

Manejo biológico de una plaga usando un modelo multiagentes. Biological management of a plague using a model multi-agents.

D. Almaguer ^{a,b}, C. Islas ^{c,*}, P. Padilla ^c, M. A. Prado ^d, D. F. Vizuet ^a

^aCiencias de la Complejidad, Universidad Autónoma de la Ciudad de México, 03100, Ciudad de México, México.

^bDepartamento de Computación, Instituto de Educación Media Superior, 03020, Ciudad de México, México.

^cInstituto de Investigación en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510, Ciudad de México, México.

^dAcademia de Matemáticas, Universidad Autónoma de la Ciudad de México, 03100, Ciudad de México.

Resumen

Se desarrollan modelos tanto de ecuaciones diferenciales, como basados en agentes de un sistema silvopastoril constituido por un cultivo (*L. leucocephala*), una plaga (*H. cubana*) y dos depredadores naturales de la plaga (*Ch. cacti* y *Chrysoperla* sp.). Se estudia numéricamente la dinámica poblacional del sistema y se discuten las implicaciones de los resultados en el manejo del mismo.

Palabras Clave: Multiagentes, modelo depredador presa, sistemas silvopastoriles.

Abstract

We develop both differential equations and agent based models of a silvopastoral system constituted by a crop (*L. leucocephala*), a plague (*H. cubana*) and two of its natural predators (*Ch. cacti* and *Chrysoperla* sp.). We study the population dynamics of the system numerically and discuss the implications of the obtained results in agricultural management.

Keywords: Multiagents, predator prey model, silvopastoral system.

1. Introducción

Un sistema silvopastoril es un tipo de agroforestería donde los árboles y/o arbustos interactúan con las forrajeras herbáceas y los animales ((Mahecha et al., 2002) y (Karki and Goodman, 2010)). En este sistema (una combinación de árboles, arbustos forrajeros y pastos con la producción ganadera en la finca) se requiere una administración de estos recursos de manera que perduren en el tiempo los árboles y arbustos, así como su aprovechamiento en la alimentación animal. En la actualidad el sector agropecuario contempla a los sistemas silvopastoriles como una opción para tener una mayor producción en lácticos y cárnicos. Es por ello que se han desarrollado metodologías de optimización y control, debido al abuso de pesticidas, suplementos dietéticos, así como a la mala distribución de forraje, entre otros. Todo lo anterior ha dejado en desventaja a este sector, sin embargo, asumimos la responsabilidad de atender dichas problemáticas en estos sistemas. Para esto, hacemos uso de modelos matemáticos, como multiagentes, que nos puedan

dar una representación abstracta y simulación computacional de lo antes mencionado. Por ejemplo, el comportamiento de los animales en un entorno específico; más precisamente, cómo podemos predecir la conducta de una plaga y sus dos depredadores en un agroecosistema.

En este trabajo usamos el modelo Lotka-Volterra para establecer el comportamiento de una presa con sus dos depredadores en un sistema biológico predeterminado. Para esto, nos basamos en un sistema de ecuaciones diferenciales que nos facilitará su comprensión. Después usamos modelos mucho más complicados (con más ecuaciones diferenciales y más parámetros) con la intención de entender de forma más realista un agroecosistema. Ahora bