la que rige los cambios de iteración a iteración, lógica temporal lineal. Para conocer con mayor detalle lo anterior puede consultarse las fuentes originales de Boole (1847) y Pnueli (1977), algunos trabajos más recientes para abordar esto dentro de un contexto biológico (Alon, 2006; Saadatpour & Albert, 2013).

Una posible ventaja que representa trabajar con este tipo de modelos es que una red booleana con  $N$  nodos tendrá  $2^N$  posibles estados, es decir, el espacio de estados del sistema es finito y por lo tanto la dinámica de dicho sistema siempre convergerá a un estado estable, referido en este trabajo también

como escenario estable (István Albert, Thakar, Li, Zhang, & Albert, 2008; Saadatpour, Albert, & Albert, 2010). Un estado o escenario estable de una red booleana se define como la secuencia ordenada de  $k$  estados que una red va adquiriendo como parte de su dinámica y que al llegar al estado  $k+1$  vuelve a visitar el estado  $1$  de dicha secuencia. Se dice entonces que el sistema ha llegado a un estado estable o ciclo de periodo  $k$ . Cada uno de estos escenarios posee lo que se conoce como cuenca de atracción, ésta está constituida por el conjunto de estados iniciales de la red que llevan a dicho estado y puede decirse que mientras mayor sea el número de estados en la cuenca de un escenario particular, mayor será la probabilidad de que el sistema llegue a éste si se elige un estado inicial al azar.

Los escenarios estables que alcance una red booleana dependerán en gran medida del tipo de actualización que se le dé a las funciones regulatorias durante cada iteración, pudiendo ser ésta de dos tipos como ya se mencionó: sincrónica o asincrónica. La actualización asincrónica de las funciones lógicas es un protocolo que se ha adoptado en el contexto molecular y genético bajo el supuesto de que no todas las interacciones de un sistema se dan a la misma velocidad ni en el mismo momento, en consecuencia este esquema de actualización tiende a conservar los escenarios estables obtenidos bajo un esquema sincrónico y añade nuevos (Alon, 2006). Por su parte la actualización sincrónica es un supuesto que apela a que las diferentes asincronías pueden verse “canceladas” o “anuladas” y en consecuencia, que este esquema genera una especie de comportamiento promedio de las dinámicas asincrónicas posibles. Por otra parte se tienen también las dinámicas deterministas y estocásticas, las primeras como su nombre lo indican nos garantizan que partiendo de un mismo estado cualquiera siempre seremos capaces de reproducir la dinámica del sistema tanto mediante un esquema de actualización sincrónico como asincrónico. En cambio, el esquema estocástico nos provee de cierto dinamismo y variación al momento de explorar nuevas trayectorias dentro del espacio finito de posibles estados del sistema y se sugiere que representa un buen método para añadirle variabilidad a las cuencas de atracción que permitan comparar las vulnerabilidades asociadas a cada escenario.

La estabilidad de estos escenarios estables radica en que una vez alcanzados la dinámica de la red dejará de explorar aquellos estados fuera de éstos, sin embargo, esto no quiere decir que su dinámica interna esté exenta de oscilaciones que parecieran “inestables” dentro del contexto del sistema modelado. Es importante tener en cuenta lo anterior al momento de modelar a los ecosistemas con estas herramientas y generar conclusiones, ya que un escenario estable puede presentar fuertes fluctuaciones en su riqueza, incluso desapareciendo especies, o de igual manera escenarios estables en donde ocurra lo contrario, *i.e.* estabilidad dentro y fuera del equilibrio (Mccann, 2000). En este trabajo se utilizará la palabra estabilidad en el sentido estricto que define a un escenario estable. Por lo tanto la estabilidad no será un concepto restringido a la idea del mantenimiento de la estructura y densidades poblacionales de una comunidad biológica, sino a dinámicas que se mantengan a lo largo del tiempo de manera cíclica pese a implicar la desaparición periódica o permanente de las especies.

## **Modelación dinámica de redes ecológicas**

El uso de redes para modelar sistemas ecológicos es un área que actualmente cuenta con un amplio ímpetu de desarrollo, ya que los fenómenos que pretenden abordarse suelen involucrar un gran número de variables y carecer de mediciones cuantitativas comparables (Pascual & Dunne, 2006). Las redes en ecología comenzaron a utilizarse como diagramas que buscaban mostrar las relaciones tróficas presentes entre los organismos de un ecosistema, dichas relaciones se establecían representando el flujo

de la energía dentro de éste y permitían esquematizar las distintas topologías de jerarquización que los distinguía (Pascual & Dunne, 2006). Este enfoque se caracterizó por permanecer como meramente demostrativo y esquemático hasta que se comenzaron a realizar trabajos sobre el flujo de energía entre los distintos niveles tróficos. Sin embargo, la implementación de una dinámica temporal de la red permaneció relativamente inexplorada. En 1970, Robert May propone un modelo dinámico de una comunidad ecológica teórica a partir de una red aleatoria. Para la construcción de ésta consideró la dirección (el signo) de todos los tipos posibles de interacciones ecológicas pareadas pero obvió su magnitud y la abundancia de las especies. Construyendo la matriz asociada a dicha gráfica y realizando un análisis cualitativo de su dinámica y la evaluación de posibles escenarios, May formuló varias propuestas e hipótesis acerca de la dinámica del sistema así como las características que debía de tener una red para converger hacia algún estado estable. Varias de estas conclusiones pudieron o no tener algún sentido biológico, no obstante, una de ellas generó una amplia controversia que aún permea hasta el día de hoy: "... la complejidad de la riqueza trófica y la diversidad de distintos tipos de interacciones entre especies no conducen a la estabilidad cualitativa..."(R. May, 1973). Hoy en día esta conclusión ha sido contextualizada y pese a que matemáticamente es correcta, varios de los supuestos de los que parte no se cumplen en todos los sistemas naturales (*e.g.* la distribución de las interacciones ecológicas no es aleatoria, sino libre de escala o exponencial truncada (Pascual & Dunne, 2006)), pero, se trata de un modelo general y preciso que permitió junto con otros estudios (*e.g.* Levins, 1966; Pimm, 1979; Rosenzweig & MacArthur, 1963; Vandermeer, 1972) sentar las bases de una aproximación matematizada hacia este tipo de preguntas ecológicas. Dicha aproximación ha rendido frutos pero también ha presentado dificultades troncales, como la homologación de lenguajes, mas este es el caso de todas las disciplinas que intentan matematizarse. Es probable incluso que la controversia originada por la idea de May se debiera más a una falta de comunicación entre las matemáticas y la biología que a un choque de argumentos contrarios.

Con el fin de no contribuir a lo anterior, a continuación se aclarará la definición de algunos conceptos empleados en este trabajo y que suelen aparecer en el contexto de la modelación dinámica de sistemas ecológicos. Estos conceptos son: riqueza, estabilidad, permanencia y riesgo relativo o vulnerabilidad.

- Riqueza: medida de la cantidad de elementos diferentes o interacciones diferentes dentro de un sistema. En el caso de este trabajo, debido a la naturaleza booleana de los elementos del sistema no se tendrán medidas de riqueza ponderadas (diversidad) sino solo conteos del total de tipos de elementos en un sistema, *e.g.* en el caso de los cultivos esta medida equivaldría a la variable riqueza.
- Estabilidad: ver último párrafo del apartado Redes booleanas.
- Permanencia: de acuerdo con Hutson y Schmitt (1992) la definen de la siguiente manera. Dada una dinámica para una comunidad biológica, se define a la permanencia como una medida del nivel en el que una riqueza inicial (una especie o grupo de especies) se mantiene como parte de la dinámica habitual del sistema o de manera posterior a una perturbación. Este concepto será retomado más adelante, ya que constituye la base de la variable de respuesta medida en el mismo. Dicha definición se presenta adaptada y desglosada al tipo de sistema dinámico que se maneja en este trabajo en las secciones de Permanencia individual y Permanencia conjunta.

- Riesgo relativo o vulnerabilidad: se define así al coeficiente de variación calculado entre una cantidad promedio y su desviación estándar (ver sección Riesgo relativo o vulnerabilidad para una definición más detallada en el contexto de este trabajo). Esta medida es una herramienta de comparación entre desempeños de variables que, por su naturaleza porcentual, vuelve dicha comparación realizable sin importar las escalas numéricas que las caractericen. En el contexto de la modelación de los agroecosistemas se utilizará a esta cantidad como el indicador de la vulnerabilidad asociada a la permanencia de los cultivos implementados respecto a las distintas perturbaciones evaluadas.

Habiendo definido los conceptos anteriores de acuerdo al uso que se les dará en este estudio solo queda mencionar que, aunque en ecología la mayor parte de las redes empleadas como herramienta de modelación son de tipo diferente al booleano, las redes booleanas representan un tipo de modelo dinámico destacable por su potencial como herramientas de análisis cualitativo a partir de información no estructurada. Esto junto con el hecho de que han sido empleadas exitosamente para modelar otro tipo de sistemas complejos, sugieren que su uso en otras áreas puede traer nuevos aprendizajes y la consecuente construcción de protocolos de experimentación *in silico* antes no implementados. Ahora bien, ¿hasta qué punto las redes booleanas son capaces de rescatar la complejidad de un sistema agroecológico? o mejor dicho, ¿qué propiedades rescatarán este tipo de modelos?, son preguntas cuyas respuestas serán abordadas, al menos en parte, mediante la realización de este estudio. Es por esto que en este trabajo se plantea su uso como una herramienta para sistematizar el conocimiento disponible alrededor de la implementación de la milpa, simular su dinámica bajo distintos contextos y evaluar el desempeño de las permanencias de los cultivos así como la vulnerabilidad asociada a cada tratamiento.

# Hipótesis

Los modelos de agroecosistemas tipo milpa con un manejo menos intervenido y mayor riqueza de cultivos presentarán mayores permanencias (específicas y conjuntas) y un menor riesgo relativo asociado en comparación con aquellos que presenten una menor riqueza y un manejo más intervenido ante distintos tipos de perturbaciones.

# Objetivos

1. Integrar en un modelo dinámico cualitativo la información disponible del agroecosistema milpa mediante la construcción de una red booleana a partir de la revisión de la literatura.
2. Explorar distintos escenarios de riqueza de cultivos y tipos de manejo a partir de la dinámica de la red mediante la construcción de una implementación computacional.
3. Evaluar, a partir de un protocolo de experimentación *in silico*, los comportamientos de la permanencia de la agrocomunidad ante distintas perturbaciones (competencia con arvenses, influencia de herbívoros y cambios en el patrón de lluvias), así como, la vulnerabilidad asociada a los diferentes tipos de de manejo.

# Métodos

## Conocimiento del sistema y construcción del modelo booleano

En este trabajo se construyó una red booleana para modelar la dinámica ecológica del agroecosistema milpa a lo largo del tiempo. Con el fin de definir a los elementos del sistema y sus interacciones, la primera parte del trabajo consistió en la revisión de la literatura existente sobre distintos aspectos relacionados con la milpa (*e.g.* su implementación, diversidad de cultivos, importancia cultural, entre otros) y de algunas visitas a distintas milpas y conversaciones informales con campesinos de los estados de Sinaloa, Chiapas, Tlaxcala, Oaxaca y Michoacán. La mayor parte de la información correspondiente a los medios de implementación de la milpa provino de tesis de pregrado y posgrado de la Universidad Autónoma de Chapingo (UACH), el Colegio de Posgraduados (COLPOS), el Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México (IB-UNAM) y el Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES-UNAM), entre otras instituciones. Se revisaron éstos y otros documentos y en conjunto con la experiencia adquirida durante las visitas a campo se generó un conocimiento mínimo del sistema a partir del cual surgió una abstracción del mismo (para una mención detallada de la bibliografía empleada consultar la Tabla 5 en el Anexo 1).

Se definió una propiedad de agregación y consecuentemente pudieron delimitarse tanto a los nodos como a sus aristas o interacciones. La elección de los nodos no fue un proceso trivial, sin embargo, éste se vio facilitado por los trabajos de Basurto (1982, 2000b) y González-Rodríguez (2014), los cuales funcionaron como una guía sobre el tipo de dinámicas que deseaban reproducirse y en consecuencia el tipo de nodos que debían definirse. En cuanto a sus interacciones, éstas tomaron el papel de relación causal o implicación lógica de la forma  $A_t \Rightarrow B_{t+1}$  (el nodo  $A$  al tiempo  $t$  regula el estado de el nodo  $B$  al tiempo  $t+1$ ), adquiriendo entonces un significado en función del par de nodos relacionados, *i.e.* podían representar desde la acción de los depredadores alimentándose de los herbívoros o la del maíz joven dando origen al maíz adulto. Ahora bien, un mismo nodo podía estar regulado por  $k$  otros de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} A_t^0 &\Rightarrow B_{t+1} \\ A_t^1 &\Rightarrow B_{t+1} \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ A_t^k &\Rightarrow B_{t+1} \end{aligned}$$

Para construir la función regulatoria del nodo  $B$  se condensó a todos los nodos reguladores en un mismo antecedente relacionándolos entre sí mediante los operadores lógicos de conjunción, disyunción y negación, obteniéndose funciones de la siguiente forma:

$$(A_t^0 \wedge A_t^1) \dots \vee \neg A_t^k \Rightarrow B_{t+1}$$

Haciendo esto para cada nodo se construyó su función de transferencia o modelo lógico del sistema<sup>3</sup>. Los resultados de esta construcción tanto para los nodos como para sus aristas pueden observarse en la sección 1. Modelo booleano de la milpa

## Definición de tratamientos a evaluar

De manera paralela a la construcción del modelo de red de la milpa se determinaron las variables predictivas a controlar. Como se indica en la hipótesis, dichas combinaciones de variables buscan modelar distintos esquemas de riqueza de cultivos bajo distintos niveles de intervención ante distintos escenarios de perturbación. Estas variables fueron:

- Riqueza: esta variable consiste de cinco esquemas de mono y policultivo que representan un gradiente de simplificación de especies. Niveles: Maíz-Frijol-Calabaza, Maíz-Frijol, Maíz-Calabaza, Monocultivo de Maíz y Monocultivo de Calabaza. La implementación de esto en el modelo se realizó mediante el silenciamiento de los nodos adecuados, *e.g.* en las redes donde se modelaba el monocultivo de calabaza se fijaba el estado de activación de los nodos correspondientes al maíz y frijol enredador en cero.
- Manejo: en esta variable se buscó representar cuatro maneras diferentes de responder a las arvenses o a los herbívoros. Es importante aclarar que ninguno de los agroquímicos referidos es de algún tipo en específico (*e.g.* orgánico o sintético)<sup>4</sup>. Niveles: Desyerbe, Desyerbe-Insecticida, Herbicida, Herbicida-Insecticida. La aplicación de estos manejos como parte del modelo se realizó fijando en cero el estado de activación de los nodos adecuados, *e.g.* en el caso del manejo en el que se aplicaba únicamente desyerbe manual se fijó en cero el estado de los nodos correspondientes a la aplicación del herbicida o el insecticida.

Por su parte las variables de perturbación correspondieron a tres tipos de eventos que suelen afectar a la milpa:

- Incidencia de arvenses: esta perturbación hace referencia al efecto que puede tener la presencia de los quelites y la vegetación asociada dentro de la parcela en momentos donde no se les desea.
- Incidencia de herbívoros: este escenario simula el la aparición fuera de tiempo de aquellos organismos con potencial de afectar los rendimientos de los cultivos al alimentarse de éstos.
- Cambios en el patrón de lluvias tendientes a la sequía: como su nombre lo indica en este escenario se simula la falta de lluvias en momentos en los que deberían presentarse.

---

3 Para simplificar la construcción del modelo lógico y sobre todo garantizar su completez se utilizó un supuesto utilizado por otros protocolos de modelación de redes booleanas, *BoolNet* (ETC, 2009) y *BooleanNet* (R, 2017), se consideró que si existía literatura para justificar  $A_t \Rightarrow B_{t+1}$ , entonces en el modelo se consideraría válido

$\neg A_t \Rightarrow \neg B_{t+1}$ . Este supuesto se adoptó debido a que la implementación desarrollada para el estudio del modelo caía en ambigüedades o proposiciones indecidibles, si esto no se hacía así.

4 El modelo que se construyó no nos permite rescatar los fenómenos o la escala temporal en la que los agroquímicos no orgánicos pueden tener efectos negativos en el agroecosistema, el cual puede ser de varios años o décadas. Debido a esto solo se considerará el efecto que los biocidas pueden tener sobre insectos y arvenses como un depredador más.

Estos tres tipos de perturbación fueron simulados en cinco valores de intensidad (0, 0.1, 0.14, 0.25, 0.5) para cada combinación Riqueza-Manejo. La implementación de éstas consistió en que, por ejemplo, si se estaban simulando tratamientos bajo un escenario de sequía esto se traducía en permitir que con una cierta probabilidad de error (nivel de la perturbación) el nodo precipitación pudiera permanecer en estado de activación apagado cuando debería de estar encendido. En el caso de las arvenses la perturbación se manejó favorable hacia la aparición de vegetación asociada al interior de la parcela cuando estos nodos deberían de estar en estado inactivo. Mientras que para modelar la influencia de los herbívoros se hizo lo mismo que para las arvenses pero respecto al nodo correspondiente a herbívoros. Estas probabilidades de error podían ocurrir de manera independiente entre iteraciones, pudiéndose simular con cierta probabilidad sequías prolongadas, o arvenses y herbívoros en abundancia durante periodos prolongados de tiempo.

## Experimentación *in silico*

Antes de comenzar con esta sección se aclara que todos los *scripts*, funciones, *datasets* y rutinas fueron realizados en R y pueden ser consultados en el repositorio público de GitHub ([https://github.com/lparcela/modelo\\_red\\_booleana\\_milpa\\_rafa](https://github.com/lparcela/modelo_red_booleana_milpa_rafa)). Para cualquier aclaración al respecto consultar al autor ([rlopez@datamatrix.co](mailto:rlopez@datamatrix.co)).

Se evaluaron un total de 300 tratamientos. Cada tratamiento fue explorado de forma no exhaustiva mediante 100 submuestreos aleatorios e independientes de 3000 estados iniciales con el fin de determinar asintóticamente el tamaño de las cuencas de atracción de los escenarios estables. Esta decisión se tomó debido a que:

1. Los valores de los tamaños de las cuencas de atracción tendían a estabilizarse rápidamente para tamaños de muestra mayores.
2. El diseño experimental nos permitió garantizar la normalidad de las mediciones realizadas.<sup>5</sup>
3. El código implementado para realizar las simulaciones era particularmente ineficiente al momento de realizar la exploración exhaustiva de los estados iniciales.<sup>6</sup>

Al interior de cada réplica se realizó una actualización sincrónica de las funciones lógicas de cada nodo en cada iteración, manteniendo el nivel de perturbación en cada iteración. Los resultados de dichas simulaciones consistían en listas de matrices booleanas que representaban a los escenarios estables de cada tratamiento acompañados de los tamaños de sus respectivas cuencas de atracción. Una representación gráfica de estos resultados puede observarse en la Figura 3 junto con su interpretación o también en un catálogo de escenarios estables que se elaboró a partir de los escenarios encontrados para

---

5 El hecho de generar réplicas independientes para cada tratamiento nos permitió obtener mediciones a su vez independientes de la permanencia promedio. Al promediar éstas para calcular la permanencia asociada a cada tratamiento, al provenir todos los datos de una distribución de promedios muestrales se tiene la certeza de que: a) el promedio estimado está insesgado respecto al valor real del tratamiento y b) la distribución de dichas mediciones es normal.

6 Se tenían  $2^{23}$  estados a explorar. Este problema puede resolverse utilizando un algoritmo que reduzca el espacio de estados a explorar de manera más eficiente (utilizando principios de simetría y combinatoria) o generando cómputos en paralelo, ambas mejoras se tendrán en mente para versiones posteriores del software.

los 20 tratamientos posibles bajo un nivel de perturbación de cero (Ver [https://github.com/laparcela/modelo\\_red\\_booleana\\_milpa\\_rafa/](https://github.com/laparcela/modelo_red_booleana_milpa_rafa/)).

Los atributos cuantificados como variables de respuesta en cada escenario estable encontrado fueron la permanencia y el riesgo relativo asociados a cada cultivo, a los quelites y al conjunto de ambos. La definición de ambas medidas se presenta en la sección de resultados como parte de la explicación del tipo de dinámicas obtenidas y el procedimiento algorítmico para estimarlas a partir de los resultados obtenidos está en [https://github.com/laparcela/modelo\\_red\\_booleana\\_milpa\\_rafa/cuantiAtr.R](https://github.com/laparcela/modelo_red_booleana_milpa_rafa/cuantiAtr.R) con el código correspondiente.

## Construcción de la base de datos y análisis estadístico

A partir de los resultados de las simulaciones se generó una base de datos con cuatro variables categóricas (Riqueza, Manejo, Perturbación y Tipo\_de\_permanencia) y cuatro variables cuantitativas (Nivel\_de\_perturbación\*<sup>7</sup>, Permanencia\_promedio, Riesgo\_absoluto y Riesgo\_relativo) (consultar base de datos en [https://github.com/laparcela/modelo\\_red\\_booleana\\_milpa\\_rafa/datasets/base\\_datos\\_permanencias.csv](https://github.com/laparcela/modelo_red_booleana_milpa_rafa/datasets/base_datos_permanencias.csv)) . Se obtuvieron un total de 1026 registros o tratamientos puntuales.

Se evaluó la influencia de las variables predictoras: Riqueza, Manejo, Perturbación, Nivel de Permanencia, sobre las variables de respuesta: Permanencia\_promedio y Riesgo\_relativo. En total se construyeron dos modelos de regresión lineal en R mediante la función `base::lm` (R, 2017), por cada tipo de permanencia (individual o conjunta). Esto se hizo para garantizar la independencia entre observaciones, ya que los resultados obtenidos para dos tipos de permanencia al interior de un tratamiento no son independientes entre sí.

Se generaron así seis pares de modelos acompañados cada uno por un Análisis de Factores de Datos Mixtos, realizado mediante `FactoMineR::FAMD` (Le, Josse, & Husson, 2008) con el fin de facilitar su interpretación.

---

7 El nivel de perturbación se consideró como una variable cuantitativa para reducir el número de grados de libertad perdidos al realizar la regresión, además de esta manera se contesta si puede suponerse una influencia numérica entre la probabilidad de perturbación y la probabilidad de éxito de los cultivos.

# Resultados

Esta sección se divide en tres partes principales correspondientes a los objetivos del estudio. En la primera se presenta el modelo booleano de la milpa y todos los aspectos relacionados con su construcción, definición y visualización. La segunda presenta el tipo de resultados que se obtuvieron y cómo fue que se interpretó una dinámica agroecológica a partir de los mismos, asimismo se presenta la definición de las dos medidas empleadas como variables de respuesta para evaluar la hipótesis de este trabajo. Dichas definiciones se presentan como resultados y no como parte de los métodos por dos razones: 1) porque lo presentado y explicado en la primera parte de esta sección es facilita su entendimiento, 2) porque aparentemente es la primera vez que se les presenta en el contexto de las redes booleanas y no se tienen reportes de las mismas en la literatura. En la tercera parte se presenta los resultados del análisis estadístico que se utilizó para evaluar los efectos que tuvieron los distintos tratamientos sobre la permanencia y el riesgo relativo asociados a cada cultivo y al conjunto de éstos.

## 1. Modelo booleano de la milpa

Partiendo del hecho de que la milpa puede ser considerado un sistema complejo, se define al sistema milpa y a sus elementos a partir de la siguiente propiedad de agregación (ver sección La milpa como un sistema complejo):

*Se define a la **propiedad de agregación**  
de los elementos del agrosistema milpa como:*

*Propiedad **Temp***

**Temp**( $x, y$ ):  $x$  **tarda en interactuar 2 meses con**  $y$   
donde  $y \in \mathbf{B} = \{0, 1\}$ ,  $x \in \mathbf{B}^k$ ,  $k = \text{número de nodos que regulan a } y$

Esta propiedad permite definir dos conjuntos, el de las interacciones (aristas) y el de los elementos (nodos), los cuales tienen que satisfacer esta propiedad de agregación. Esta pareja de conjuntos representa a la red de la milpa.

*Dado  $\mathbf{U}$  un universo de discurso y  $\mathbf{P}$  un conjunto de predicados  
definimos el siguiente par de conjuntos:*

*Conjunto de interacciones (aristas) de la milpa*

**Milpa**( $\mathbf{R}$ ):  $\{R_i \in \mathbf{P} \mid \exists x, y \in \mathbf{U} \text{ tales que se cumplen simultáneamente } R_i(x, y) \text{ y } \mathbf{Temp}(x, y)\}$

*Conjunto de elementos (nodos) de la milpa*

**Milpa**( $\mathbf{N}$ ):  $\{x, y \in \mathbf{U} \mid \exists R_i \in \mathbf{Milpa}(\mathbf{R}) \text{ y se cumple } R_i(x, y) \text{ para algún } i\}$

*y con estos conjuntos definimos a la red del agroecosistema milpa como*

**Milpa**( $\mathbf{N}, \mathbf{R}$ ) *tal que se trata de una red booleana*

Habiendo definido teóricamente a la milpa a continuación se presentan los resultados de la investigación realizada para definir a los nodos que la conforman y sus interacciones.

## ***Definición de los nodos de la red o elementos del modelo de la milpa***

A continuación se muestra una descripción de los subsistemas que se definieron como componentes del modelo de la milpa. Seguido del nombre de cada uno se muestra explícitamente a los nodos que lo componen, poniendo el nombre que se les asignó dentro de la red en negritas y su significado en español. Si el nodo se llamó dentro del modelo igual a como se le refiere en español se muestra únicamente el nombre del nodo.

### *Subsistema: Clima*

#### *Nodos:*

- **Temperatura** = temperatura ambiente
- **Presion** = presión atmosférica
- **Precipitacion** = lluvias

Este grupo de nodos representan la entrada de energía al sistema bajo el supuesto de que los procesos que se dan en la superficie terrestre, dependen principalmente de la energía solar. Los elementos del clima fueron elegidos con base en las variables que usualmente se utilizan para describir el clima de una región. Es interesante notar que a partir de estas variables climáticas, las cuales caracterizan a las regiones durante intervalos de tiempo largos, se logró obtener una dinámica anual con sentido, *i.e.* los parámetros de escala decadal indujeron una dinámica de escala mensual o estacional (Figura 3). Este subsistema también cumplió con el papel de inducir la temporalidad general del sistema y a partir de esto poder modelar interacciones bimestrales.

### *Subsistema: Manejo*

#### *Nodos:*

- **Desyerbe** = desyerbe manual o mecánico
- **Herbicida** = herbicida de tipo orgánico o sintético de uso focalizado
- **Plaguicida** = insecticida orgánico o sintético

Dentro de este grupo de nodos se buscó incorporar el efecto que tiene el agricultor en la dinámica ecológica del ecosistema, mediante el manejo de la vegetación asociada y de los herbívoros. Este grupo de variables se utilizó en distintas combinaciones para evaluar el efecto de cuatro tipos de manejo: desyerbe, desyerbe con insecticida, herbicida y herbicida con insecticida. La inversión económica y las horas de trabajo que el campesino invierte al implementar alguno de los tipos de manejo considerados, son variables que no se están tomando en cuenta en este trabajo. De igual manera no se está considerando el efecto que estos agroquímicos pueden tener sobre el suelo, esto debido a la escala temporal que pretende rescatarse con el modelo, por lo que no puede diferenciarse entre un biocida de tipo orgánico de uno sintético. Es por esto que los distintos esquemas más que reflejar un gradiente de tecnificación reflejan distintos niveles de intervención dentro de un contexto de manejos orgánicos.

### *Subsistema: Cultivos.*

#### *Nodos:*

- *cultivos jóvenes: { **MaízJ**=maíz joven, **CbJ**=calabaza joven},*

- *cultivos adultos* {**Maíz**= maíz adulto, **Cb**= calabaza adulta, **Fre**= frijol enredador joven y adulto}<sup>8</sup>
- *cultivos con semilla/fruto*:{**MaízG**= maíz con mazorca, **CbG**= calabaza con fruto, **FreG**= frijol enredador con vaina}

La *milpa* se caracteriza por presentar una asociación típica de maíz, frijol enredador y calabaza, sin embargo, dicha práctica puede presentarse en combinaciones más simplificadas o diversas, *i.e.* maíz-frijol, maíz-calabaza, maíz-frijol-calabaza, entre otras. Estas tres combinaciones junto con dos monocultivos, calabaza y maíz, fueron empleadas en el modelo para simular un gradiente de simplificación de la riqueza de especies cultivadas y analizar el efecto de este fenómeno en la permanencia y el riesgo. Este grupo de nodos contó con múltiples nodos por cada organismo, los cuales representaban las distintas fases fenológicas de los cultivos durante el temporal, *e.g.* para el nodo maíz se tenía: maíz joven, maíz adulto y maíz con grano, considerando que la escala temporal es bimestral se tiene un maíz modelo que culmina su ciclo agrícola en 6 meses.

*Subsistema: Vegetación asociada.*

*Nodos:*

- *arvenses jóvenes*:{**QuelitesJ** = vegetación útil que crece al interior de la parcela y **NoQuelitesJ**=vegetación sin una utilidad para el agricultor que crece al interior de la parcela, **Borde**=vegetación que no crece al interior de la parcela sino alrededor de ésta}
- *arvenses adultas*:{**FloresQuelites** = quelites adultos con fruto o flor, **FloresNoQuelites**= no quelites adultos con fruto o flor, **FloresBorde**=vegetación que crece alrededor de la parcela con flor o fruto}

Dentro de este grupo de nodos se considera a todas aquellas plantas que, gracias al “disturbio ecológico” generado por la práctica de la milpa, pueden hacerse presentes como parte del paisaje en donde se está sembrando. Aquí se distingue entre dos grandes grupos: la vegetación que surge en el interior de la parcela (quelites y no quelites) y la que se presenta a su alrededor (vegetación de borde); a su vez el grupo de vegetación interior se divide en plantas con utilidad alimenticia-medicinal para el ser humano (quelites) y plantas sin utilidad aparente (no quelites). Es importante notar que el grupo de plantas sin utilidad aparente, en realidad sí pueden tener un uso dependiendo del tipo de manejo que se les dé, ya sea como forraje para animales, como abono verde o como acolchado para preservar la humedad del terreno, sin embargo, esta utilidad no se contempló en este modelo. En el caso de la vegetación de borde sus bondades para la retención de suelo y agua no fueron consideradas, mas, su función como fuente de organismos benéficos para el agroecosistema sí lo fue. Al igual que en el grupo anterior, cada tipo de vegetación asociada estaba constituido por dos nodos que representaban el ciclo fenológico de los mismos durante el año, *e.g.* quelites y flores quelites.

*Subsistema y nodos: Herbívoros = herbívoros*

En este grupo se englobó a todos aquellos herbívoros que, dependiendo de las regiones y los tipos de manejo, inciden en distinto grado en el agroecosistema milpa o en alguna combinación de sus cultivos. Este nodo funcional no distingue entre herbívoros especialistas y generalistas, por lo que la acción del

<sup>8</sup> El frijol enredador adulto y el joven fueron colapsados en un solo nodo debido a su tiempo de maduración en comparación con el del maíz y la calabaza.

mismo como parte del agroecosistema puede ser análoga a la de un solo herbívoro generalista o la de varios especialistas de manera simultánea. Considerar la acción diferencial de distintos tipos de herbívoros es un aspecto que debe de considerarse en futuras modificaciones del modelo.

#### *Subsistema y nodos: Depredadores*

La presencia de depredadores generalistas en el modelo busca representar el rol ecológico del tercer nivel trófico, pero también el rol agroecológico de mecanismo de control de la herbivoría. Al igual que en el caso de los herbívoros, éste es un nodo funcional que no distingue entre depredadores generalistas o especialistas. Este nodo puede representar también un tipo de manejo, el del control biológico inducido, sin embargo, su uso como tal no se consideró como una variable a controlar, lo que sí se consideró fue el control biológico facilitado, mediante la presencia o ausencia de la vegetación de borde.

#### *Subsistema y nodos: Polinizadores*

Este grupo está íntimamente ligado con el ciclo fenológico de los cultivos y la vegetación asociada, siendo crucial para que algunos de ellos completen su ciclo de vida. Se trata nuevamente de un nodo funcional que no distingue entre las distintas clases de polinizadores, sin embargo esta simplificación se hizo debido a que solo en el caso de la calabaza este rol es importante y dicha polinización se da sobre todo por abejas melíferas.

#### *- Nutrientes y microorganismos del suelo*

Gran parte de las limitantes esbozadas anteriormente como perspectivas de trabajo y mejoras al modelo tienen que ver con la exclusión del subsistema suelo dentro del modelo. Se decidió no considerarlo explícitamente debido a la escala temporal en la que se dan los fenómenos que están asociados a éste, la cual puede ser de hasta décadas, y debido a la complejidad que ha reflejado su estudio en otros agroecosistemas (Poveda, Steffan-Dewenter, Scheu, & Tschardtke, 2003, 2006). Por el momento el modelo solo refleja la dinámica aérea en la escala de un temporal. En consecuencia se adoptaron los siguientes supuestos respecto al suelo:

1. Para decidir cultivar un terreno es razonable suponer que existe una cantidad basal de C, N, P, K y H<sub>2</sub>O capaz de, al menos potencialmente, permitir el desarrollo de los cultivos.
2. Los herbicidas e insecticidas, los cultivos o vegetación asociada, o la variabilidad de las lluvias no tendrán influencia alguna sobre las condiciones del suelo del temporal siguiente.

Por lo tanto todas aquellas interacciones mutualistas como la fijación de nitrógeno por parte del frijol enredador o la retención de humedad por parte de la vegetación asociada o la calabaza, así como los efectos del herbicida o el insecticida en el suelo (orgánicos o sintéticos), no fueron consideradas. El uso del riego tampoco fue considerado como un modo de intervención, ya que la información recabada para la construcción del modelo correspondía sobre todo a agricultura de temporal y además, si se busca evaluar la vulnerabilidad asociada los manejos respecto a perturbaciones mayoritariamente de tipo puntual y no de tipo sostenido<sup>9</sup>, el riego es una medida que no está disponible de manera puntual si no

---

9 Las perturbaciones corresponden a probabilidades de error que tienen efectos en cada iteración de cada simulación

se cuenta con la infraestructura para implementarlo, mientras que el considerar que un herbicida puede ser de tipo orgánico o de tipo sintético no afecta el hecho de que sea una medida de manejo aplicada de forma puntual. Por lo tanto incluir el riego como medida para remediar, por lo que no podía incluirse dentro de un esquema de manejo menos intrusivo y más agroecológico.

### Definición de aristas de la red o interacciones del modelo de la milpa

Las reglas lógicas o funciones regulatorias de cada nodo y las referencias que las sustentan pueden observarse en la Tabla 5, la cual se colocó en el Anexo 1 de este trabajo debido a su extensión.

### Medidas estructurales de la red y visualización del grafo

Los nodos e interacciones de la red construida pueden observarse en la Figura 1. Las medidas estructurales como *clustering* o centralidad no se presentan ya que se trata de una red relativamente pequeña para la cual estos valores resultan poco informativos (23 nodos). Sin embargo, sí puede decirse que los nodos con mayor grado fueron los de Herbívoros (19), Precipitación (13) y NoQuelites o arvenses (10). Cabe destacar que fue sobre estos nodos que se generaron las perturbaciones ante las cuales se evaluó a la permanencia y su vulnerabilidad asociada como indicadores de robustez.

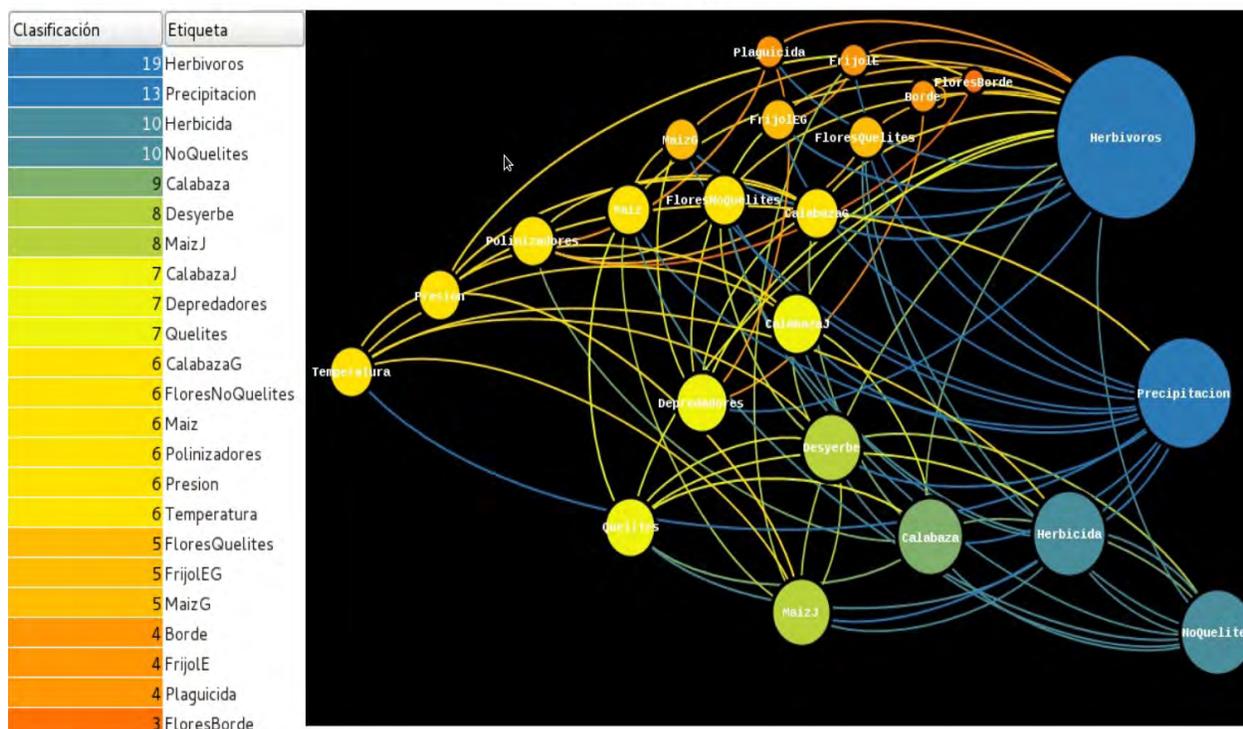


Figura 1: Gráfico de la red. La columna clasificación muestra el grado de los nodos y su color correspondiente. La columna Etiqueta muestra la abreviatura del nodo como se maneja en el modelo (ver apartado anterior). Las aristas que salen de cada nodo son del color del nodo, mientras que las que llegan a este son del color del nodo del que provienen.

realizada, sin embargo, la probabilidad  $p$  de obtener  $n$  instantes seguidos un estado afectado por la perturbación disminuye multiplicativamente como  $p^n$  con  $n$  tendiendo a infinito, lo cual, siendo  $p < 1$  sugiere que mientras mayor sea la longitud de la racha de fracasos continuos menor será su probabilidad de ocurrencia.

## 2. Análisis e interpretación de la dinámica observada en los escenarios estables

### *Interpretación de los estados booleanos*

Para poder analizar e interpretar la dinámica inferida a partir de los escenarios estables es necesario aclarar qué significa el que un nodo se encuentre activo o inactivo en el contexto de este modelo. Los estados booleanos o binarios se representan con los números 0 y 1, siendo 0 el número asociado al estado de inactivación del nodo y 1 al de activación. Las redes booleanas representan abstracciones de sistemas en donde cada variable o nodo está regulado por una función de regulación sigmoide con un valor umbral ubicado en el punto donde dicha función cambia de concavidad (Figura 2a). Es importante mencionar que este umbral existe sin importar la variable modelada lo cual permite caracterizar a la variable mediante su abstracción binaria (Figura 2b). En otras palabras, este umbral permite observar dos estados cualitativamente diferentes para cada nodo, pudiéndose determinar cuando están activos o inactivos. Por esto, bajo el marco de modelación booleano se obvia el valor de dicho umbral para todas las variables del sistema y se trata de rescatar su dinámica a partir de las variables que las regulan.

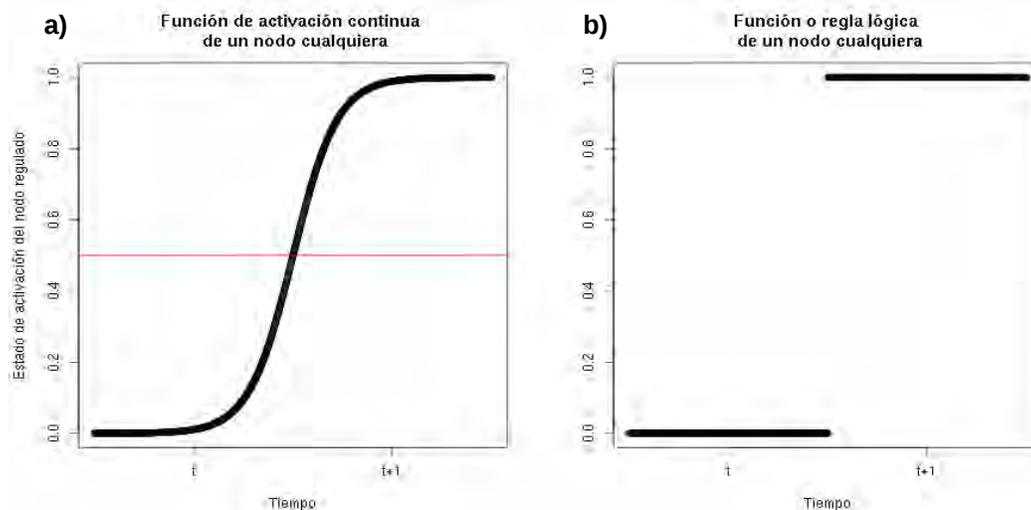


Figura 2: Funciones de regulación en donde un nodo pasa de un estado de inactivación al de activación, a) caso continuo donde se indica con una línea roja el umbral de activación, b) caso discreto o función de regulación booleana.

En el caso del modelo de la milpa, el hecho de que un nodo que corresponde a una especie o grupo de especies se encuentre activo puede interpretarse como una densidad poblacional por arriba de un valor que permita suponer la tendencia de la población a crecer durante ese instante, para el estado de desactivación sucedería lo contrario, se tendría una especie en una cierta población que al decrecer por debajo de un valor tendería a extinguirse o a mantenerse en abundancias muy bajas. Por su parte, todos los nodos climáticos tienen valores umbrales que al ser rebasados determinan la estacionalidad y las condiciones meteorológicas de un lugar. En cuanto a los tipos de manejo, la interpretación de sus estados es más acorde con el carácter discreto de los mismos, pensando en que se practican o no se practican, *e.g.* o se hace desyerbe manual o no se hace.



## Interpretación de los escenarios estables

Dado un tratamiento particular, los escenarios estables con significado agroecológico asociados a éste representan ciclos de cultivo que juegan el papel de fotografías dinámicas a partir de las que pueden inferirse fenómenos de escala anual. En la Figura 3 presentamos los escenarios estables encontrados para un policultivo de maíz-frijol-calabaza manejado únicamente mediante desyerbe manual en un escenario libre de perturbaciones. En lo que resta de este apartado se referirá a dichos escenarios mediante el número que tienen asignados en la figura en cuestión.

En los escenarios 1, 2 y 3 puede observarse que la dinámica que influyó predominantemente en la periodicidad de los mismos fue la del subsistema climático, ya que presentaron periodicidades que eran múltiplos de seis, el cual es el periodo en el que se da una dinámica climática anual con lluvias en verano. Este efecto se observó en todos los tratamientos modelados (ver catálogo de tratamientos en [https://github.com/laparcela/modelo\\_red\\_booleana\\_milpa\\_rafa/catalogo](https://github.com/laparcela/modelo_red_booleana_milpa_rafa/catalogo)) y debido a esto se concluyó que los escenarios estables interpretables eran aquellos con periodicidades mayores o iguales a seis. Esto puede observarse en los escenarios 1, 2 y 3 teniéndose señalada la época de lluvias en un rectángulo azul claro (Figura 3).

En el caso de los escenarios 2 y 3 puede notarse que el ensamblaje del subsistema climático con el resto de subsistemas que constituyen al modelo de la milpa provocó el aumento de su periodicidad que generó dinámicas bianuales. Uno de dichos subsistemas es de tipo Lotka-Volterra pero en una versión discretizada, éste está enmarcado en un recuadro gris. Por su parte el escenario 1 careció de este ciclo ya que los depredadores no estuvieron presentes debido a la ausencia de vegetación de borde. En cuanto al papel del recurso en esta dinámica depredador-presa, éste es representado por los cultivos y la vegetación asociada. Respecto a estos nodos, en los tres escenarios pueden observarse los ciclos de cosecha de los cultivos, por su parte en el escenario 1 se tiene que no hubo rendimientos ya que aunque hubo cultivos jóvenes, enmarcados en rojo, y adultos, enmarcados en vino-tinto, la presencia de herbívoros no permitió que obtuvieran granos. En el escenario 2 por otra parte puede observarse una dinámica bianual en la que en ambos temporales el ciclo de cosecha se completó exitosamente. Finalmente en el escenario 3 se tiene el caso híbrido en el que de dos intentos de cosecha solo uno culminó exitosamente (Figura 3).

En cuanto a los nodos de manejo puede observarse cómo la acción del nodo desyerbe depende directamente de la dinámica de las arvenses asociadas a la implementación de la milpa, *i.e.* solo se desyerba cuando el maíz es joven, y de igual manera cómo al activarse dicho nodo solo se provoca la inactivación de las arvenses catalogadas como NoQuelites mientras que los Quelites continúan su dinámica usual (recuadros violetas). Este es un ejemplo del control selectivo que diferencia la acción de desyerbar de la de aplicar herbicida focalizado en el estrato herbáceo. De igual manera puede notarse que la vegetación asociada presenta sus ciclos fenológicos en función de las lluvias y que los polinizadores (rectángulo amarillo) obedecen a la aparición de estas flores para estar presentes en la parcela.

La visualización simultánea de estos ciclos representa una de las grandes ventajas de utilizar este tipo de modelos cualitativos, los cuales pese a perder precisión numérica nos permiten conjuntar sistemas usualmente más complicados de abordar cuando se utilizan otras herramientas, *e.g.* ecuaciones

diferenciales. Ahora bien, habiendo explicado cómo es que este tipo de resultados fueron interpretados al interior de un tratamiento, en el siguiente apartado se presenta la definición de las medidas de permanencia y riesgo relativo en función de este tipo de resultados. Esto con el fin de posteriormente exponer otro tipo de comparaciones que se construyeron a partir de los escenarios estables de cada tratamiento.

### ***Definición de las variables a medir, permanencia y riesgo relativo***

Con el fin de poner a prueba la hipótesis de este trabajo se definen a continuación las medidas de permanencia y riesgo relativo. La permanencia es una probabilidad definida a partir de los escenarios estables que caracterizan a las redes booleanas, dicha medida pese a no ser un indicador directo de la productividad sí nos habla de una medida de la idoneidad de los cultivos para ser sembrados bajo distintos escenarios. En este trabajo se manejan dos tipos de permanencias, la individual que hace referencia a cada cultivo o grupo de vegetación y la conjunta que considera todas las permanencias individuales de forma simultánea. De igual manera se presenta la definición de riesgo relativo, esta medida se utilizó como indicador de la vulnerabilidad asociada a la permanencia de los distintos cultivos bajo diferentes tratamientos.

#### ***Permanencia individual***

Dada alguna combinación inicial de riqueza de cultivos y un tipo de manejo (tratamiento  $T$ ), se define a la permanencia de un cultivo  $X$  en el escenario estable  $i$  como la siguiente probabilidad condicional:

$$p_i = P(\text{Cosechar } X | \text{Sembré } X) = \frac{\text{no. de veces que coseché } X \text{ en } i}{\text{no. de veces que sembré } X \text{ en } i} \quad (1)$$

Donde:

-  $p_i$  es la permanencia del cultivo  $X$  en el escenario estable  $i$  del tratamiento  $T$

Esta definición se propone a partir del siguiente razonamiento. Si un agricultor siembra maíz, frijol enredador o calabaza al inicio del temporal, éste esperaría que implementando alguno de los tipos de manejo obtuviera cosechas de los cultivos que sembró. Por lo tanto, si se considera a cada escenario estable pueden contarse cuántas veces el cultivo  $X$  permaneció o resistió hasta el final de la temporada y dividirse entre el total de veces que se le sembró dentro del escenario. De esta manera se obtiene la proporción de temporales en los que hubo cosecha. Por ejemplo: si calculamos la permanencia del maíz en el escenario 1 de la Figura 3 tenemos que esta vale  $0/1=0$ , en el escenario 2 vale  $2/2=1$  y en el 3 vale  $1/2=0.5$ .

Esta misma medida se aplicó para considerar la presencia y cosecha de los quelites. El cálculo se realiza de igual manera considerando el número de veces que los quelites llegaron a producir fruto o flor respecto del número de veces en que aparecen como plantas juveniles. Esta permanencia será referida de aquí en adelante como una de las permanencia individuales de los cultivos, aclarando al hablar de ella, cuando sea necesario, si se trata de un cultivo específico o de los quelites.

Teniendo entonces la permanencia por escenario estable definimos a la permanencia individual de un cultivo  $X$  en el tratamiento  $T$ , como la esperanza de las permanencias de cada uno de los escenarios estables de este tratamiento:

$$\bar{P}_{X,T} = \sum_{i=1}^k f_i p_i \quad (2)$$

- $p_i$  es la permanencia del cultivo  $X$  en el escenario estable  $i$  del tratamiento  $T$
- $f_i$  es el tamaño de la cuenca de atracción del escenario estable  $i$  en el tratamiento  $T$ , esta frecuencia debe de estandarizarse para considerar como 100% el porcentaje sumado por el resto de escenarios estables con interpretación biológica, *i.e.* si sólo el 75% de estados iniciales nos llevó a escenarios con sentido ecológico entonces un estado hipotético que tuviera una cuenca de atracción del 37.5% en realidad tendría una cuenca que abarcaría al 50% de los estados de interés.
- $\bar{P}_{X,T}$  es la permanencia del cultivo  $X$  en el tratamiento  $T$  en una réplica
- $k$  es el número de escenarios estables que se encontraron para el tratamiento  $T$

Esto se hizo con el fin de obtener un único valor para cada cultivo en cada tratamiento. Tomando como ejemplo nuevamente la Figura 3, se tiene que la permanencia individual del maíz asociada al tratamiento: maíz-frijol-calabaza con desyerbe manual sin perturbaciones fue:

$$\text{Permanencia individual del maíz} = (31.23/71.43)*0/2 + (19.93/71.43)*2/2 + (20.27/71.43)*1/2 = 0.42$$

cada permanencia por escenario fue multiplicada por su cuenca de atracción estandarizada y después todo fue sumado para obtener la esperanza de las permanencias por escenario, *i.e.* la permanencia individual o permanencia por tratamiento.

Lo anterior se hizo por cada una de las 100 réplicas realizadas para explorar cada tratamiento. Posteriormente se calculó la permanencia individual promedio como se muestra en (3).

$$\bar{\bar{P}}_{X,T} = \sum_{i=1}^{100} \bar{P}_{X,T,i} \quad (3)$$

- $\bar{P}_{X,T,i}$  es la ecuación (2) aplicada en la réplica  $i$  del tratamiento  $T$
- $\bar{\bar{P}}_{X,T}$  es la permanencia individual promedio del cultivo  $X$  bajo el tratamiento  $T$

### **Permanencia conjunta**

Hasta el momento, solo se ha definido la permanencia para evaluar el desempeño de los cultivos individuales o de los quelites bajo distintos esquemas de manejo. Sin embargo, existen tratamientos en donde esta medida puede parecer menor para un cultivo en comparación con la observada en otros, pero al momento de considerar al simultáneamente al resto de cultivos o quelites dentro del mismo tratamiento esta comparación puede invertirse o acentuarse. En consecuencia para cada tratamiento  $T$ , se definió la siguiente medida denominada permanencia conjunta asociada al escenario estable  $i$ :

$$pc_i = P(\text{Cosechar } X_j | \text{Sembré o dejé crecer } X_j) = \frac{\sum_{j=1}^4 \text{no. de veces que coseché } X_j}{\sum_{j=1}^4 \text{no. de veces que sembré o dejé crecer } X_j} \quad (4)$$

- $pc_i$  es la permanencia conjunta en el escenario estable  $i$  del tratamiento  $T$
- $j$  es el  $j$ -ésimo cultivo o quelite, observemos que  $1 \leq j \leq 4$

Esta medida se calculó considerando simultáneamente las permanencias de cultivos y quelites. Posteriormente, obteniendo la esperanza de las permanencias conjuntas por escenario se define a la permanencia conjunta por tratamiento:

$$\overline{PC}_T = \sum_{i=1}^k f_i pc_i \quad (5)$$

- $pc_i$  es la permanencia conjunta en el escenario estable  $i$  del tratamiento  $T$
- $f_i$  es el tamaño de la cuenca de atracción del escenario estable  $i$  en el tratamiento  $T$ , el cual tiene que ser estandarizado al igual que en el caso de la permanencia individual por tratamiento.
- $\overline{PC}_T$  es la permanencia conjunta del tratamiento  $T$  en una réplica
- $k$  es el número de escenarios estables que se encontraron para el tratamiento  $T$

Finalmente, se obtuvo la permanencia conjunta promedio de cada tratamiento  $T$  mediante el cálculo del promedio aritmético sobre las 100 réplicas realizadas:

$$\overline{\overline{PC}}_T = \sum_{i=1}^{100} \overline{PC}_{T,i} \quad (6)$$

- $\overline{PC}_{T,i}$  es la ecuación (5) aplicada en la réplica  $i$  del tratamiento  $T$
- $\overline{\overline{PC}}_T$  es la permanencia conjunta promedio bajo el tratamiento  $T$

### **Riesgo relativo o vulnerabilidad**

Habiendo definido las medidas de permanencia, el protocolo de experimentación nos permitió obtener permanencias promedio individuales y conjuntas con sus respectivas desviaciones estándar. A partir de éstas dos cantidades se calculó el riesgo relativo individual y conjunto en cada tratamiento, que no es más que el coeficiente de variación.

$$CV_{X,T} = \frac{DE_{X,T}}{\overline{P}_{X,T}} \quad (7)$$

- $DE_{X,T}$  es la desviación estándar de la permanencia individual promedio del cultivo  $X$  o conjunta

del tratamiento  $T$

-  $\bar{P}_{X,T}$  es la permanencia promedio individual del cultivo  $X$  o conjunta del tratamiento  $T$

Vandermeer y Schultz, (1990) sugieren el uso del coeficiente de variación o riesgo relativo como una medida para ponderar el riesgo que conlleva sembrar un cultivo bajo un esquema de mono o policultivo en un contexto agroecológico cambiante. Este coeficiente representa una medida que pondera a la desviación estándar, también conocida como riesgo absoluto, dividiéndola entre el valor de la permanencia promedio correspondiente. Esto lo convierte en un porcentaje y por lo mismo resulta ser una medida muy útil para comparar tratamientos e identificar aquéllos que impliquen una menor vulnerabilidad. La interpretación de este coeficiente en el contexto de este estudio es que mientras más pequeño es su valor, menor es el riesgo que uno corre por cada unidad de permanencia ganada. En este trabajo los términos riesgo relativo y vulnerabilidad serán manejados de manera indistinta entendiendo al riesgo relativo como una medida de la vulnerabilidad.

### 3. Análisis estadístico de los resultados obtenidos

Como se indica en la metodología y buscando cumplir con el tercer objetivo del trabajo, al terminar con las simulaciones para cada uno de los 300 tratamientos evaluados se generó una base de datos (ver [https://github.com/laparcelsa/modelo\\_red\\_booleana\\_milpa\\_rafa/datasets/base\\_datos\\_permanencias.csv](https://github.com/laparcelsa/modelo_red_booleana_milpa_rafa/datasets/base_datos_permanencias.csv)). Dado que la permanencia se utiliza como un indicador de la robustez de los elementos del sistema y el riesgo relativo como un indicador de su vulnerabilidad, a continuación se presentan los resultados de los análisis de regresión realizados para medir el efecto que tuvieron las perturbaciones y los distintos tratamientos de manejos-riquezas sobre estas dos variables para cada permanencia individual y conjunta calculada. Antes de entrar de lleno al análisis de cada uno de estos resultados se mostrará un panorama general de cómo se comportó en este estudio la medida de permanencia en relación con el riesgo relativo y viceversa.

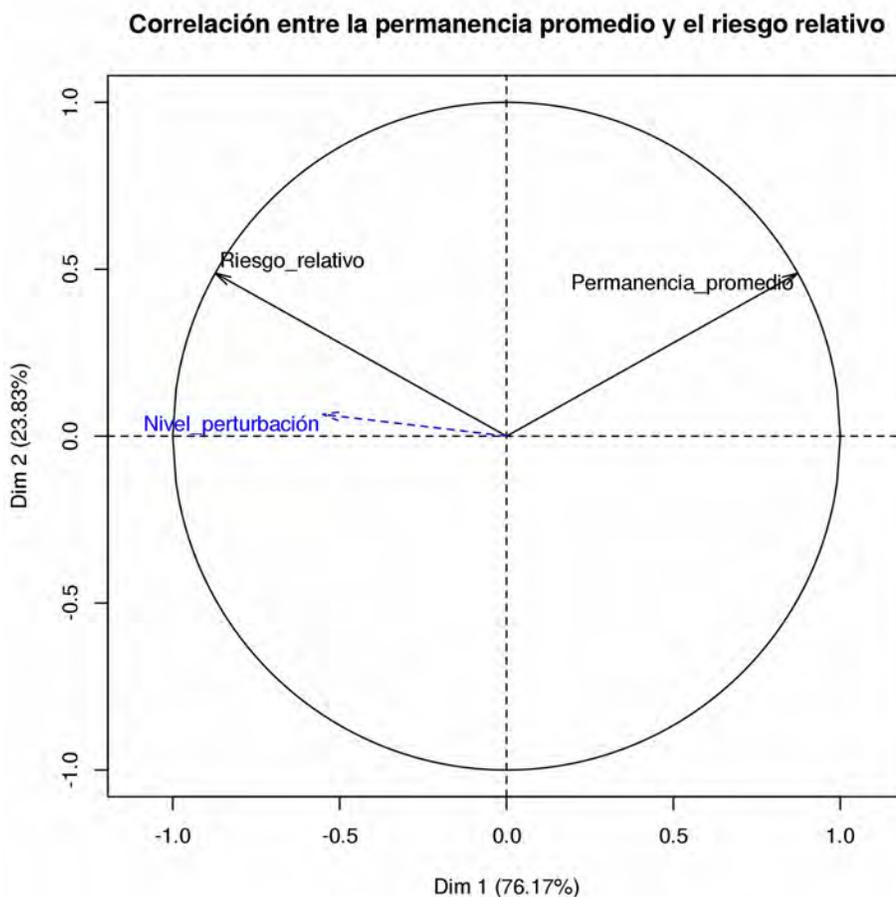


Figura 4: Mapa de correlaciones entre la permanencia promedio y el riesgo relativo considerando a todas las observaciones de la base de datos. En la dimensión 1 puede observarse que al aumentar/disminuir la permanencia disminuye/aumenta el riesgo, mientras que en la 2 se observa que al aumentar/decrecer uno también lo hace así el otro. El nivel de perturbación se muestra como la única variable cuantitativa controlada no para influir en los porcentajes de explicación de cada dimensión, sino como variable complementaria. Mostrando a grandes rasgos que al aumentar el nivel de perturbación en el 77.57% de los escenarios aumenta el riesgo y disminuye la permanencia, mientras que en el 23.83% al aumentar el nivel aumentan el riesgo y la permanencia pero de manera más débil.

En la mayoría de tratamientos (77.57%) el riesgo relativo se redujo/aumentó al aumentar/reducirse la permanencia, como era de esperarse debido al cálculo aritmético de dicha cantidad. No obstante, hubo un 22.43% de los escenarios en los que al aumentar/reducirse la permanencia aumentó/se redujo el riesgo (Figura 4). Esto es interesante, ya que en una situación real un agricultor seguramente preferiría implementar los manejos que pertenecieran al primer grupo y evitar los del segundo. Sin embargo, para poder dilucidar cuáles son estos tratamientos a continuación se presenta un análisis más detallado.

Respecto al caso particular de cada permanencia individual o conjunta se presentan los resultados arrojados por los modelos de regresión para la permanencia y el riesgo (Tablas 3 y 4), a la par de un análisis de factores de datos mixtos (FAMD) con el fin de facilitar su interpretación (Figuras 5, 6, 7, 8, 9). En cada una de estas figuras se presentan cinco gráficos. El gráfico a) correspondiente a todas ellas representa un mapa de correlaciones entre la permanencia y el riesgo relativo como el ya presentado en la Figura 4, pero restringido sólo a los valores correspondientes a un solo tipo de permanencia, *e.g.* permanencia individual del maíz. Este gráfico se muestra porque es el que nos permite determinar el significado de los ejes presentes en los demás gráficos (b), c), d) y e)). Esta interpretación se realizó de manera previa y con el fin de facilitar la interpretación de estos cuatro gráficos se añadió un par extra de ejes, uno rojo que indica la división de hacia qué lado hay más o menos permanencia y uno azul que indica lo mismo pero para el riesgo.

A continuación se presentan los resultados para la permanencia individual y conjunta de los nodos asociados al estado maduro de plantas cultivadas y de quelites y su discusión.

### **(1) Análisis individual del maíz**

Los coeficientes estimados para la permanencia y riesgo individual del maíz pueden observarse en las Tablas 3 y 4 respectivamente. El nodo asociado al maíz fue menos permanente en los escenarios de sequía y bajo la influencia de las arvenses al menos en comparación con aquellos donde los herbívoros podían convertirse en plagas (ver Tabla 3). Por su parte, el riesgo relativo fue mayor en los primeros escenarios en comparación con los últimos (Tabla 3, Figura 5c). Esto se corresponde con lo reportado por (Martínez-Domínguez, 2006) quienes mencionan que durante las etapas tempranas de este cultivo la competencia con las arvenses y la disponibilidad de agua son factores cruciales para el crecimiento de la planta.

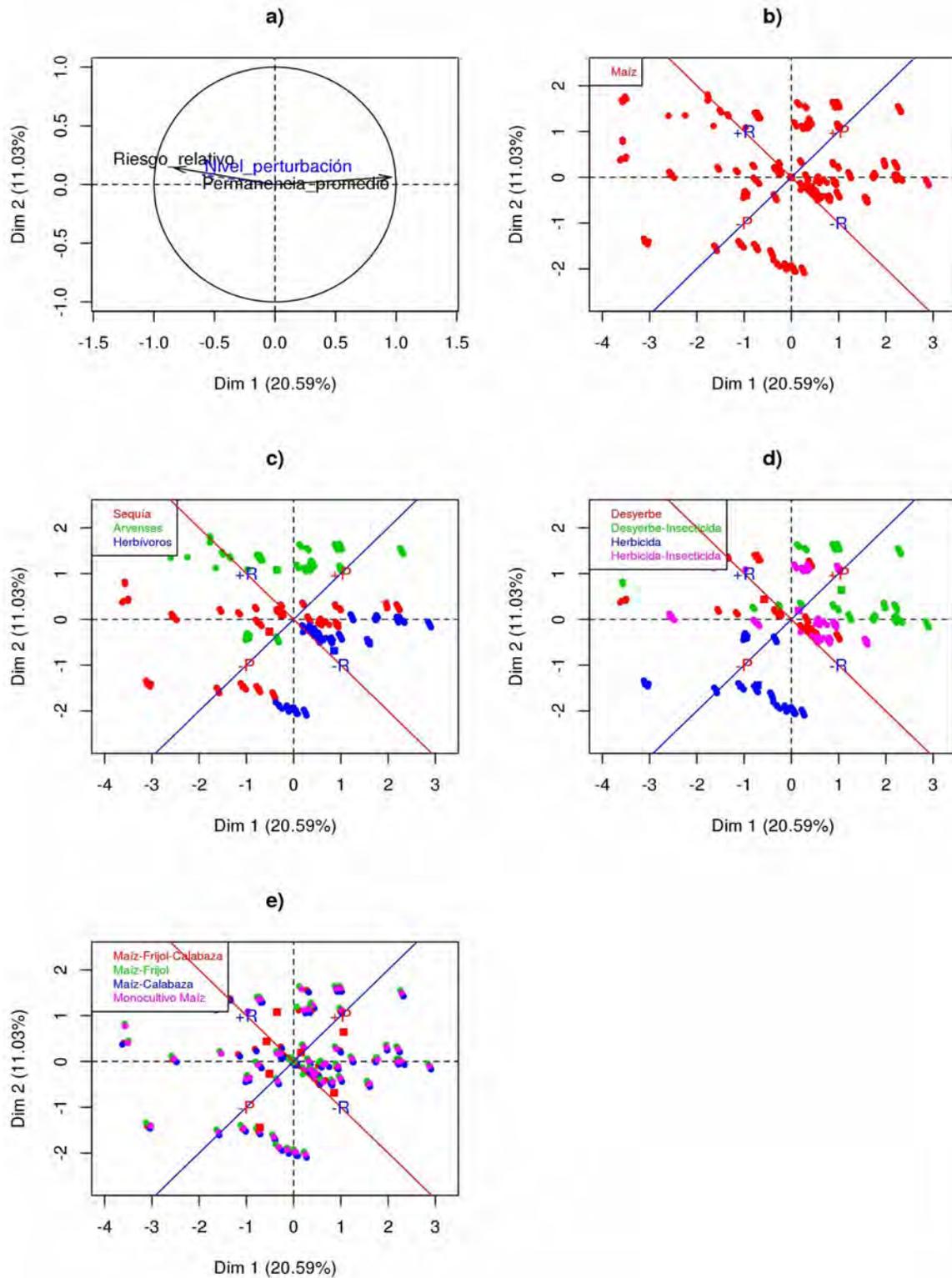


Figura 5: FAMD para la permanencia individual del maíz. a) Mapa de correlación entre la permanencia y el riesgo relativo. Distribución de los tratamientos de acuerdo con las dimensiones estimadas según el b) Tipo de permanencia, c) Tipo de perturbación, d) Tipo de manejo de los insumos, e) Tipo de policultivo implementado. Cada uno de estos últimos cuatro gráficos está dividido en cuatro regiones, la línea roja separa las zonas de más y menos permanencia, indicadas por los símbolos +P y -P, y la azul la de mayor y menor riesgo, señaladas por los símbolos +R y -R.

Estas mayores permanencias y menores riesgos registrados en un contexto donde los herbívoros podían afectar al cultivo pueden estar relacionados con el hecho de que los manejos con insecticida presentaron mayores permanencias que aquellos tratamientos que carecieron de éste (Tabla 3, Figura 5d). Considerando los distintos esquemas de policultivo, éstos no presentaron diferencias significativas entre sí en lo referente a sus permanencias o sus riesgos (Tabla 3 y 4), lo cual puede ser corroborado en la Figura 5e). Esto se discutirá más ampliamente en la sección de Discusión de los resultados del análisis estadístico, no obstante puede adelantarse que este resultado era de esperarse, ya que en este trabajo solo se está modelando la facilitación del maíz hacia el frijol y la competencia espacial entre la calabaza y las arvenses. En lo que a los demás elementos vegetales se refiere, se tiene que sus interacciones son de tipo neutral y que no se está modelando la competencia radicular por el espacio o los nutrientes.

## ***(2) Análisis individual del frijol enredador***

El nodo asociado al frijol enredador fue el que presentó mayores valores de permanencia en comparación con el resto de permanencias individuales y conjuntas. Esto implica que se trata del cultivo con mayores probabilidades de éxito o mayor robustez, aunque vale la pena recordar que la presencia de éste implica forzosamente la presencia del maíz, que es el nodo con la segunda mayor permanencia (Tabla 3). Esto sugiere que la relación de facilitación rescatada por el modelo provoca un aumento significativo de la permanencia del frijol y conlleva una reducción de la vulnerabilidad asociada en comparación con los valores asociados al nodo maíz (Tabla 4). Lo anterior se corresponde con lo encontrado de forma analítica por Vandermeer y Schultz (1990), mostrando cómo la relación de facilitación es el único escenario de policultivo en el que los riesgos tienden a disminuir en comparación con los escenarios individuales de los cultivos. En este caso faltaría evaluar el desempeño del frijol de crecimiento determinado en monocultivo para terminar de mostrar que lo anterior también sucede en este modelo.

Respecto a los tipos de perturbación sobre la permanencia del frijol se tiene que la competencia con las arvenses fue la que más decrementos provocó (Tabla 3), no obstante, la magnitud de las diferencias con el resto de las perturbaciones no fue tan grande como para observarse cualitativamente en la distribución de los tratamientos (Figura 7c). Este fenómeno se explica por el efecto directo del maíz sobre el frijol, ya que al verse el primero afectado por la vegetación asociada así lo hará también el segundo. Esto es interesante, ya que aunque las arvenses no compiten directamente con el frijol dentro del modelo la escala temporal de éste permite rescatar la competencia mediada (Tabla 5).

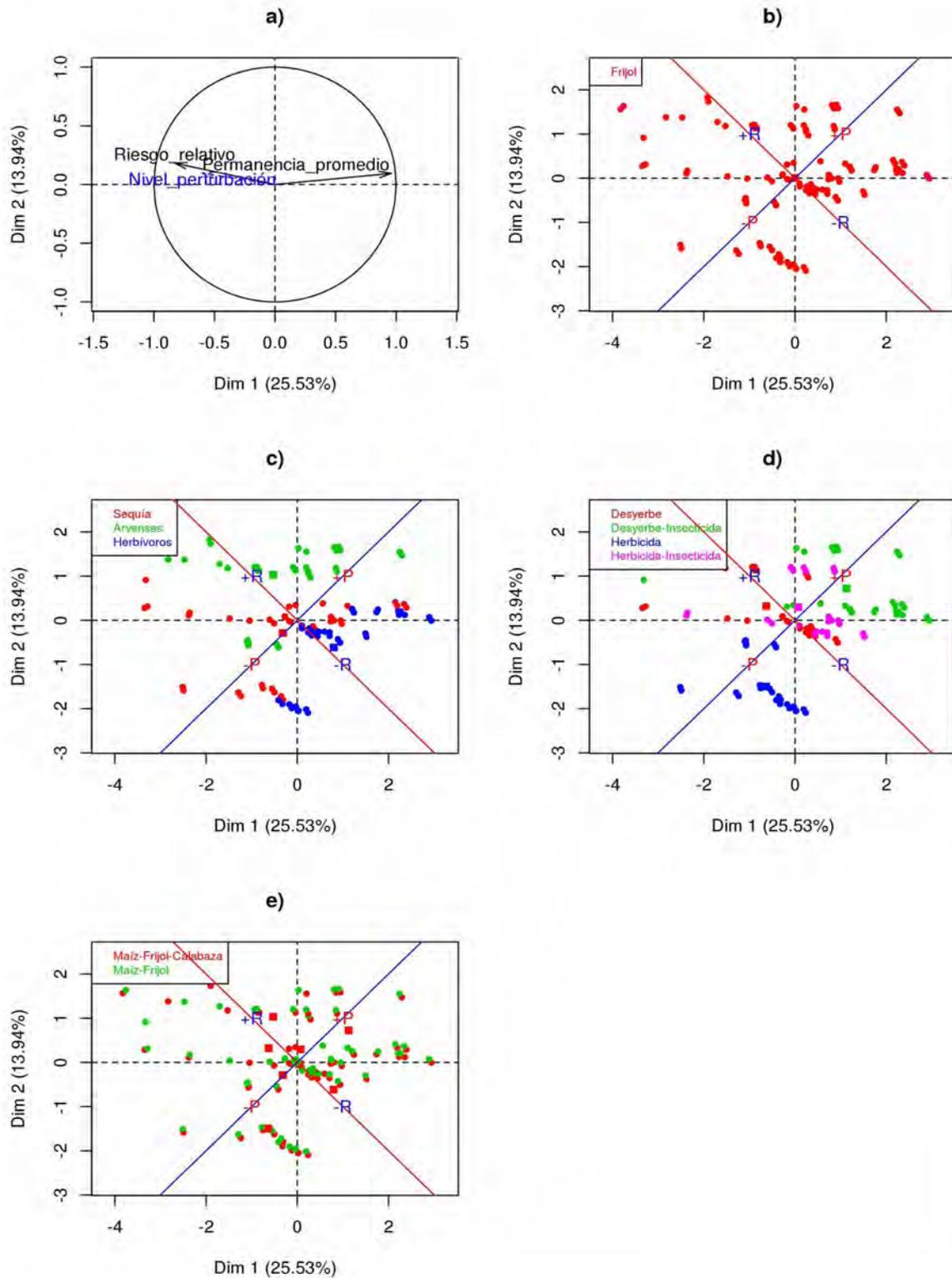


Figura 6: FAMD para la permanencia individual del frijol. a) Mapa de correlación entre la permanencia y el riesgo relativo. Distribución de los tratamientos de acuerdo con las dimensiones estimadas según el b) Tipo de permanencia, c) Tipo de perturbación, d) Tipo de manejo de los insumos, e) Tipo de policultivo implementado. Cada uno de estos últimos cuatro gráficos está dividido en cuatro regiones, la línea roja separa las zonas de más y menos permanencia, indicadas por los símbolos +P y -P, y la azul la de mayor y menor riesgo, señaladas por los símbolos +R y -R.

Por lo tanto, si la permanencia del frijol se ve afectada vía el efecto que los organismos tienen sobre el maíz uno esperaría ver cambios en su riesgo relativo, el cual fue mayor en los escenarios donde hubo efectos indeseados de las arvenses y de la sequía y menor respecto a aquellos afectados por los herbívoros (Tabla 4 y Figura 7c). Por su parte al ser el agua el factor limitante que determina la presencia del frijol (Tabla 5) se entiende que el segundo escenario donde las permanencias fueron menores haya sido el de sequía (Tabla 3).

Los esquemas de manejo, reflejaron mayores permanencias y menores riesgos en aquellos tratamientos donde la aplicación de insecticida estuvo presente (Tablas 3 y 4, Figura 7d) sin haber diferencias entre los esquemas de policultivo (maíz-frijol-calabaza y maíz-frijol). Al igual que en el caso del maíz la influencia de los herbívoros parece disminuir en combinación con el uso de este agroinsumo, sin embargo, al no estar modelando puntualmente a los depredadores de cada cultivo no podemos afirmar que el aumento en las permanencias de ambos pudiera deberse a un fenómeno de control biológico del frijol sobre los depredadores del maíz, como el reportado por (Hernández-Gutiérrez, 2010).

### **(3) *Análisis individual de la calabaza***

La calabaza por su parte presentó una dinámica similar a la del maíz y del frijol considerando los distintos escenarios de perturbación (Tabla 3 y 4). Visualmente podemos notar que aquellos tratamientos ubicados en contextos donde las arvenses podían afectar el riesgo relativo asociado a la siembra de la calabaza fue mayor en comparación con los escenarios de sequía y bajo influencia de los herbívoros (Figura 8c). En cuanto a sus permanencias éstas se comportaron de manera similar a las del frijol enredador, siendo menores bajo la influencia de las arvenses, seguidas de aquellos tratamientos donde podía haber sequía y finalmente presentando los valores mayores en aquellos escenarios donde los herbívoros podían tener efectos (Tabla 3).

Al considerar las variables de manejo, se encontró que la calabaza solo tuvo permanencias diferentes de cero en los casos en los que se implementó un manejo que involucrara desyerbe manual (Tabla 3, Figura 8e), lo cual cuadra perfectamente con la ecología del organismo, ya que si se le aplica un herbicida de manera indiscriminada al estrato herbáceo se eliminará tanto a las arvenses como a este cultivo (Tabla 5). Ahora bien, observando los resultados asociados a aquellos tratamientos en donde se usó o no insecticida tenemos claramente que los primeros fueron menos permanentes que los segundos (Tabla 3, Figura 8d), situación que es contraria a lo observado para el maíz y el frijol. Esto es explicado por el hecho de que la calabaza requiere de polinizadores para completar su ciclo agrícola (Tabla 5), por tanto el uso de insecticidas afecta directamente a éstos y repercute en el hecho de que la calabaza no pueda completar su ciclo. Paralelamente los riesgos asociados al uso de insecticidas para el cultivo de la calabaza son mayores en comparación con el tratamiento donde no se le utiliza (Tabla 4).

Por otra parte las distintas combinaciones de policultivo bajo las que se modeló la siembra de la calabaza no generaron efectos significativos sobre sus permanencias y riesgos asociados (Figura 8d).

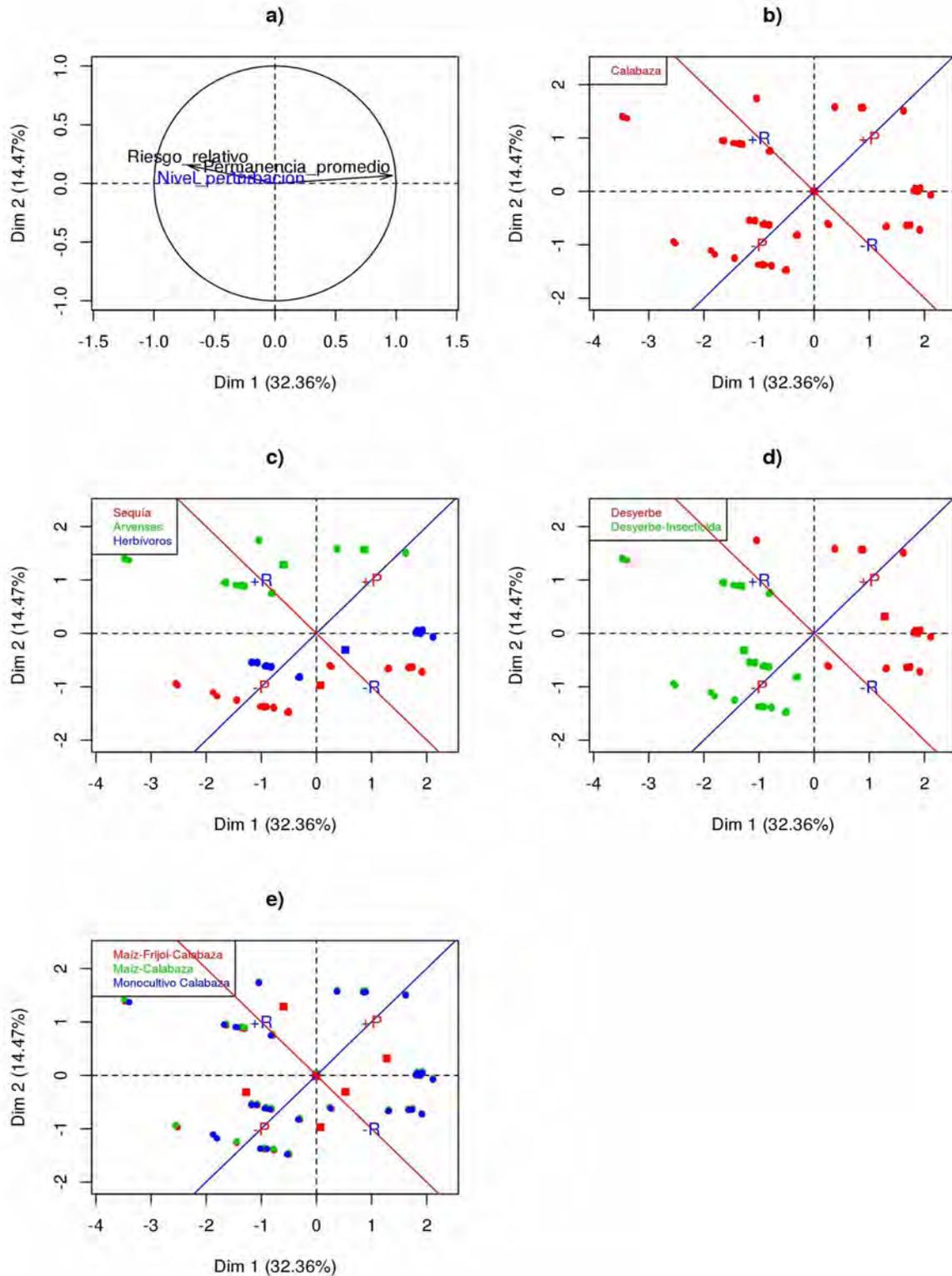


Figura 7: FAMD para la permanencia individual de la calabaza. a) Mapa de correlación entre la permanencia y el riesgo relativo. Distribución de los tratamientos de acuerdo con las dimensiones estimadas según el b) Tipo de permanencia, c) Tipo de perturbación, d) Tipo de manejo de los insumos, e) Tipo de policultivo implementado. Cada uno de estos últimos cuatro gráficos está dividido en cuatro regiones, la línea roja separa las zonas de más y menos permanencia, indicadas por los símbolos +P y -P, y la azul la de mayor y menor riesgo, señaladas por los símbolos +R y -R.

#### ***(4) Análisis individual de los quelites***

La influencia de las arvenses generó condiciones en las que los quelites presentaron sus mayores permanencias, mientras que los riesgos relativos correspondientes también fueron más elevados en este contexto (Tablas 3 y 4). Esto puede interpretarse partiendo del hecho de que los quelites mismos suelen ser catalogados como arvenses, y de hecho dentro de este modelo su aparición repentina fue un factor que contribuyó a construir los escenarios de perturbación. No obstante, lo anterior es capturado por la medida de riesgo, ya que contrario a lo observado en los cultivos antes analizados, este aumento de la permanencia no provocó un decremento en el riesgo (Tabla 4), y esto se debe muy probablemente a que el modelo contempla que al aparecer las arvenses en un instante temporal determinado, ya sea de manera esperada o inesperada, el manejo de las mismas se da en el instante siguiente.

En términos prácticos, pese a que los quelites tienen una oportunidad de establecerse dentro de la parcela dicha oportunidad solo culmina exitosamente en aquellos escenarios que no usan herbicidas sino desyerbe manual, aunque este efecto solo pudo comprobarse visualmente (Figura 9d) y no mediante criterios de significancia (Tabla 3). Por otra parte los escenarios de sequía fueron los que menores permanencias registraron para los quelites en comparación con aquellos donde influyeron las arvenses o los herbívoros (Tabla 3, Figura 9c). Esto puede deberse a que el factor limitante de los quelites y los no quelites dentro de este modelo, si no fue el espacio lo fue el agua.

En cuanto a los esquemas de policultivo, los quelites tuvieron un comportamiento cualitativamente distinto al de los cultivos, ya que sí presentaron diferencias significativas. Las mayores permanencias y menores riesgos los presentaron en los esquemas de riqueza de cultivos donde no hubo calabaza (Figura 9d y Tablas 3 y 4). Por tanto es interesante notar que mientras esta variable sí afectó de manera diferencial y significativa las permanencias y riesgos de los quelites, los esquemas de manejo no lo hicieron así, situación contraria a la observada para los cultivos. Esto es importante, ya que pone sobre la mesa la pregunta de cómo es que se comportará la medida de permanencia conjunta y de si alguno de los grupos de vegetación tendrá una influencia predominante en dicho comportamiento.

#### ***(5) Análisis conjunto de los cultivos y los quelites***

El análisis conjunto de los cultivos y los quelites reflejó resultados cualitativamente distinto a los obtenidos mediante su análisis individual. Considerando los escenarios de perturbación planteados, las menores permanencias conjuntas y mayores riesgos fueron registradas bajo los efectos de la sequía y no de las arvenses (Tablas 3 y 4, Figura 6c), situación que no se había observado en el análisis individual de ningún cultivo. Esto se debe principalmente al hecho ya mencionado, de que las arvenses comprenden también a los quelites.

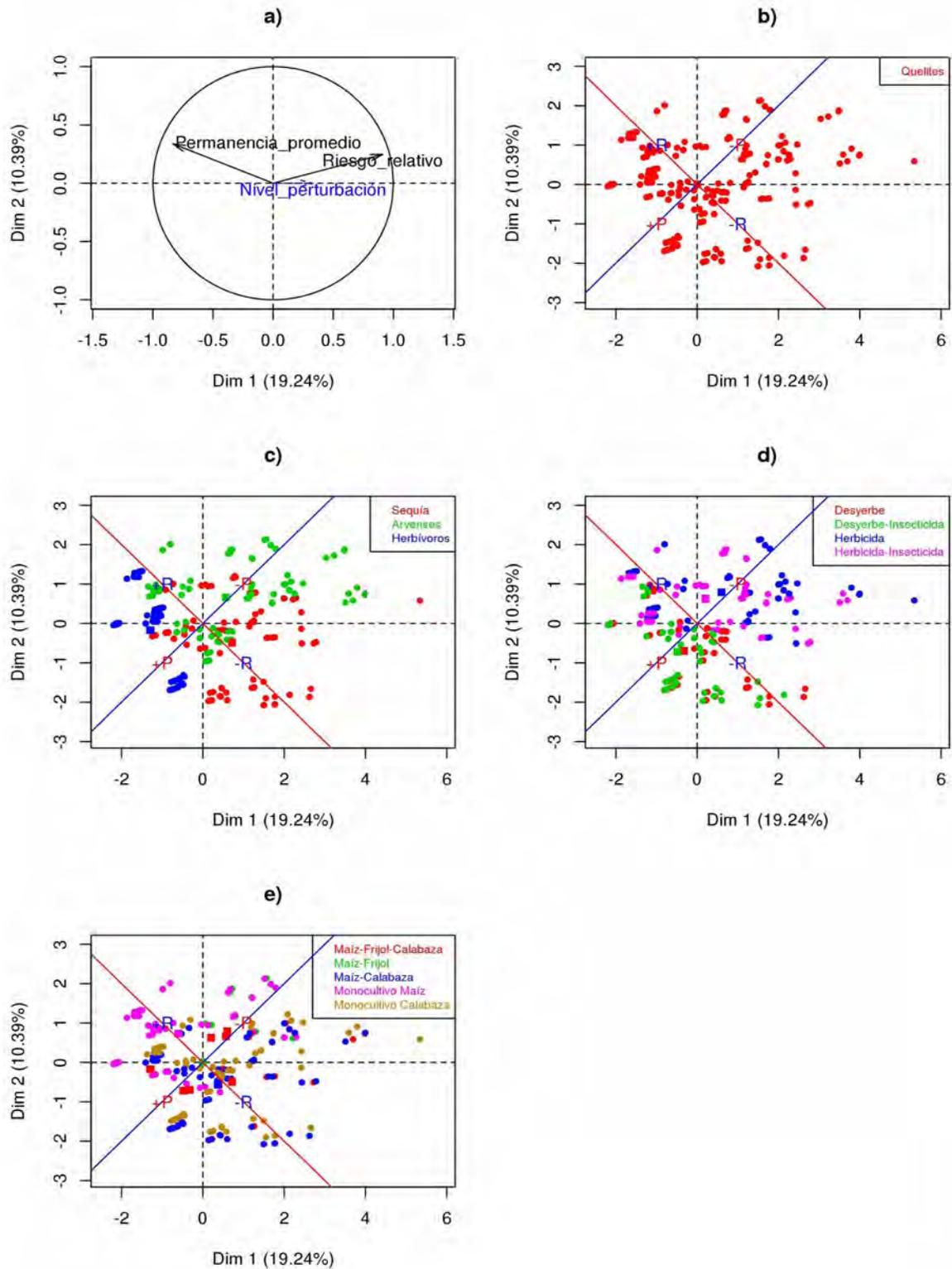


Figura 8: FAMD para la permanencia individual de los quelites. a) Mapa de correlación entre la permanencia y el riesgo relativo. Distribución de los tratamientos de acuerdo con las dimensiones estimadas según el b) Tipo de permanencia, c) Tipo de perturbación, d) Tipo de manejo de los insumos, e) Tipo de policultivo implementado. Cada uno de estos últimos cuatro gráficos está dividido en cuatro regiones, la línea roja separa las zonas de más y menos permanencia, indicadas por los símbolos +P y -P, y la azul la de mayor y menor riesgo, señaladas por los símbolos +R y -R.

En cuanto a los esquemas del uso de agroinsumos, los manejos con mayores permanencias conjuntas fueron aquellos en los que se utilizó algún tipo de herbicida y de insecticida de manera simultánea (Tabla 3, Figura 6d). Esto nos hace pensar que pese a que los quelites seguramente están jugando un papel importante en elevar los valores de la permanencia conjunta no puede descuidarse su control al momento de sembrar a los cultivos. Los manejos sin herbicida estuvieron ambos a la par en lo que a permanencias se refiere y finalmente se ubicó aquél en el que solo se implementó herbicida (Tabla 3). Esto sugiere que existen dos escenarios óptimos dependiendo de si se desea cultivar calabaza o aprovechar a los quelites.

Lo anterior se corrobora al evaluar el comportamiento de la permanencia conjunta bajo los distintos esquemas de policultivo, ya que se tienen dos grupos de escenarios: aquéllos donde hay calabaza y aquéllos donde no hay (Figura 6d y 6e), encontrando mayores valores de permanencia en los segundos en comparación con los primeros. Esto se debe al ya mencionado hecho de que la calabaza desplaza a los quelites debido al espacio que ocupa en la parcela y al ser un cultivo con permanencias bajas y riesgos asociados relativamente altos se puede entender que no contribuya tanto a elevar la permanencia conjunta. Los riesgos asociados a los distintos esquemas de uso de insumos sugieren que aquellos en los que se implementa el desyerbe presentan riesgos menores que los que usan herbicidas, situación que cuadra con el comportamiento de los valores de permanencia. Mientras que al considerar los distintos esquemas de policultivo se tiene que el riesgo disminuye conforme se simplifica la parcela (Tabla 4), situación ya reportada por Vandermeer y Schultz (1990).

A continuación se realizará la discusión de los resultados anteriormente presentados utilizando algunos gráficos descriptivos y la literatura consultada para enriquecer los alcances de este trabajo. En una primera sección se presenta una recapitulación de los supuestos y limitaciones del modelo y partiendo de ello se construye el texto de la discusión de los resultados obtenidos mediante el análisis estadístico. De igual manera se cuestionará el cumplimiento o rechazo de la hipótesis general del trabajo y se hablará de los alcances del mismo así como de algunas mejoras posibles a corto y mediano plazo.

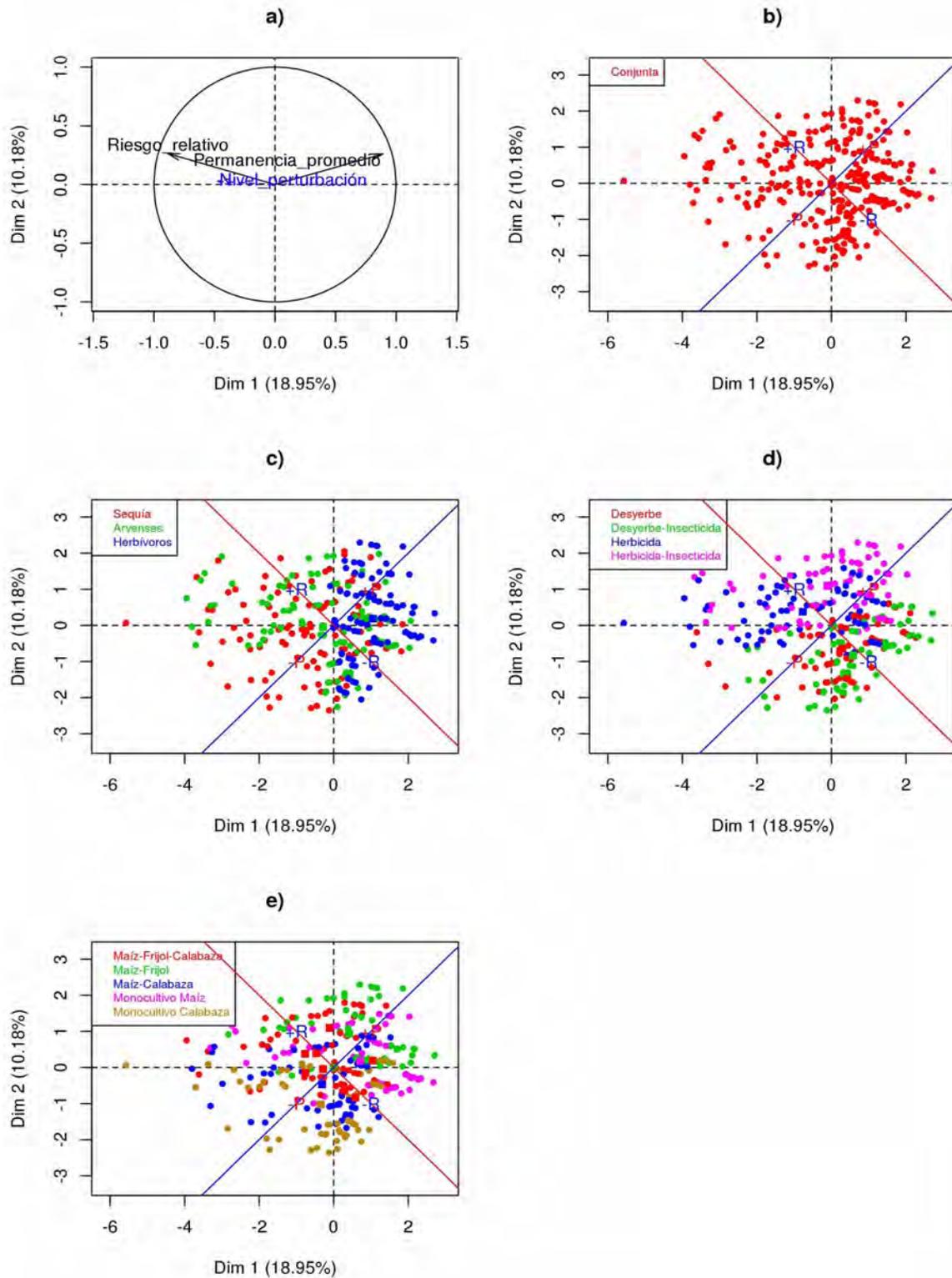


Figura 9: FAMD para la permanencia conjunta. a) Mapa de correlación entre la permanencia y el riesgo relativo. Distribución de los tratamientos de acuerdo con las dimensiones estimadas según el b) Tipo de permanencia, c) Tipo de perturbación, d) Tipo de manejo de los insumos, e) Tipo de policultivo implementado. Cada uno de estos últimos cuatro gráficos está dividido en cuatro regiones, la línea roja separa las zonas de más y menos permanencia, indicadas por los símbolos +P y -P, y la azul la de mayor y menor riesgo, señaladas por los símbolos +R y -R.

*Tabla 3: Resultados del análisis de regresión para evaluar el comportamiento de la permanencia promedio. El formato de los resultados corresponde al estilo usual con el que se generan los análisis hechos en R. Esto es utilizando un tratamiento de referencia, que en este caso es el policultivo de maíz-frijol-calabaza manejado con desyerbe manual, para calcular los coeficientes asociados a cada tratamiento, e.g. para el cálculo de la permanencia individual del maíz bajo el tratamiento de policultivo de maíz frijol con desyerbe-insecticida sumariamos 0 al valor asociado al tratamiento de referencia debido a que el coeficiente estimado para el maíz-frijol no resultó significativamente diferente pero sí le sumariamos el valor asociado al manejo de desyerbe-insecticida ya que éste sí lo fue.*

	Variable dependiente				
	Individual maíz	Individual frijol	Permanencia promedio		Conjunta
			Individual calabaza	Individual quelites	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
RiquezaMaíz-Frijol	-0.002 (0.015)	-0.003 (0.014)		0.062*** (0.014)	0.046*** (0.012)
RiquezaMaíz-Calabaza	0.001 (0.015)		-0.0001 (0.013)	0.0004 (0.014)	-0.011 (0.012)
RiquezaMonocultivo Maíz	-0.0001 (0.015)			0.062*** (0.014)	0.042*** (0.012)
RiquezaMonocultivo Calabaza			-0.001 (0.013)	0.003 (0.014)	-0.024* (0.012)
ManejoDesyerbe-Insecticida	0.146*** (0.014)	0.150*** (0.020)	-0.230*** (0.010)	0.005 (0.013)	0.007 (0.011)
ManejoHerbicida	-0.053*** (0.015)	-0.048** (0.020)		0.001 (0.013)	-0.022* (0.011)
ManejoHerbicida-Insecticida	0.069*** (0.015)	0.069*** (0.020)		0.011 (0.013)	0.019* (0.011)
PerturbaciónArvenses	-0.015 (0.013)	-0.035** (0.018)	-0.045*** (0.013)	0.031*** (0.011)	0.021** (0.010)
PerturbaciónHerbívoros	0.097*** (0.012)	0.077*** (0.017)	0.044*** (0.013)	0.076*** (0.011)	0.078*** (0.010)
Nivel_perturbación	-0.545*** (0.030)	-0.516*** (0.042)	-0.221*** (0.030)	-0.185*** (0.026)	-0.272*** (0.023)
Tratamiento de referencia	0.408*** (0.016)	0.421*** (0.020)	0.387*** (0.014)	0.284*** (0.015)	0.330*** (0.013)
Observaciones	224	112	90	300	300
R <sup>2</sup>	0.733	0.733	0.877	0.338	0.495
R <sup>2</sup> ajustada	1	0.722	0.715	0.315	0.478
Error estándar de los residuales	0.077 (gl = 214)	0.076 (gl = 104)	0.049 (gl = 83)	0.077 (gl = 289)	0.067 (gl = 289)
Estadístico F	65.434*** (gl = 9; 214)	40.812*** (gl = 7; 104)	98.794*** (gl = 6; 83)	14.738*** (gl = 10; 289)	28.337*** (gl = 10; 289)

\*p<0.1; \*\*p<0.05; \*\*\*p<0.01

Tabla 4: Resultados del análisis de regresión para evaluar el comportamiento de la riesgo relativo. El formato de los resultados corresponde al estilo usual con el que se generan los análisis hechos en R. Esto es utilizando un tratamiento de referencia, que en este caso es el policultivo de maíz-frijol-calabaza manejado con desyerbe manual, para calcular los coeficientes asociados a cada tratamiento, e.g. para el cálculo del riesgo relativo del maíz bajo el tratamiento de policultivo de maíz frijol con desyerbe-insecticida sumáramos 0 al valor asociado al tratamiento de referencia debido a que el coeficiente estimado para el maíz-frijol no resultó significativamente diferente pero sí le sumáramos el valor asociado al manejo de desyerbe-insecticida ya que éste sí lo fue.

	Variable dependiente				
	Riesgo relativo de la permanencia promedio				
	Individual maíz	Individual frijol	Individual calabaza	Individual quelites	Conjunta
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
RiquezaMaíz-Frijol	0.016 (0.025)	0.015 (0.024)		-0.021* (0.012)	-0.024** (0.011)
RiquezaMaíz-Calabaza	-0.008 (0.025)		0.001 (0.058)	-0.001 (0.012)	-0.024** (0.011)
RiquezaMonocultivo Maíz	0.005 (0.025)			-0.022* (0.012)	-0.051*** (0.011)
RiquezaMonocultivo Calabaza			0.001 (0.058)	0.008 (0.012)	-0.034*** (0.011)
ManejoDesyerbe-Insecticida	-0.071*** (0.024)	-0.073** (0.033)	0.291*** (0.047)	-0.009 (0.011)	-0.015 (0.010)
ManejoHerbicida	-0.001 (0.025)	-0.014 (0.034)		0.079*** (0.011)	0.063*** (0.010)
ManejoHerbicida-Insecticida	-0.059** (0.025)	-0.039 (0.034)		0.055*** (0.011)	0.051*** (0.010)
PerturbaciónArvenses	-0.004 (0.022)	0.031 (0.030)	0.139** (0.058)	0.017* (0.009)	-0.016* (0.008)
PerturbaciónHerbívoros	-0.119*** (0.021)	-0.092*** (0.029)	-0.037 (0.058)	-0.095*** (0.009)	-0.064*** (0.008)
Nivel_perturbación	1.120*** (0.051)	1.108*** (0.070)	1.894*** (0.139)	0.268*** (0.022)	0.337*** (0.020)
Tratamiento de referencia	0.168*** (0.028)	0.141*** (0.034)	-0.097 (0.064)	0.035*** (0.013)	0.082*** (0.012)
Observaciones	224	112	90	300	300
R <sup>2</sup>	0.710	0.722	0.739	0.601	0.611
R <sup>2</sup> ajustada	1 0.698	0.704	0.720	0.588	0.597
Error estándar de los residuales	0.131 (gl = 214)	0.127 (gl = 104)	0.225 (gl = 83)	0.065 (gl = 289)	0.060 (gl = 289)
Estadístico F	58.217*** (gl = 9; 214)	38.665*** (gl = 7; 104)	39.082*** (gl = 6; 83)	43.612*** (gl = 10; 289)	45.352*** (gl = 10; 289)

\*p<0.1; \*\*p<0.05; \*\*\*p<0.01

## Discusión

Los dos primeros objetivos de este trabajo abarcaron la construcción de un modelo y la generación de una dinámica que fuera interpretable en términos agroecológicos. La realización de lo anterior conllevó la aceptación de ciertos supuestos, varios de éstos de manera *a priori* a la construcción del modelo y otros que se descubrieron o se definieron durante la etapa de experimentación. A continuación se muestra una recapitulación de los mismos con el fin de tener claros los alcances y limitaciones de las interpretaciones que guiaron la discusión de los resultados obtenidos.

### Supuestos y limitaciones del modelo

- Se propuso una red booleana en donde se simuló la dinámica del agroecosistema milpa a partir de un esquema de actualización sincrónico en donde cada iteración representó dos meses. Este esquema de actualización permitió observar el efecto promedio de todos los elementos del sistema actuando a la vez dentro de cada iteración.
- Este modelo busca recrear las condiciones de una milpa promedio construida a partir de la información recabada (ver Tabla 5).
- Solo se está considerando la dinámica ecológica de la parte aérea del agroecosistema, en consecuencia las dinámicas ecológicas relacionadas con el suelo y las propias de éste están siendo obviadas, *e.g.* no se modela el barbecho ya que sus efectos están intrínsecamente relacionados con el suelo.
- Para aquellos nodos en los que aplica, no se están considerando interacciones intraespecíficas tales como la densodependencia de las poblaciones por competencia de este tipo.
- Los nodos interactúan en la escala espacial de una parcela abstracta de una extensión menor o igual a 2 ha<sup>10</sup> en donde al interior de la misma la distribución espacial de los elementos bióticos es homogénea, *i.e.* no hay consideraciones espacialmente explícitas en cuanto a densidades de cultivo que afecten las interacciones entre los nodos del modelo. Esto se hizo así debido a que se buscó evitar el aumento de la complejidad analítica que se ha observado en otros trabajos (García-Barrios et al., 2001).
- La vegetación de borde, de estar presente, se representa como un ente abstracto que tiene un efecto homogéneo hacia todo el interior de la parcela. Vale la pena hacer notar este punto, ya que en la vida real el considerar el espacio generaría un gradiente de influencia, *e.g.* una parcela muy grande verá el efecto del borde cada vez más disminuido conforme uno se aproxima al centro de la misma (Altieri & Trujilo, 1987).
- El campesino representa un elemento de tipo únicamente reactivo al interior de cada tratamiento, es decir, no se ve afectado como tal en su economía, longevidad o nutrición y sólo se manifiesta mediante ciertas acciones de manejo.
- Los elementos del subsistema clima sólo están presentes en la parcela como condiciones ambientales externas, ya que ningún elemento de la parcela afecta al clima. Es decir, modificar a este subsistema representa una perturbación extrínseca que sólo se disipa en un sentido sin volver a afectar a los elementos de este subsistema.
- Cada tratamiento alcanzó un conjunto de escenarios estables de los cuales se seleccionó a aquél

---

10 Es una cantidad empleada para definir a los agricultores pequeños (Müssel, Hopfensitz, & Kestler, 2010), y en este trabajo mucha de la información recabada y manejos evaluados se corresponden más con esta escala de producción.

subconjunto con sentido ecológico. Lo anterior se estableció a partir del periodo de los mismos, requiriéndose que éste fuera mayor o igual a seis, debido a que era la duración mínima requerida para generar una dinámica climática anual con sentido.

- El hecho de que se hable de un escenario estable no implica que no haya disminución de la permanencia o la riqueza de especies (ver definición de estabilidad en el apartado de Modelación dinámica de redes ecológicas)
- La riqueza de cultivos y en general de los demás elementos bióticos del ecosistema al interior de cada escenario estable no puede aumentar sino solo mantenerse o disminuir, *i.e.* no hay invasiones o adición de nuevos nodos pero sí puede haber extinciones a manera de desactivaciones permanentes de los nodos.

## Discusión de los resultados del análisis estadístico

Con el fin discutir y analizar de manera más amena, condensada y clara el conjunto de resultados obtenidos a partir del análisis estadístico, se generaron dos gráficos exploratorios para acompañar su discusión. Es importante hacer la observación de que las afirmaciones que se mencionan en esta sección hacen referencia en su mayoría a resultados estadísticamente significativos y a aquellos detectados como cualitativamente relevantes. En la Figura 10 se presentan las permanencias promedio individuales y conjuntas para todos los tratamientos ante los tres tipos de perturbaciones: herbívoros, sequía y arvenses, mientras que en la Figura 11 el equivalente pero para riesgos relativos. La única variable que no se está mostrando es el nivel de perturbación, esto debido a que sistemáticamente al aumentar ésta la permanencia promedio tendió a disminuir, así como el riesgo relativo a aumentar (ver Tablas 3 y 4).

En cada gráfico se muestran por paquetes de cinco separados por líneas verticales a las permanencias estimadas para cada combinación de cultivos. A su vez estos conjuntos se presentan agrupados en colecciones de cuatro que se corresponden con el tipo de manejo implementado en el tratamiento. De manera general puede observarse que todas las permanencias promedio respectivas a cada tipo de perturbación presentaron decrementos en comparación con el promedio global de las permanencias, sin embargo, la medida que en realidad puede sugerirnos visualmente distintos efectos es la distancia entre las medianas de las permanencias de los tratamientos y la mediana global, ya que esta medida es más robusta. Con base en esto puede concluirse que los tratamientos bajo la influencia de las arvenses (Figura 10c) presentaron las menores permanencias de todo el experimento, siendo seguidos por aquellos bajo el efecto de las sequías (10b) y finalmente por en los que los herbívoros estuvieron presentes (10a). Lo anterior refleja de manera general que el modelo parece ser más sensible a la influencia de las arvenses, seguido este comportamiento por el efecto que tienen las sequías y finalmente el de los herbívoros. Esto cuadra con lo reportado por (Basurto-Peña, 1982, 2000; González-Rodríguez, 2014; Martínez-Domínguez, 2006; Vieyra-Odilon & Vibrans, 2001) con respecto a la influencia negativa de las arvenses en las etapas tempranas de los cultivos, razón por la cual se realizan las “escardas”, “primera” y “segunda” (Altieri & Trujillo, 1987; González-Rodríguez, 2014).

Estas mayores permanencias y menores riesgos registrados en un contexto donde los herbívoros podían afectar al cultivo pueden estar relacionados con el hecho de que los manejos con insecticida presentaron mayores permanencias que aquellos tratamientos que carecieron de éste (Figura 10 y 11a). Es necesario recordar que el insecticida en este modelo tiene un uso bastante conservador, es decir, no

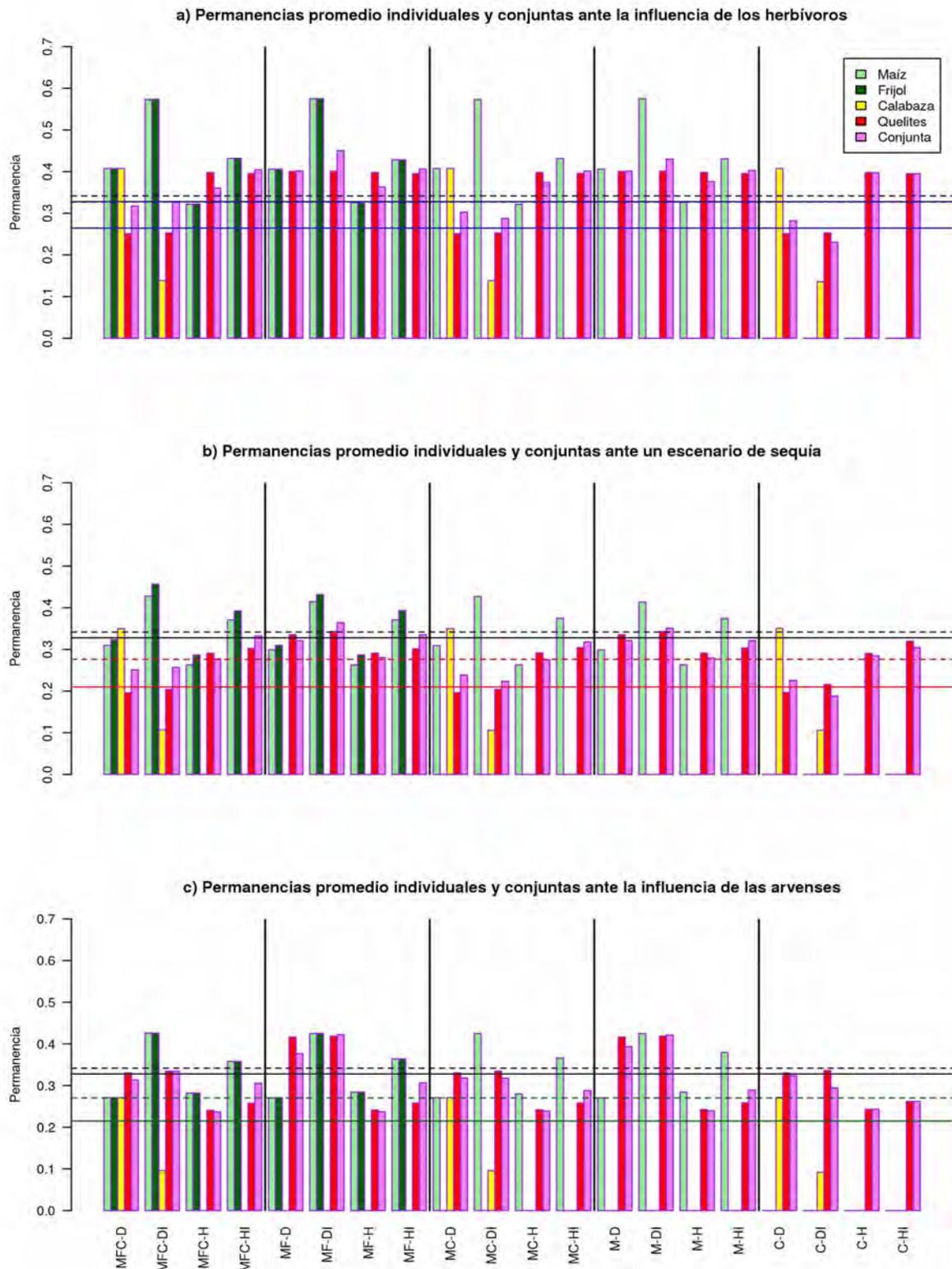


Figura 10: Permanencias promedio de todos los tratamientos ante los tres distintos escenarios de perturbación. El valor de permanencia mostrado para cada cultivo se calculó como el promedio de los valores obtenidos para los distintos niveles de perturbación. Cada tratamiento se presenta como dos pares de combinaciones de letras, en donde M=maíz, F=frijol, C=calabaza, D=desyerbe, H=herbicida e I=insecticida. Las líneas horizontales sólidas representan valores promedio mientras que las punteadas valores de las medianas. Los pares de líneas negras corresponden al promedio y mediana globales, mientras que para el promedio y mediana asociados a los escenarios afectados por las arvenses les corresponde el color verde, a los afectados por la sequía el rojo y por los herbívoros el azul.

se aplica indiscriminadamente sino solo ante la aparición de los herbívoros. Por lo tanto este modelo está reflejando que el uso de este agroinsumo no es necesariamente dañino bajo este esquema. Esto es más parecido al uso de un antibiótico cuando un paciente en realidad está enfermo y no a la automedicación indiscriminada y sin dosificar que puede promover el desarrollo de poblaciones resistentes. Esta visión epidemiológica y sus resultados asociados cuadran con lo mencionado por Vandermeer (2010), con que un correcto manejo de los herbívoros, por ejemplo con algún insecticida no dañino para la salud del ser humano o para organismos no blanco, puede derivar en escenarios favorables para el agricultor. Situación que es corroborada por la mayoría de los valores de vulnerabilidad que se presentan en la figura 11a, b y c, siendo los manejos que utilizaron insecticida aquéllos que tuvieron los menores riesgos relativos asociados a sus permanencias.

Estos valores de permanencia y riesgo dentro de estos escenarios bajo influencia de los herbívoros (Figuras 10a y 11a) cuadran con la visión neutral e incluso benéfica que tienen ciertos campesinos guatemaltecos (Morales & Perfecto, 2000) o algunos agricultores tlaxcaltecas de los herbívoros por debajo de ciertas densidades (Altieri & Trujillo, 1987). Con relación a esto se tiene también lo presentado en la Figura 3, en la que pudo observarse que un factor fundamental para que los cultivos presentaran cosecha al interior de los escenarios estables fue la sincronización adecuada entre los ciclos de cultivo y los ciclos de los herbívoros y sus depredadores, situación que al menos en esta simulación parece haber marcado la diferencia entre tener cosecha o no. De aquí se desprende la posible recomendación de ahondar en la investigación e innovación en cuanto a las formas que hay para influenciar la ocurrencia de los herbívoros con el fin de poder determinar las fechas óptimas de siembra (González-Rodríguez, 2014). Además, el hecho de buscar el empalmen adecuado entre los distintos ciclos refuerza la hipótesis teórica generada por May (1971) de que las dinámicas tipo depredador-presa son dinámicas estabilizadoras dentro de una red de interacciones ecológicas.

En cuanto al efecto aminorado de las sequías en comparación con el de las arvenses, el cual puede observarse al comparar las medianas de ambas distribuciones (Figuras 10b y 10c), tiene que precisarse la definición del tipo de sequía que se está modelando para poder ser discutido. Se trata de una sequía puntual de duración bimestral que en un mismo año puede durar a lo más seis meses. Por lo tanto, los mayores efectos de las sequías simuladas en este modelo se tendrán en aquellos escenarios en los que el campesino haya decidido sembrar y repentinamente las lluvias no se presenten al siguiente bimestre. Una observación interesante radica en el número de meses de lluvia que el maíz requiere dentro de este modelo para crecer y dar fruto dentro del modelo, siendo éste de cuatro (Ver Tabla 5) y equivaliendo a dos en cuanto a número de iteraciones dentro de cada escenario estable. Esto le da oportunidad al campesino de que si existe un desfase de dos meses en el inicio de la época de lluvias o experimenta un acortamiento el maíz no pierde la oportunidad de presentar rendimientos. Esta situación muy probablemente ayudó a aminorar el efecto de la perturbación sequía sobre las permanencias de los tratamientos. Esta capacidad de responder ante el desfase de las lluvias también se observa al considerar la temporalidad con la que los distintos cultivos rinden frutos, tanto porque son sembrados en tiempos diferentes como por su biología y la manera en que éstos sincronizan sus ciclos de producción, situación que se observa en la Sierra Norte de Puebla en los policultivos de maíz y frijol (Basurto-Peña, 2000; González-Rodríguez, 2014) o en el centro del país en el altiplano tlaxcalteca (Altieri & Trujillo, 1987).

Otra situación que puede observarse respecto a los escenarios afectados por la sequía es que los

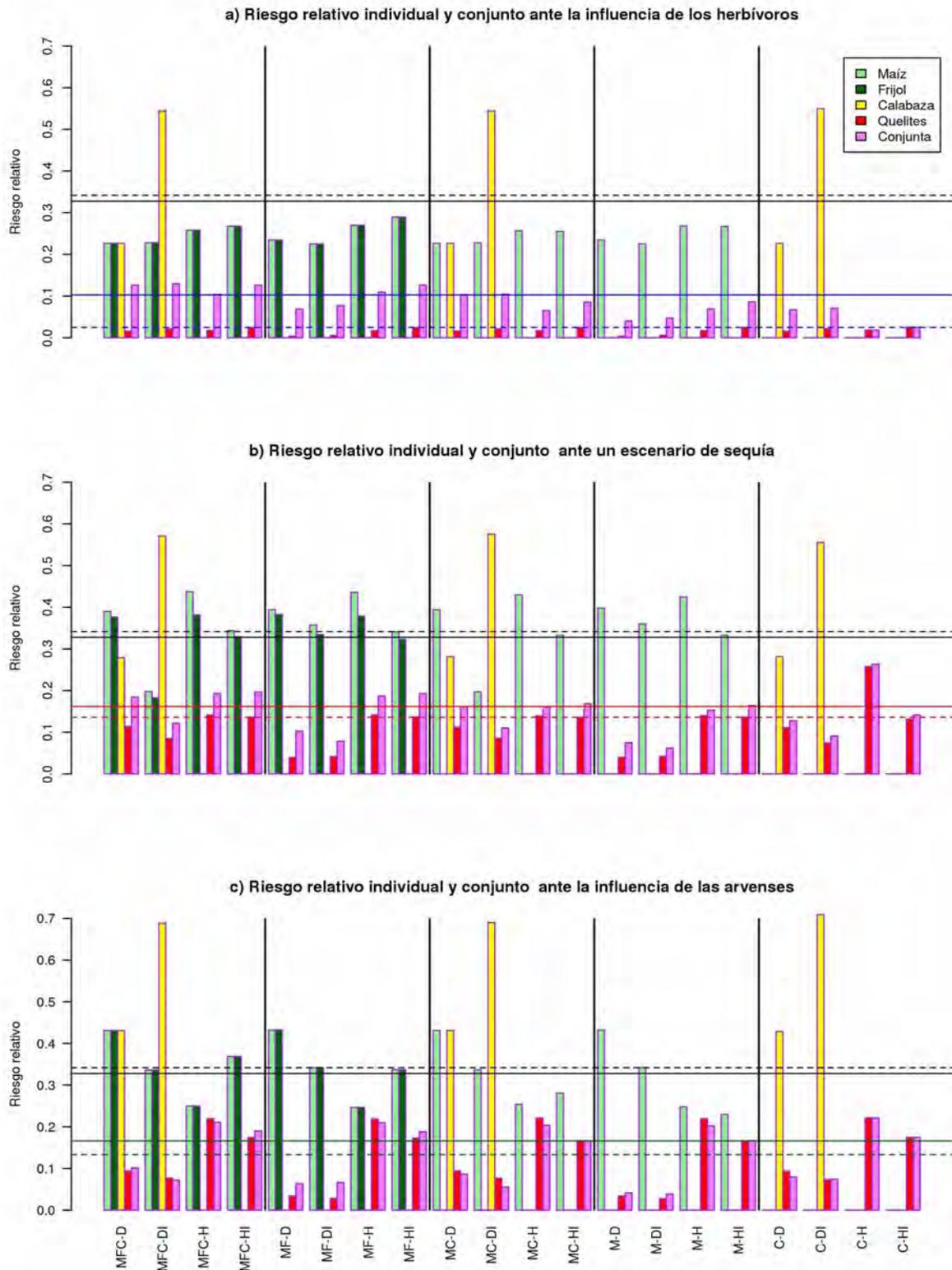


Figura 11: Riesgos relativos promedio de todos los tratamientos ante los tres distintos escenarios de perturbación. El valor de riesgo mostrado para cada cultivo se calculó como el promedio de los valores obtenidos para los distintos niveles de perturbación. Cada tratamiento se presenta como dos pares de combinaciones de letras, en donde M=maíz, F=frijol, C=calabaza, D=desyerbe, H=herbicida e I=insecticida. Las líneas horizontales sólidas representan valores promedio mientras que las punteadas valores de las medianas. Los pares de líneas negras corresponden al promedio y mediana globales, mientras que para el promedio y mediana asociados a los escenarios afectados por las arvenses les corresponde el color verde, a los afectados por la sequía el rojo y por los herbívoros el azul.

tratamientos con desyerbe (D) y desyerbe insecticida (DI) de la figura 10b presentan permanencias sistemáticamente mayores que aquellos en los que se empleó herbicida (H) o herbicida insecticida (HI). De esto puede sugerirse que manejos menos tecnificados de la vegetación parecen presentar una mayor resistencia de sus permanencias a la sequía. Esto es corroborado en cierta medida por lo reportado por Del Val y colaboradores (2013), quienes entre otros resultados, observaron que parcelas de maíz manejadas más orgánicamente o mediante rotación de los cultivos presentaron una mayor resiliencia a lo largo de tres años teniendo un año de sequía, en lo que a los valores de abundancia de gallina ciega se refiere, en comparación con una parcela manejada convencionalmente. Lo anterior permite sugerir entonces que los efectos de la variabilidad climática no necesariamente van a observarse directamente sobre un cultivo concreto sino en combinación con los efectos de su manejo. Ejemplo de lo anterior puede ser la proliferación de las poblaciones de herbívoros y arvenses, situación que se plantea como una posible consecuencia del cambio climático y en concreto del aumento en la temperatura de ciertas regiones (Altieri & Nicholls, 2009; Ebel et al, 2017). La influencia de la sequía en lo anterior ha sido corroborada para ciertas especies de herbívoros por campesinos de Tlaxcala (Altieri & Trujillo, 1987).

Ahora bien, considerando que los dos tipos de manejo en los que se empleó algún tipo de insecticida se caracterizaron por presentar permanencias altas de frijol, maíz y quelites, pero sobre todo de frijol y maíz (10a, b y c), podemos sugerir que el tipo de modelo construido tiene dos cultivos que implementados mediante el uso de insecticida presentan las mayores permanencias de la simulación. Este comportamiento de las permanencias se observó de manera sistemática sin importar el tipo de perturbación considerado. Esto es consistente con lo encontrado por Ebel y colaboradores (2017) respecto a que la combinación maíz-frijol suele ser más productiva que cualquier otra de las probadas en este trabajo, de igual manera esto mismo es corroborado por el análisis teórico y la revisión de literatura hecha por Vandermeer (2010) en donde la combinación de policultivo más exitosa resulta ser la de una gramínea y una legumbre. En cuanto al tipo de manejo, Del Val y colaboradores (2013) encontraron que una parcela de maíz manejada convencionalmente presentó mayores rendimientos que otras manejadas más orgánicamente, situación que coincide en este trabajo al menos en lo que al uso de insecticida se refiere. Estos resultados empíricos coinciden con los obtenidos teóricamente en este trabajo en sus efectos pero no en sus causas, ya que en la tesis en cuestión no se están considerando los efectos de los fertilizantes sobre los cultivos. No obstante, es interesante notar que se sigue rescatando el mismo patrón, lo cual sugeriría que el efecto de los insecticidas puede no ser tan despreciable para mejorar los rendimientos de los cultivos si el suelo se encuentra en un estado que no requiera de fertilizantes externos.

Analizando la dinámica de la calabaza tenemos que ésta no sigue un comportamiento como el de los otros cultivos, ya que no puede ser cultivada si se utiliza herbicida o si se permite la presencia excesiva de arvenses al interior de la parcela (ver Tabla 5). Observando las figuras 10 y 11 tenemos que los tratamientos que más favorecen la permanencia de la calabaza y presentan los menores riesgos relativos son aquéllos en donde se practicó solo desyerbe manual. Esto debido seguramente a que los tratamientos que emplearon algún tipo de insecticida provocaron un decremento en la presencia de los polinizadores, los cuales son actores esenciales para el ciclo de vida de este cultivo (Hurd et al., 1974). Este efecto mitigado del insecticida puede deberse a la influencia de la vegetación de borde y de los quelites como atractores de los mismos, situación observada en otros policultivos que involucran calabaza en la vida real (Altieri & Trujillo, 1987). Por otra parte, a diferencia de este efecto mutualista de la vegetación asociada hacia la calabaza, la perturbación que más afectó negativamente sus

permanencias y vulnerabilidades fue la del efecto de las arvenses. Esto puede entenderse debido al fenómeno de exclusión competitiva (Vandermeer, 2010), ya que ambos grupos de organismos compiten espacialmente por el mismo nicho o uno muy similar. Sin embargo, el mismo Vandermeer (2010) plantea que dicha exclusión puede derivar en el fenómeno de producción competitiva, sin embargo, esto parece reservarse solo para escenarios en donde la diversidad biológica es mucho mayor y donde los campesinos ven a las arvenses mayoritariamente como quelites (Vieyra-Odilón & Vibrans, 2001).

Los quelites por su parte son en su mayoría arvenses, entonces resultó interesante observar su comportamiento tanto a nivel de permanencia como a nivel de perturbación. Como lo indica la intuición, este grupo de plantas presentó los mayores valores de este atributo en los escenarios donde se realizó desyerbe manual, el cual fue selectivo (ver Tabla 5) y en los que la calabaza estuvo ausente, teniéndose de nuevo el fenómeno de exclusión competitiva. Por otra parte podemos observar que bajo la influencia de los herbívoros (Figura 10a) y en escenarios libres de calabaza, insecticidas y herbicidas, la combinación maíz-frijol-quelites presentó el fenómeno en donde las permanencias de los quelites incluso rebasaban a las de éstos (Figura a, manejo MF-D), situación que refuerza la idea de que la diversificación puede acarrear beneficios, siendo uno de éstos, como se discutirá más adelante la disminución del riesgo relativo asociado a cada una de las permanencias de estos tres elementos (Figura 11a).

Respecto a los distintos tipos de perturbación puede señalarse que los quelites parecen haber presentado un comportamiento más homogéneo al comparar los valores de permanencia obtenidos (Figura 10a, b y c). No obstante, si observamos la dinámica de los demás cultivos en relación con la de los quelites al interior de cada perturbación podemos observar que en el caso de las arvenses los quelites no vieron tan mermadas sus permanencias como los cultivos (Figura 10c), al menos en comparación con la perturbación herbívoros que fue donde, al igual que los cultivos, los quelites presentaron sus mayores valores (Figura 10a). Lo anterior puede interpretarse como un refuerzo para suponer que los quelites son más resilientes que el resto de los cultivos por su cualidad de ser vegetación con un cierto nivel de domesticación y a la vez seguir creciendo sin la necesidad imperativa de ser cultivada por el campesino, situación que puede ser potenciada por el mismo con el fin de tener beneficios nutricionales, económicos, medicinales, ornamentales o religiosos (Nicholls & Altieri, 2011; Vieyra-Odilón & Vibrans, 2001).

El razonamiento anterior es fomentado por la medida de permanencia conjunta, la cual por su aritmética se ve muy influenciada por el comportamiento de la permanencia individual de los quelites (ver sección Permanencia conjunta). Comparando las figuras 10a, b y c puede notarse que la dinámica general entre ambas medidas no varió cualitativamente al interior de cada tratamiento. Ahora bien, considerando el riesgo relativo asociado tanto a la permanencia de quelites como a la permanencia conjunta, podemos observar que su comportamiento fue cualitativamente homogéneo bajo las perturbaciones de arvenses y sequía (Figuras 11b y c), siendo ambos en general más bajos que los de los cultivos dentro de sus tratamientos respectivos. No obstante, la perturbación de herbívoros presentó un fenómeno interesante sobre esta medida de vulnerabilidad, ya que el riesgo relativo asociado a los quelites resultó prácticamente nulo, mientras que el riesgo asociado a la permanencia conjunta se mantuvo bajo un comportamiento cualitativamente similar al presentado bajo los otros dos tipos de perturbación. Esto permite sugerir que los quelites como cultivo son quienes presentan la mayor

resistencia a variaciones en su permanencia y en consecuencia puede inferirse una mayor resiliencia que se transfiere al resto de la parcela como lo refleja la medida de permanencia conjunta.

Este fenómeno de transferencia de resistencia o absorción y repartición de la vulnerabilidad es un fenómeno que en áreas de la matemática enfocadas a la actuaría se presenta de manera recurrente. La repartición de la vulnerabilidad o riesgo vía la segmentación espacio-temporal de la parcela es un concepto análogo al de la repartición del riesgo mediante la realización de múltiples inversiones en lugar de una individual dentro del mercado de la bolsa de valores. En ecología este planteamiento no varía mucho (Vandermeer, 2010), sin embargo, se tiene el sustento energético de dicho argumento, ya que como mencionan Nicholls y Altieri (2011), la eficiencia energética cuantificada para parcelas bajo manejo agroecológico en donde la misma es trabajada por el campesino y su familia es de 10:1 en la relación calorías obtenidas respecto a calorías invertidas. Situación que cuantificaron considerando el consumo y venta de los quelites. En contraparte mencionan que las grandes parcelas manejadas convencionalmente presentan un rendimiento energético de 3:1. Esta situación genera un soporte probabilístico y energético para sugerir que bajo ciertos contextos el aprovechamiento de los quelites puede significar una diferencia sustancial para la vida del campesino y para la ecología de la parcela (Vieyra-Odilón & Vibrans, 2001).

Dado un mismo tipo de perturbación y manejo se tiene que las permanencias de los cultivos parecen no variar entre los distintos esquemas de policultivo simulados. Esto parece deberse a dos supuestos importantes del modelo: 1) el no considerar explícitamente la distribución espacial de los cultivos, 2) el obviar las dinámicas propias del subsistema suelo y su influencia en la parte aérea de la parcela. Derivado de esto no se están rescatando las interacciones de mutualismo, facilitación y competencia que pueden darse vía los elementos del suelo. Sin embargo, sí se rescatan estos tipos de interacción respecto a algunos elementos de la parte aérea, tales como que si hay calabaza no hay quelites (competencia interespecífica por el espacio) o que si no hay maíz no hay frijol enredador (facilitación) (ver Tabla 5). Pese a lo anterior, resulta interesante resaltar que sin considerar el suelo, los resultados obtenidos en relación a permanencias y riesgo son consistentes con los obtenidos por Ebel y colaboradores (2017) de manera experimental, o por Altieri-Trujillo (1987) y Basurto-Peña (2000) de manera observacional, y por Vandermeer (2010) de manera teórica: la combinación gramínea-legumbre parece ser la alternativa agroecológica más viable para eficientizar el policultivo espacial así como el rotacional (Liebman & Dyck, 1993).

## **Modelación de la milpa mediante redes booleanas, sus alcances como una herramienta agroecológica**

El flujo de información<sup>11</sup> es un fenómeno propio de todos los sistemas a partir del cual pueden abstraerse distintas propiedades dependiendo del paradigma bajo el que sea abordado y la escala a la que sea estudiado. En el caso de los agroecosistemas, y en concreto del modelo de sistema milpa definido para este trabajo, este fenómeno se da de manera simultánea a tantas escalas y en tantos subsistemas que pareciera imposible construir un único modelo que abarcara la dinámica de todos éstos con detalle. Desde un enfoque reduccionista-cuantitativo lo anterior es cierto, sin embargo, desde el paradigma integrador-cualitativo no necesariamente, dependiendo esto de cuánto detalle se esté dispuesto a obviar sobre ciertas partes del sistema. Este intercambio entre precisión y capacidad de

11 Entendiendo el concepto desde la teoría de la información.

modelación se justifica por la necesidad que existe hoy en día de generar herramientas que puedan integrar información no estructurada en el estudio y aprendizaje de éste y otro tipo de sistemas.

La construcción de marcos conceptuales que incorporen la mayor cantidad de información disponible representa una alternativa para afrontar las ya mencionadas crisis alimentarias y de biodiversidad. Las matemáticas brindan una herramienta, con pros y contras, para hacer lo anterior, siendo una ventaja la capacidad de construir modelos teóricos que puedan funcionar como simuladores para aprender sobre distintos fenómenos sin la necesidad de realizar experimentos *in vivo* o *in vitro*. Teniendo en cuenta esto y considerando los resultados obtenidos en este trabajo puede decirse que las redes booleanas funcionaron en este estudio como una herramienta para incorporar información estructurada y no estructurada de la dinámica del agroecosistema milpa con ciertas limitaciones, siendo la más conspicua de ellas la escala temporal de las dinámicas que el modelo pudo rescatar. No obstante, es importante decir que dicha limitante no es propia de la herramienta sino de la propiedad de agregación elegida, situación que puede cambiar en trabajos futuros.

Otra situación derivada de la propiedad de agregación elegida fue la necesidad de homologar una misma escala temporal de interacción para todos los nodos, ya que, independientemente de la duración de ésta, existen fenómenos al interior del sistema que tienen efectos más o menos prolongados que el resto y que son cruciales para la modelación de ciertas dinámicas, *e.g.* el consumo diario de nutrientes de los cultivos así como la erosión también diaria del suelo por diversos factores provocan la degradación nutrimental de la parcela en una escala multianual. Sin embargo, esto puede abordarse mediante la migración del modelo hacia otro formalismo lógico de tipo modal, *e.g.* lógica temporal, o mediante la exploración de esquemas de actualización asincrónicos para las funciones lógicas <sup>12</sup>.

Lo anterior repercutió directamente en la definición de los subsistemas considerados en el modelo y esto es sumamente importante para interpretar las dinámicas obtenidas, ya que se obvió en particular un subsistema fundamental para la dinámica de la parcela: el suelo. Esto no fue accidental, sino que debido a la complejidad inherente a este subsistema en sí mismo se decidió trabajar primero con la ecología de la parte aérea del agroecosistema y en trabajos posteriores incorporar la información que se considere pertinente respecto a las dinámicas asociadas al suelo.

Ahora bien, en términos agroecológicos puede decirse que se generó un protocolo de simulación de escenarios que rescató de manera cualitativa algunas dinámicas usualmente observadas en la realidad y que en consecuencia permite contribuir con el conocimiento referente al agrosistema milpa, proponiendo principios ecológicos generales y simples para su implementación teórica. Uno de estos principios es que dada la definición de milpa construida en este trabajo y los supuestos establecidos, sembrar más cultivos no necesariamente es mejor en términos de permanencia individual ni de permanencia conjunta. A nivel individual se observó que las distintas implementaciones de policultivo no afectaban diferencialmente a los valores de permanencia o riesgo de los cultivos, no obstante, al considerar a los quelites y a la permanencia conjunta sí se observó que el bicultivo de maíz-frijol manejado con herbicida e insecticida en escenarios donde pudieran influir las arvenses fue el tratamiento que presentó mayores permanencias (de los quelites y conjunta) y vulnerabilidades

---

12 Ambas modificaciones: el cambio de formalismo lógico y la exploración de otros esquemas de actualización de las funciones fueron consideradas al momento de la elaboración del código, por lo que estas expansiones del modelo no deberían de generar tantas dificultades.

relativamente altas.

En una primera instancia esto contradice la hipótesis planteada en este trabajo, ya que el tratamiento con mayor riqueza de cultivos era la milpa con maíz-frijol-calabaza, sin embargo, al observar numéricamente los comportamientos de la permanencia y riesgos asociados a los quelites podemos notar que presentan casi el mismo patrón que la permanencia conjunta, en lo que a la significancia de los parámetros de riqueza de cultivos se refiere (ver filas 1, 2 y 3 de columnas 4 y 5 en Tablas 3 y 4). Esto permite sugerir, debido al cálculo aritmético de la permanencia conjunta, que los quelites están influyendo fuertemente en esta medida respecto a la variable de riqueza de cultivos y en consecuencia lo que parecería ser un manejo de bicultivo en realidad se trata de un policultivo conformado por el maíz, el frijol y los quelites, los cuales engloban a una gran cantidad de especies dependiendo de la región considerada. Esto corroboraría una hipótesis alternativa que sería: los modelos de agroecosistemas tipo milpa con mayores riquezas cultivadas y asociadas presentarán las mayores permanencias y vulnerabilidades un poco altas.

El hecho de que ante el posible efecto de las arvenses tanto la permanencia de los quelites como la permanencia conjunta hayan presentado altos valores refuerza lo anterior, ya que los quelites son arvenses por lo que un disturbio para la parcela se vuelve una ganancia para el agricultor manteniendo, contraintuitivamente, un nivel de riesgo alto debido a la respuesta de éste hacia dicha perturbación mediante la aplicación de desyerbe o herbicida. En otras palabras, se trata de un disturbio que promueve la robustez de estos manejos respecto a estas medidas de permanencia pero que a su vez aumenta su vulnerabilidad. Dicho aumento tiene sentido si se considera que el tipo de manejo que presentó las mayores permanencias conjuntas fue aquél en el que se utilizó insecticida y herbicida, siendo el uso de este segundo un factor que provoca aumentos en la vulnerabilidad de los quelites.

Con base en lo anterior podemos decir que la hipótesis no se cumplió en lo que respecta a los manejos que se pensaba presentarían las mayores permanencias y los menores riesgos, ya que no fue el menos sino el más intervenido el que presentó las mayores permanencias conjuntas y en cuanto a las permanencias individuales lo fue en el que se aplicó desyerbe e insecticida. En cuanto a los riesgos estos fueron sistemáticamente mayores para los quelites y la conjunta en aquellos manejos donde se implementó herbicida, y menores en los que se llevó a cabo desyerbe lo cual sí cuadraría con la hipótesis siendo el manejo menos intervenido el menos riesgoso. A nivel individual los riesgos se comportaron de la manera esperada siendo menores conforme la permanencia aumentaba de valor.

En cuanto al potencial del modelo como herramienta de simulación para realizarle recomendaciones al productor, el autor considera que esto puede resultar demasiado ambicioso debido al tipo de modelo y, al menos en esta etapa, no lo recomienda. Lo anterior debido principalmente al enfoque cualitativo con el que el modelo fue construido y a los subsistemas que ignora. Si dicho modelo es refinado lo anterior puede cambiar, ya que las redes booleanas tienen aplicaciones en otras áreas del conocimiento en las que son empleadas como herramientas para la toma de decisiones. Usualmente no se les refiere como redes booleanas pero su planteamiento es esencialmente el mismo, *e.g.* mapas cognitivos difusos (Kosko, 1986). Otros usos que pueden llegar a tener este tipo de modelos son con fines lúdicos, pedagógicos o de divulgación, facilitando así el acceso tanto del público estudiantil y académico al saber agroecológico y científico capturado dentro del modelo como a los agricultores hacia las herramientas de modelación de las ciencias de la complejidad y el conocimiento ecológico (García-

Barrios, Cruz-Morales, Vandermeer, & Perfecto, 2017; García-Barrios, Perfecto, & Vandermeer, 2016) El primer enfoque mencionado es novedoso en términos de que casi siempre lo que se busca es que la ciencia tenga implicaciones que lleguen hasta las comunidades, sin embargo, no siempre se construyen herramientas para que los saberes y problemas de las comunidades lleguen a las aulas y laboratorios. Por tanto, y de manera incidental, se propone que esta herramienta puede tener una gran utilidad desde esta perspectiva. Permitiéndole así al teórico acercarse a un sistema y a un conjunto de saberes de una manera que podría fomentar el diseño de estrategias más concretas e incluso, solamente pero no con menor importancia, el conocer que en México existen este tipo de agroecosistemas y saber la importancia que tiene su conservación en términos ecológicos, económicos y sociales.

# Conclusiones

El agroecosistema milpa fue definido como un sistema complejo para poder modelar su dinámica mediante una red booleana. Esto permitió sistematizar información de diversos tipos correspondiente a distintos subsistemas en un mismo modelo. Considerando varios supuestos se procedió a diseñar una serie de tratamientos para ser evaluados bajo distintos escenarios de perturbación. Se definió a la permanencia como una medida de la robustez de los cultivos y quelites dentro de los tratamientos, así como al riesgo relativo de la misma como su medida de vulnerabilidad. Este protocolo arrojó distintos resultados que permitieron poner a prueba la hipótesis general del trabajo.

En conclusión puede decirse que la hipótesis se cumplió parcialmente y los resultados obtenidos en este trabajo permitieron refinarla para mostrar que:

- Los escenarios de perturbación usualmente cargados de connotaciones negativas pueden enmascarar efectos benéficos en cuanto a permanencias y riesgos se refiere, sin embargo, esto siempre dependerá del tipo de modelo que se esté utilizando, e.g. los quelites veían beneficiadas sus permanencias bajo la perturbación de arvenses y todos los cultivos encontraron sus mayores permanencias bajo la perturbación de herbívoros.
- La intervención mediante el uso de insumos por parte del agricultor no necesariamente repercute negativamente en las permanencias y vulnerabilidades de los tratamientos ante las perturbaciones evaluadas, no obstante hace falta incorporar los efectos a largo plazo que pudieran tener este tipo de medidas para elaborar una conclusión más robusta al respecto.
- El replanteamiento de la definición de riqueza de cultivos como riqueza de cultivos y quelites tiene un mayor sentido agroecológico en términos del aprovechamiento de las condiciones locales de una parcela para favorecer la diversidad biológica y nutricional del agricultor invirtiendo menos energía, maximizando sus rendimientos y repartiendo sus riesgos de pérdida.
- La combinación de cultivo sugerida es la de bicultivo de maíz-frijol, lo cual cuadra con resultados teóricos y experimentales.
- El manejo sugerido depende de los cultivos implementados, pero si se trata de maíz, frijol y quelites, se sugiere el uso de un insecticida orgánico y la práctica de desyerbe manual.
- El modelo puede ser empleado como una herramienta pedagógica de aproximación para los teóricos y académicos hacia el conocimiento campesino asociado a la milpa.

Como perspectivas y trabajos a mediano y largo plazo puede sugerirse:

- Incluir la densodependencia de los organismos dentro del modelo para abordar la competencia intraespecífica.
- Incluir las dinámicas del suelo y sus consecuencias a largo plazo mediante una migración hacia

algún tipo de lógica modal.

- Incluir de manera explícita la distribución espacial de los organismos así como el tamaño de la parcela considerada. Esto conllevará la definición de un efecto diferencial del borde.
- Explorar otros atractores climáticos con el fin de aumentar o disminuir la duración temporal de cada instante y así ganar un poco más de resolución para rescatar los distintos tiempos de cosecha que suelen caracterizar a las distintas variedades de un mismo cultivo. *e.g.* las variedades de maíz de climas fríos (¿o en climas fríos?) suelen tardar más en crecer.

# Anexo 1

## Tabla de interacciones

Tabla 5: Interacciones de los elementos del agrosistema milpa, las funciones de regulación se presentan en la notación descrita en el apartado de Métodos. Los nombres de los nodos corresponden a aquellos manejados en la sección de Definición de los nodos o elementos de la red del modelo de la milpa, o a una abreviatura de las primeras letras del mismo.

Descripción de la interacción	Referencias
<b>Funciones regulatorias para los nodos climáticos</b>	
$\neg \text{Precipitación}_t = \text{Temperatura}_{t+1}$ $\neg \text{Temperatura}_t = \text{Presión}_{t+1}$ $\neg \text{Presión}_t = \text{Precipitación}_{t+1}$	
<p>La precipitación es un fenómeno atmosférico que consiste en la condensación del vapor de agua contenido en las nubes. En este modelo supondremos que si no hay precipitación es porque no hay nubes formadoras de lluvia. Si no hay o hay muy pocas nubes de este tipo, podemos suponer una cobertura nubosa pobre y se sabe que el efecto promedio de esta condición en latitudes medias será el de un aumento en la temperatura del aire, <i>i.e.</i> de calentamiento.</p> <p>De manera complementaria, el incremento en la cobertura nubosa característico de la época de lluvias suele tener un efecto promedio anual de enfriamiento, <i>i.e.</i> la radiación absorbida por la cubierta inferior de las nubes es menor que la reflejada por la cubierta superior. Dicha tendencia se ve acentuada en las latitudes medias, como puede ser el caso del territorio mexicano.</p> <p>Si aumenta la temperatura del aire se generan condiciones de baja presión atmosférica sobre los estratos superficiales de la troposfera. Esto se debe a la tendencia del aire cálido a subir en la columna de aire. Estas condiciones pueden observarse sobre todo durante el verano del hemisferio Norte y se deben sobre todo a las diferencias entre los calores específicos de la superficie continental y la oceánica. De esta manera se acentúa un gradiente de presión que permite que los vientos húmedos del océano incursionen dentro de los continentes y al enfriarse permiten la formación de nubes y en consecuencia de precipitaciones.</p>	<p>OMM, 1993</p> <p>Uriarte-Cantolla, 2009, p. 145-153</p> <p>L'Ecuyer et al., 2009, p. 7</p> <p>Servicio Meteorológico Nacional, datos de 2005 a 2015 de la temperatura promedio y las precipitaciones mensuales por estado.</p>

<p>Análogamente, durante el invierno de las regiones subtropicales se tienen condiciones típicas de alta presión provocadas por el descenso de la temperatura del aire y en consecuencia se acentúan las temporadas de sequía.</p>	
<p><b>Funciones regulatorias para los nodos de manejo</b></p>	
<p><math>Borde_t = Borde_{t+1}</math>  <math>Borde_t \wedge \neg Presión_t = FloresBorde_{t+1}</math></p>	
<p>La vegetación en el borde de la parcela puede considerarse como parte de las técnicas que mediante el manejo de la diversidad buscan restituir varios aspectos funcionales en las zonas de cultivo. La composición, diseño y otros aspectos del borde son aspectos que en este trabajo se simplifican hacia una valuación de presencia o ausencia de éste. Sin embargo, al estarse abarcando un gran número de especies dependiendo de la región solo se mencionará que las flores de dicha vegetación aparecerán durante la época de lluvias, ya que este es un patrón que generalmente se presenta.</p>	<p>Letourneau <i>et al.</i>, 2011  Poveda, Gómez &amp; Martínez, 2008  Tscharntke <i>et al.</i>, 2016</p>
<p><math>(Presión_t \wedge Temperatura_t \wedge \neg Precipitación_t) \vee Quelites_t \vee NoQuelites_t = Desyerbe_{t+1}</math></p>	
<p>El desyerbe se implementa varias veces durante el ciclo de cultivo, sin embargo, un momento fundamental para realizarlo es al momento de preparar la parcela para sembrar a los cultivos. Los desyerbes, labranzas o escardas posteriores se corresponden con la subsecuente aparición de las arvenses.</p>	<p>González-Rodríguez, 2014, p. 82-84  Basurto-Peña, 2000, p. 54-58</p>
<p><math>(Presión_t \wedge Temperatura_t \wedge \neg Precipitación_t) \vee Quelites_t \vee NoQuelites_t = Herbicida_{t+1}</math></p>	
<p>El uso de herbicida es una práctica utilizada para limpiar el terreno de manera previa a la siembra, esta medida ahorra labor física y en ciertos lugares es fomentada por los apoyos gubernamentales.</p>	<p>González-Rodríguez, 2014, p. 83, 84  Vieyra-Odilon &amp; Vibrans, 2001, p. 431</p>
<p><math>Herbívoros_t = Plaguicida_{t+1}</math></p>	

<p>El uso de insecticida es una medida de control para las poblaciones de herbívoros, sin embargo, se tiene que esta no es una práctica forzosamente generalizada al momento de hacer milpa. Tampoco se especifica que tenga que utilizarse un insecticida sintético, ya que se ha probado el éxito de otros de tipo orgánico.</p>	<p>Hernández-Gutiérrez, 2010, p. 39 Bahena, 2008 Vandermeer, 2010</p>
<p><b>Funciones regulatorias para los nodos de cultivo</b></p>	
<p><math>\neg \text{Presión}_t \wedge \text{Temperatura}_t \wedge \neg \text{Precipitación}_t = \text{MaízJoven}_{t+1}</math> <math>\neg \text{Presión}_t \wedge \text{Temperatura}_t \wedge \neg \text{Precipitación}_t = \text{CalabazaJoven}_{t+1}</math></p>	
<p>Para este modelo se considerará la implementación de los cultivos durante el <i>Tonalmil</i> el cual fijaremos de marzo a agosto considerando que durante estos meses se da la época de lluvias.</p>	<p>González-Rodríguez, 2014, p. 82</p>
<p>El Frijol Enredador Joven no se manejó como un nodo explícito debido a que su función lógica era prácticamente la misma que la del maíz joven, por lo que solamente se explícito la relación de éste último con el Frijol Enredador Adulto. Sin embargo, el esquema temporal de siembra que se presupone para aquellos manejos en donde se sembraron dos o más cultivos fue concomitante o simultáneo, <i>i.e.</i> con siembra y cosechas realizadas al mismo tiempo.</p>	<p>Basurto-Peña, 2000, p. 46</p>
<p><i>“En cuanto a las especies asociadas en la milpa se encuentran los frijoles y calabazas principalmente, algunos de los agricultores ya no las cultivan debido al trabajo manual que requiere su cuidado además de que quienes usan herbicida inhiben el establecimiento de la planta.”</i></p>	<p>González-Rodríguez, 2014, p. 93</p>
<p><math>\text{MaízJoven}_t \wedge \neg \text{Quelites}_t \wedge \neg \text{NoQuelites}_t \wedge \text{Precipitación}_t = \text{MaízAdulto}_{t+1}</math> <math>\text{MaízJoven}_t \wedge \text{Precipitación}_t = \text{FrijolEnredadorAdulto}_{t+1}</math></p>	
<p>El maíz adulto requiere de una competencia nula con las arvenses durante las primeras 3-5 semanas de edad.</p>	<p>Martínez-Domínguez, 2006, p. 24, 25</p>
<p><i>“Los frijoles se siembran en el mismo agujero que el maíz pero separado un poco o al pie de éste, se colocan de 2-4 semillas por piquete transportadas en una bolsa</i></p>	<p>González-Rodríguez,</p>

<p><i>aparte o combinadas con los granos de maíz que no fueron remojados, se siembran los de mata en enero para cosechar a inicios de mayo de manera que para finales de este mes se vuelve a sembrar para cosechar en agosto, los de bejuco o enredador se siembran en julio. ”</i></p>	<p>2014, p. 93</p>
<p><i>“En estas parcelas [huertas] el frijol se cultiva casi siempre en asociación con el maíz y en general en un mismo campo de cultivo se encuentran varias especies de frijoles”</i></p>	<p>Basurto-Peña, 2000, p. 42</p>
<p>La caña de maíz le sirve de soporte a la variedad de crecimiento indeterminado que crece como enredadera. La forma de sus hojas permiten que la competencia lumínica sea prácticamente nula. Estos cultivos se implementan en asociación en una gran cantidad de ecosistemas.</p>	<p>Mariaca-Méndez, 1988 Altieri, 1999 (Kato-Yamakake et al., 2009) Scarry, 2008 Postma &amp; Lynch, 2012, p. 521</p>
<p><i>“En cuanto a las especies asociadas en la milpa se encuentran los frijoles y calabazas principalmente, algunos de los agricultores ya no las cultivan debido al trabajo manual que requiere su cuidado además de que quienes usan herbicida inhiben el establecimiento de la planta.”</i></p>	<p>González-Rodríguez, 2014, p. 93</p>
$CalabazaJoven_t \wedge \neg Quelites_t \wedge \neg NoQuelites_t \wedge Precipitación_t \wedge \neg Herbicida_t = CalabazaAdulta_{t+1}$	
<p>Para que el cultivo de la calabaza se desarrolle en buenas condiciones, es necesario que esté libre de malezas durante los primeros 35-40 días de su desarrollo, éstas pueden eliminarse a mano o utilizando herbicidas.</p>	<p>Xolo-Fiscal, 2003, p. 15,16</p>
<p>La mezcla de ciertos herbicidas puede resultar dañina para el cultivo de la calabaza. En particular el uso de glifosato no permite su crecimiento.</p>	<p>Peachey &amp; William, 1998</p>
$MaízAdulto_t \wedge Precipitación_t \wedge (\neg Herbívoros_t \vee Depredadores_t) = MaízGrano_{t+1}$ $MaízFrijolAdulto_t \wedge Precipitación_t \wedge (\neg Herbívoros_t \vee Depredadores_t) = FrijolEnredadorGrano_{t+1}$	
<p>La presencia de agua y las bajas densidades de depredadores promoveran que el maíz alcance su máximo crecimiento vegetativo antes de generar flores y posteriormente frutos.</p>	<p>González-Rodríguez, 2014</p>

<p>El ciclo del frijol y del maíz, tanto para su siembra como para su cosecha comparten el instante temporal en el que se llevan a cabo.</p>	<p>Basurto-Peña, 2000, p. 53 García-Pacheco, 2004, p. .21-25</p>
$CalabazaAdult_t \wedge \neg Presión_t \wedge Poliniz_t \wedge \neg Herbic_t \wedge (\neg Herbív_t \vee Depredadores_t) = CalabazaFruto_{t+1}$	
<p>La calabaza requiere de climas calurosos, soporta muy bien estas condiciones y la falta de agua pero no soporta las heladas.</p>	<p>Xolo-Fiscal, 2003, p. 9</p>
<p>“Las calabazas se cultivan en tonamil ( ) en el mismo terreno (que el maíz y que el frijol)...”</p>	<p>González-Rodríguez, 2014, p. 101</p>
<p>La calabaza (<i>C. pepo</i>) es una planta que no tolera las heladas y en las zonas tropicales debe de cultivarse, de preferencia, durante la estación seca, por su susceptibilidad a las lluvias y a la humedad prolongada.</p>	<p>López-Ramírez, 2003 Cerón-González, 2010</p>
<p><b>Funciones regulatorias para los nodos de vegetación asociada</b></p>	
$\neg Herbicida_t \wedge \neg Desyerbe_t \wedge \neg CalabazaAdulta_t = NoQuelites_{t+1}$ $NoQuelites_t \wedge \neg Herbicida_t \wedge \neg Desyerbe_t \wedge Precipitación_t = FloresNoQuelites_{t+1}$	
<p>El uso de los herbicidas puede matar directamente a plantas no objetivo pero también causar efectos subletales a las mismas.</p>	<p>Aktar, Sengupta, &amp; Chowdhury, 2009, p. 6</p>
$\neg Herbicida_t \wedge \neg CalabazaAdulta_t \wedge (Presión_t \vee \neg Temperatura_t \vee Precipitación_t) = Quelites_{t+1}$ $Quelites_t \wedge \neg Herbicida_t \wedge Precipitación_t = FloresQuelites_{t+1}$	
<p>Los quelites son hierbas tiernas comestibles con gran aporte nutricional que están presentes, generalmente, en temporada de lluvias. Dicha hierba suele ser silvestre y crece principalmente en la milpa, por lo que muchas de las plantas presentan una fenología marcada por la dinámica de los manejos ejercidos.</p>	<p>González-Rodríguez, 2014 Alonso, 2013 Basurto-Peña,</p>

	2000
El uso de los herbicidas puede matar directamente a plantas no objetivo pero también causar efectos subletales a las mismas.	Aktar, Sengupta & Chowdhury, 2009, p. 6
<b><i>Funciones regulatorias para los nodos de fauna asociada</i></b>	
$(CultivosJóvenes_t \vee CultivosAdultos_t \vee CultivosFruto_t \vee Arvens) \wedge \neg Depred_t \wedge \neg Plagui_t = Herbívoros_{t+}$	
Existen herbívoros que se alimentan de cada uno de los cultivos de la milpa así como de la vegetación asociada. Su diversidad es muy amplia y para consultar detalles particulares se recomienda recurrir a las referencias citadas.	SARH, 1979 Ramírez-Zamudio, 2012 Ponce-García, 2012
$Herbívoros_t \wedge Borde_t \wedge \neg Plaguicida_t = Depredadores_{t+1}$	
La adición de plantas con y sin flores alrededor del campo de cultivo incrementa significativamente la presencia de depredadores naturales.  Este efecto es potenciado también por la presencia de herbívoros y la ausencia de insecticidas.  Dentro de este nodo se contempla de manera implícita la acción de los parasitoides, los cuales también son una parte importante de los organismos utilizados como controles biológicos.	Letourneau et al., 2011, p. 4, 5 Aktar et al., 2009 Tscharntke et al., 2016 Poveda et al., 2008 Bahena, 2008
$(CalabazaAdulta_t \vee FloresBorde_t \vee FloresQuelit_t \vee FloresNoQuelit_t) \wedge \neg Plaguicida_t = Polinizadores_{t+1}$	
Los polinizadores son atraídos por las flores de los cultivos y de la vegetación asociada. En el caso de la milpa, solo la calabaza requiere de su labor para producir fruto, ya que el maíz se poliniza por viento, mientras que el frijol enredador se	Torres-Ruiz, Wallace Jones, & Ayala Barajas,

<p>autpoliniza casi en su totalidad.</p> <p>Entre los polinizadores importantes se tiene a las abejas salvajes de los géneros <i>Peponapis</i> y <i>Xenoglossa</i>. Se alimentan del néctar de las flores masculinas y femeninas de la calabaza, transportando así el polen de las primeras hasta las segundas. Su rol como polinizadoras es muy importante, se ha observado que de estar presentes, las otras abejas o abejorros polinizadores juegan un papel secundario. La influencia de estas abejas se caracterizan por ser de importancia durante todo el temporal.</p> <p>A las abejas meliponas (<i>Nannotrigona perilampoides</i>, <i>Scaptotrigona mexicana</i>, <i>Tetragonisca angustula</i>) se les ha empleado experimentalmente como polinizadores inducidos en varios cultivos (calabaza, rambután, tomate, chile, pimiento, aguacate y café), de éstas <i>N. perilampoides</i> es la especie más ampliamente distribuida en México, estando presente en climas cálidos a lo largo de ambas costas y en la depresión del Balsas.</p> <p>Las abejas melíferas (<i>Apis mellifera</i>) constituyen una especie introducida que actualmente es producida y utilizada como un polinizador para varios frutales y hortalizas bajo distintos tipos de manejo agrícola (invernadero y cultivos a cielo abierto), e.g. calabaza, tomate, berenjena, chile habanero, calabaza, fresa, sandía, melón, aguacate, manzana, pepino, cártamo, mango y limón.</p>	<p>2013</p> <p>Quezada-Ehuán, 2009</p> <p>Hurd, Linsley, &amp; Michelbacher, 1974</p> <p>Ortega, 1974</p>
<p>Algunos insecticidas pueden tener efectos tóxicos sobre las abejas.</p>	<p>Aktar, Sengupta &amp; Chowdhury, 2009, p. 7</p>

## Referencias

- Aguilar, J., Illsley, C., & Marielle, C. (2003). Los sistemas agrícolas de maíz y sus procesos técnicos. *Sin Maíz No Hay Paíz*, 83–122.
- Aktar, M. W., Sengupta, D., & Chowdhury, A. (2009). Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdisciplinary Toxicology*, 2(1), 1–12. <https://doi.org/10.2478/v10102-009-0001-7>
- Alatorre Rosas, R., Bravo Mojica, H., Leyva Vásquez, J. L., & Huerta De la Peña, A. (2004). Manejo integrado de plagas. SAGARPA. *Subsecretaria de Desarrollo Rural. Dirección General de Apoyos Para El Desarrollo Rural*, 109.
- Albert, I., Thakar, J., Li, S., Zhang, R., & Albert, R. (2008). Boolean network simulations for life scientists. *Source Code for Biology and Medicine*, 3(1), 16. <https://doi.org/10.1186/1751-0473-3-16>
- Albert, I., Thakar, J., Li, S., Zhang, R., & Albert, R. (2008). Boolean network simulations for life scientists. *Source Code for Biology and Medicine*, 3(1), 16. <https://doi.org/10.1186/1751-0473-3-16>
- Alon, U. (2006). *An Introduction to Systems Biology, Design Principles of Biological Circuits*. Chapman & Hall CRC.
- Altieri, M. A. (1999). *Agroecology: The science of sustainable agriculture. Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable*. Editorial Nordan-Comunidad. Retrieved from <http://agroeco.org/wp-content/uploads/2010/10/Libro-Agroecologia.pdf>
- Altieri, M. A., Funes-Monzote, F. R., & Petersen, P. (2012). Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: Contributions to food sovereignty. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0065-6>
- Altieri, M. A., Letourneau, D. K., & Davis, J. R. (1983). Developing Sustainable Agroecosystems. *BioScience*, 33(1), 45–49. <https://doi.org/10.2307/1309244>
- Altieri, M. A., & Whitcomb, W. H. (1980). Weed manipulation for insect pest management in corn. *Environmental Management*, 4(6), 483–489. <https://doi.org/10.1007/BF01876885>
- Altieri, M. a, & Nicholls, C. (2009). Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas. *LEISA Revista de Agroecología*, 24(4), 5–8. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Álvarez-Buylla, E. R., Chaos, Á., Aldana, M., Benítez, M., Cortes-Poza, Y., Espinosa-Soto, C., ... Padilla-Longoria, P. (2008). Floral Morphogenesis: Stochastic Explorations of a Gene Network

- Epigenetic Landscape. *PLoS ONE*, 3(11), e3626. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003626>
- Badgley, C., Moghtader, J., Quintero, E., Zakem, E., Chappell, M. J., Avilés-Vázquez, K., ... Ivette, P. (2006). Organic agriculture and the global food supply. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 22(2), 86–108. <https://doi.org/10.1017/S1742170507001640>
- Bahena, J. (2008). *Enemigos naturales de las plagas del maíz y otros cultivos*. Uruapan, Michoacán: INIFAP.
- Bassil, K. L., Vakil, C., Sanborn, M., Cole, D. C., Kaur, J. S., Kerr, K. J., & Sanin, L. H. (2007). Cancer health effects of pesticides. *Canadian Family Physician*, 53(10), 1704–1711. Retrieved from <http://www.hubmed.org/display.cgi?uids=17934034>
- Basurto-Peña, F. A. (1982). *Huertos familiares en dos comunidades nahuas de la Sierra Norte de Puebla: Yancuictlalpan y Cuahtapanaloyan*. No Title. UNAM.
- Basurto-Peña, F. A. (2000). *Aspectos etnobotánicos de Phaseolus coccineus L. y Phaseolus polyanthus Greenman en la sierra norte de Puebla, México*. UNAM.
- Beck, C., Grieser, J., & Rudolf, B. (2005). A New Monthly Precipitation Climatology for the Global Land Areas for the Period 1951 to 2000. *Climate Status Report 2004*, 181–190.
- Benítez, M., & Alvarez-Buylla, E. R. (2010). Dynamic-module redundancy confers robustness to the gene regulatory network involved in hair patterning of Arabidopsis epidermis. *Biosystems*, 102(1), 11–15. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2010.07.007>
- Benítez, M., Espinosa-Soto, C., Padilla-Longoria, P., & Alvarez-Buylla, E. R. (2008). Interlinked nonlinear subnetworks underlie the formation of robust cellular patterns in Arabidopsis epidermis: a dynamic spatial model. *BMC Systems Biology*, 2(1), 98. <https://doi.org/10.1186/1752-0509-2-98>
- Bennet, E. M., Carpenter, S. R., & Caraco, N. F. (2001). Human Impact on Erodable Phosphorus and Eutrophication: A Global Perspective. *BioScience*. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0227:HIOEPA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0227:HIOEPA]2.0.CO;2)
- Bertalanffy, L. V. O. N. (1965). *Teoría general de los sistemas*.
- Boege, E. (2009). Centros de origen, pueblos indígenas y diversificación del maíz. *Ciencias*. Retrieved from <http://revistas.unam.mx/index.php/cns/article/view/14825>
- Boole, G. (1847). *The Mathematical Analysis of Logic, Being an Essay Towards a Calculus of Deductive Reasoning*. Cambridge University Press.
- Buenrostro, M. (2008). Las bondades de la milpa. *Revista Ciencias*, 92–93. Retrieved from [http://www.revistaciencias.unam.mx/images/stories/Articles/92\\_93/Breve02/Las\\_bondades\\_de\\_la\\_milpa.pdf](http://www.revistaciencias.unam.mx/images/stories/Articles/92_93/Breve02/Las_bondades_de_la_milpa.pdf)

- Cerón-González, L. (2010). *Caracterización de calabazas (Cucurbita spp.) mexicanas como fuente de resistencia al Cucumber Mosaic Virus (CMV)*. Universidad Autónoma de Chapingo.
- Chappell, M. J., Wittman, H., Bacon, C. M., Ferguson, B. G., Barrios, L. G., Barrios, R. G., ... Perfecto, I. (2013). Food sovereignty: an alternative paradigm for poverty reduction and biodiversity conservation in Latin America. *F1000Research*.  
<https://doi.org/10.12688/f1000research.2-235.v1>
- De Bach, P. (1964). Biological control of insect pests and weeds. *Biological Control of Insect Pests and Weeds*, 844 pp.
- De Ponti, T., Rijk, B., & van Ittersum, M. K. (2012). The crop yield gap between organic and conventional agriculture. *Agricultural Systems*, 108, 1–9.  
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.12.004>
- Del Val, E., Arnés, E., Gaona, J. A., & Astier, M. (2013). Incidencia de gallina ciega, sistemas de manejo campesinos y variabilidad climática en la comunidad de Napízaro, Michoacán (México). *Agroecología*, 8(1), 53–62.
- Ebel, R., Pozas Cárdenas, G., Soria Miranda, J. F., & Cruz González, J. (2017). Manejo orgánico de la milpa: rendimiento de maíz, frijol y calabaza en monocultivo y policultivo. *Terra Latinoamericana*, 35(2), 149–160.
- ETC, G. (2009). *Who Will Feed Us ? Questions for the food and climate crisis*. Retrieved from [http://www.etcgroup.org/files/030913\\_ETC\\_WhoWillFeed\\_AnnotatedPoster.pdf](http://www.etcgroup.org/files/030913_ETC_WhoWillFeed_AnnotatedPoster.pdf)
- FAO. (2008). *El cambio climático, las plagas y las enfermedades transfronterizas*. Organización de las Naciones Unidas.
- FAO, IFAD, & WFP. (2014). *The State of Food Insecurity in the World 2014. Strengthening the enabling environment for food security and nutrition*. Roma. Retrieved from <file://localhost/Users/sclosser/Documents/Papers/Unknown/2008-52.pdf>
- Foley, J. A. (2011). Can We Feed the World & Sustain the Planet? *Scientific American*, 305(5), 60–65.  
<https://doi.org/10.1038/scientificamerican1111-60>
- Foley, J. A., Defries, R., Asner, G. P., Barford, C., & Bonan, G. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- Foley, J. A., Monfreda, C., Patz, J. A., & Ramankutty, N. (2009). Agriculture, Land Use, and the Transformation of Planet Earth. In S. A. Levin (Ed.), *The Princeton Guide to Ecology* (pp. 724–730). New Jersey: Princeton University Press.
- Frison, E. A., Cherfas, J., Eyzaguirre, P. B., & Johns, T. (2006). Agrocultural biodiversity, nutrition, and health: Making a difference to hunger and nutrition in the developing world . *Food and Nutrition*

*Bulletin*, 27(2), 167–179. Retrieved from

[http://docserver.ingentaconnect.com/deliver/connect/nsinf/03795721/v27n2/s8.pdf?](http://docserver.ingentaconnect.com/deliver/connect/nsinf/03795721/v27n2/s8.pdf?expires=1431109454&id=81734195&titleid=41000042&accname=Guest+User&checksum=1F00F923C1EDE0B6C93BB80D7A5940C5)

[expires=1431109454&id=81734195&titleid=41000042&accname=Guest+User&checksum=1F00F923C1EDE0B6C93BB80D7A5940C5](http://docserver.ingentaconnect.com/deliver/connect/nsinf/03795721/v27n2/s8.pdf?expires=1431109454&id=81734195&titleid=41000042&accname=Guest+User&checksum=1F00F923C1EDE0B6C93BB80D7A5940C5)

- García-Barrios, L., Cruz-Morales, J., Vandermeer, J., & Perfecto, I. (2017). The Azteca Chess experience: Learning how to share concepts of ecological complexity with small coffee farmers. *Ecology and Society*, 22(2). <https://doi.org/10.5751/ES-09184-220237>
- García-Barrios, L., Mayer-Foulkes, D., Franco, M., Urquijo-Vásquez, G., & Franco-Pérez, J. (2001). Development and validation of a spatially explicit individual-based mixed crop growth model. *Bulletin of Mathematical Biology*, 63(3), 507–526. <https://doi.org/10.1006/bulm.2000.0226>
- García-Barrios, L., Perfecto, I., & Vandermeer, J. (2016). Azteca chess: Gamifying a complex ecological process of autonomous pest control in shade coffee. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 232, 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.014>
- García-Pacheco, G. (2004). *El miltomate en unicultivo y en asociación con maíz-frijol: un análisis productivo y socioeconómico*. Universidad Autónoma de Chapingo.
- Gershenson, C. (2002). Classification of Random Boolean Networks, 1–8.
- González-Rodríguez, J. C. (2014). *Historia ambiental de la milpa como agroecosistema (1970-2009) en Xiloxochico, Cuetzalan, Puebla*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Greil, F. (2009). *Dynamics of Boolean networks. Discrete and Continuous Dynamical Systems - Series S*. Technische Universität Darmstadt.
- Hayes, T., Haston, K., Tsui, M., Hoang, A., Haeffele, C., & Vonk, A. (2003). Atrazine-induced hermaphroditism at 0.1 ppb in American leopard frogs (*Rana pipiens*): Laboratory and field evidence. *Environmental Health Perspectives*, 111(4), 568–575. <https://doi.org/10.1289/ehp.5932>
- Hernández-Gutiérrez, J. (2010). *Control del gusano cogollero mediante productos orgánicos en maíz*. Colegio Superior Agropecuario en el Estado de Guerrero.
- Holland, J. H. (1995). *El orden oculto, de como la adaptación crea la complejidad*. Fondo de Cultura Económica.
- Hooper, D. U., Chapin III, F. S., Ewel, J. J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., ... Wardle, D. A. (2005). Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 75(1), 3–35. <https://doi.org/10.1890/04-0922>
- Hurd, P. D., Linsley, E. G., & Michelbacher, a. D. (1974). Ecology of the squash and gourd bee, *Peponapis pruinosa*, on cultivated cucurbits in California (Hymenoptera: Apoidea). *Smithsonian Contributions to Zoology*, (168), 1–17. <https://doi.org/10.5479/si.00810282.168>

- Hutson, V., & Schmitt, K. (1992). Permanence and the dynamics of biological systems. *Mathematical Biosciences*, 111(1), 1–71.
- Kato-Yamakake, T. Á., Mapes-Sánchez, C., Mera-Ovando, L. M., Serratos-Hernández, J. A., & Bye, R. A. (2009). *Origen y diversificación del maíz una revisión analítica* (1st ed.). México: UNAM, CONABIO. Retrieved from [http://www.biodiversidad.gob.mx/genes/pdf/origen\\_div\\_maiz.pdf](http://www.biodiversidad.gob.mx/genes/pdf/origen_div_maiz.pdf)
- Kauffman, S. (1969). Homeostasis and differentiation in random genetic control networks. *Nature*, 224(5215), 177–178. <https://doi.org/10.1038/224177a0>
- Kolbert, E. (2014). *The Sixth Extinction. The effects of brief mindfulness intervention on acute pain experience: An examination of individual difference* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. *International Journal on Man– Machine Studies*, 24(1), 65–75.
- L’Ecuyer, T. S., Wood, N. B., Haladay, T., Stephens, G. L., & Stackhouse, P. W. (2009). Impact of clouds on atmospheric heating based on the R04 CloudSat fluxes and heating rates data set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(8), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2008JD009951>
- Le, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1–18. Retrieved from 10.18637/jss.v025.i01
- Levins, R. (1966). The Strategy of Model Building in Population Biology. *American Scientist*, 54(4), 421–431.
- Lewontin, R., & Levins, R. (2007). *Biology Under the Influence. Dialectical Essays on Ecology, Agriculture, and Health*. (M. R. Press, Ed.). New York.
- Liebman, M., & Dyck, E. (1993). Crop rotation and intercropping strategies for weed management. *Ecological Applications*, 3(1), 92–122. <https://doi.org/10.2307/1941795>
- López-Ramírez, R. (2003). *Control químico de la maleza en el cultivo de la calabacita (Cucurbita pepo L.) var. Gray Zucchini en Chapingo, México*. Universidad Autónoma de Chapingo.
- MacArthur, R. (1955). Fluctuations of Animal Populations and a Measure of Community Stability. *Ecology*, 36(3), 533. <https://doi.org/10.2307/1929601>
- Mariaca-Méndez, R. (1988). *Análisis estadístico de seis años de cultivo continuo experimental de una milpa bajo roza-tumba-quema en Yucatán, México (1980-1986)*. Colegio de Postgraduados.
- Mariaca-Méndez, R. (2015). La milpa maya yucateca en el siglo XVI: evidencias etnohistóricas y conjeturas. *Etnobiología*, 13(1), 1–25. Retrieved from file:///J:/arboles/Usos arboles de

Mexico/Referencias/Yucatan/La milpa maya yucateca siglo XVI.pdf

- Martin, E. A., Reineking, B., Seo, B., & Steffan-Dewenter, I. (2013). Natural enemy interactions constrain pest control in complex agricultural landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *110*(14), 5534–5539. <https://doi.org/10.1073/pnas.1215725110>
- Martínez-Domínguez, F. (2006). *Efecto de las malezas en los componentes del rendimiento del maíz*. COLPOS.
- Masera, O., & Astier, M. (1993). Energía y Sistema Alimentario en México : Aportaciones de la Agricultura Alternativa. In J. Trujillo & P. Torres-Lima (Eds.), *Agroecología y Desarrollo Agrícola en México* (p. 35). México.
- May, R. (1973). Qualitative Stability in Model Ecosystems. *Ecology*, *54*(3), 638–641.
- May, R. M. (1971). Stability in multispecies community models. *Mathematical Biosciences*, *12*(1–2), 59–79. [https://doi.org/10.1016/0025-5564\(71\)90074-5](https://doi.org/10.1016/0025-5564(71)90074-5)
- Mccann, K. S. (2000). The diversity–stability debate. *Nature*, *405*(May), 228–233.
- Mitchell, M. (2009). *Complexity A Guided Tour*. Oxford University Press.
- Morales, H., & Perfecto, I. (2000). Traditional Knowledge and Pest Management in the Guatemalan Highlands. *Agriculture and Human Values*, *17*(1), 49–63. <https://doi.org/10.1023/A:1007680726231>
- Müssel, C., Hopfensitz, M., & Kestler, H. A. (2010). BoolNet -- an R package for generation, reconstruction and analysis of Boolean networks. *Bioinformatics*, *26*(10), 1378–1380.
- Newman, M. . E. J. (2010). *Networks An Introduction*. Oxford University Press.
- Nicholls, C. I., & Altieri, M. Á. (2011). Modelos ecológicos y resilientes de producción agrícola para el siglo XXI. *Agroecología*, *6*(0), 28–37.
- Oerke, E.-C. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, *144*(1), 31. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>
- Oki, T., & Kanae, S. (2006). Global hydrological cycles and world water resources. *Science (New York, N.Y.)*, *313*(5790), 1068–1072. <https://doi.org/10.1126/science.1128845>
- OMM. (1993). Manual de observación de nubes. In *Atlas Internacional de Nubes*. Publicaciones de la OMM.
- Ortega, S. (1974). Polinización cruzada natural de la caraota (*P. vulgaris* L.) en Venezuela. *Agronomía Tropical*, *24*(1), 21–32. Retrieved from [http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas\\_ci/Agronomia Tropical/at2401/arti/ortega\\_y.htm](http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_ci/AgronomiaTropical/at2401/arti/ortega_y.htm)

- Pascual, M., & Dunne, J. A. (2006). *Ecological networks linking structure to dynamics in food webs*. Oxford; New York: Oxford University Press.
- Patz, J. A., Daszak, P., Tabor, G. M., Aguirre, A. A., Pearl, M., Epstein, J., ... Zakarov, V. (2004). Unhealthy landscapes: Policy recommendations on land use change and infectious disease emergence. *Environmental Health Perspectives*, *112*(10), 1092–1098. <https://doi.org/10.1289/ehp.6877>
- Peachey, R. E., & William, R. D. (1998). Weed management in cucurbits with sulfentrazone, dimethenamid, and direct-seeding. *Western Society of Weed Science (USA)*. Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US1997090084>
- Perfecto, I., & Vandermeer, J. H. (2010). The agroecological matrix as alternative to the land-sparing/agriculture intensification model. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *107*(13), 5786–5791. <https://doi.org/10.1073/pnas.0905455107>
- Perfecto, I., Vandermeer, J. H., & Wright, A. (2009). *Nature's Matrix*. Earthscan.
- Pimentel, D. (2005). Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States In Integrated Pest Management: Innovation-Development Process. *Environment, Development and Sustainability*, *7*, 229–252. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8992-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8992-3_4)
- Pimm, S. L. (1979). The Structure of Food Webs. *Theoretical Population Biology*, *16*(1979), 144–158.
- Pnueli, A. (1977). The temporal logic of programs. In *18th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (sfcs 1977)* (pp. 46–57). <https://doi.org/10.1109/SFCS.1977.32>
- Ponce-García, I. (2012). *Comunidad de artrópodos asociados al cultivo del maíz en parcelas orgánicas y convencionales en erongarícuaro, Michoacán*. UNAM.
- Postma, J. a, & Lynch, J. P. (2012). Complementarity in root architecture for nutrient uptake in ancient maize/bean and maize/bean/squash polycultures. *Annals of Botany*, *110*(2), 521–34. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs082>
- Poveda, K., Gómez, M. I., & Martínez, E. (2008). Diversification practices : their effect on pest regulation and production, *34*(2), 131–144.
- Poveda, K., Steffan-Dewenter, I., Scheu, S., & Tscharntke, T. (2003). Effects of below-and above-ground herbivores on plant growth, flower visitation and seed set. *Oecologia*, *135*, 601–605. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1228-1>
- Poveda, K., Steffan-Dewenter, I., Scheu, S., & Tscharntke, T. (2006). Belowground effects of organic and conventional farming on aboveground plant-herbivore and plant-pathogen interactions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *113*(1–4), 162–167. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.09.005>

- Power, A. G., O'Rourke, M., & Drinkwater, L. E. (2009). Human-Dominated Systems: Agroecosystems. In S. A. Levin (Ed.), *The Princeton Guide to Ecology* (pp. 597–605). New Jersey: Princeton University Press.
- Quezada-Ehuán, J. J. (2009). Potencial de las abejas nativas en la polinización de cultivos. *Acta Biológica Colombiana*, 14(2), 169–172.
- R, C. T. (2017). R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <https://www.r-project.org/>
- Ramankutty, N., Evan, A. T., Monfreda, C., & Foley, J. A. (2008). Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 22(1). <https://doi.org/10.1029/2007GB002952>
- Ramírez-Zamudio, E. G. (2012). *Efectos de la comunidad de artrópodos asociada al cultivo del maíz en un gradiente de tecnificación, situación actual*. UNAM.
- Rosenzweig, M. L., & MacArthur, R. H. (1963). Graphical representation and stability conditions of predator-prey interactions. *American Naturalist*. <https://doi.org/10.1086/282272>
- Ruiz-Rosado, O. (2006). Agroecology: A discipline leading towards transdiscipline. *Interciencia*, 31, 140–145.
- Saadatpour, A., Albert, I., & Albert, R. (2010). Attractor analysis of asynchronous Boolean models of signal transduction networks. *Journal of Theoretical Biology*, 266(4), 641–656. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2010.07.022>
- Saadatpour, A., & Albert, R. (2013). Boolean modeling of biological regulatory networks: A methodology tutorial. *Methods*, 62(1), 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2012.10.012>
- Sala, O. E., Chapin, F. S., Armesto, J. J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., ... Wall, D. H. (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science (New York, N.Y.)*, 287(5459), 1770–1774. <https://doi.org/10.1126/science.287.5459.1770>
- SARH, D. G. de S. V. (1979). *Principales plagas del maíz*.
- Seufert, V., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2012). Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature*, 485(7397), 229–32. <https://doi.org/10.1038/nature11069>
- Soden, B. J., Jackson, D. L., Ramaswamy, V., Schwarzkopf, M. D., & Huang, X. (2005). The radiative signature of upper tropospheric moistening. *Science (New York, N.Y.)*, 310(5749), 841–844. <https://doi.org/10.1126/science.1115602>
- Sodhi, N. S., Brook, B. W., & Bradshaw, C. J. A. (2009). Causes and consequences of species extinctions. In S. A. Levin (Ed.), *The Princeton Guide to Ecology* (pp. 514–520). New Jersey:

Princeton University Press. <https://doi.org/10.1037/h0032795>

- Tarback, E. J., Lutgens, F. K., & Pinzke, K. G. (2012). *Applications and Investigations in Earth Science*. Pearson Prentice Hall.
- Thakar, J., & Albert, R. (2010). Boolean models of within-host immune interactions. *Current Opinion in Microbiology*, 13(3), 377–381. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2010.04.003>
- Thomas, R. (1973). Boolean formalization of genetic control circuits. *Journal of Theoretical Biology*, 42(3), 563–585. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(73\)90247-6](https://doi.org/10.1016/0022-5193(73)90247-6)
- Tittonell, P. A. (2013). *Farming Systems Ecology. Towards ecological intensification of world agriculture*. Wageningen.
- Torres-Ruiz, A., Wallace Jones, R., & Ayala Barajas, R. (2013). Present and Potential Use of Bees as Managed Pollinators in Mexico. *Southwestern Entomologist Perspective*, 38(1), 133–147. <https://doi.org/10.3958/059.038.0102>
- Trujillo-Arriaga, J., & Altieri, M. A. (1990). A comparison of aphidophagous arthropods on maize polycultures and monocultures, in Central Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 31(4), 337–349. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(90\)90232-3](https://doi.org/10.1016/0167-8809(90)90232-3)
- Tscharntke, T., Karp, D. S., Chaplin-Kramer, R., Batary, P., DeClerck, F., Gratton, C., ... Zhang, W. (2016). When natural habitat fails to enhance biological pest control ??? Five hypotheses. *Biological Conservation*. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.10.001>
- Uriarte-Cantolla, A. (2003). *Historia del clima de la Tierra*. (2nd ed.). Eusko Jaurlaritza 2. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- Van Driesche, R., Hoddle, M., & Center, T. (2008). *Control of Pests and Weeds By Natural Enemies: An Introduction to biological control*. *Florida Entomologist*. <https://doi.org/10.1653/024.092.0237>
- Vandermeer, J. H. (1970). The Community Matrix and the Number of Species in a Community. *The American Naturalist*, 104(935), 73–83. <https://doi.org/10.2307/2678832>
- Vandermeer, J. H. (1972). On the Covariance of the Community Matrix. *Ecology*, 53(1), 187–189.
- Vandermeer, J. H. (1992). The Ecology of Intercropping by John H. Vandermeer. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511623523>
- Vandermeer, J. H. (2010). *The ecology of agroecosystems. Structure*.
- Vandermeer, J. H., & Perfecto, I. (2013). Complex Traditions: Intersecting Theoretical Frameworks in Agroecological Research. *Journal of Sustainable Agriculture*, 37(1), 76–89. <https://doi.org/10.1080/10440046.2012.717904>

- Vandermeer, J. H., & Schultz, B. (1990). Variability, stability, and risk in intercropping: some theoretical explorations. In *Agroecology: researching the ecological basis for sustainable agriculture* (pp. 205–229).
- Vieyra-Odilon, L., & Vibrans, H. (2001). Weeds as crops: The value of maize field weeds in the valley of Toluca, Mexico. *Economic Botany*, 55(3), 426–443. <https://doi.org/10.2307/4256456>
- Vitousek, P. M., Ehrlich, P. R., Ehrlich, A. H., & Matson, P. A. (1986). Human Appropriation of the Products of Photosynthesis. *BioScience*. <https://doi.org/10.2307/1310258>
- Wilcove, D. S. (2009). Conservation Biology. In S. A. Levin (Ed.), *The Princeton Guide to Ecology* (pp. 511–513). New Jersey: Princeton University Press.
- Xolo-Fiscal, D. (2003). *Selectividad de tres herbicidas sobre el cultivo de calabacita (Cucurbita pepo L.) a cuatro profundidades de siembra, en dos tipos de suelo, Chapingo, México*. Universidad Autónoma de Chapingo.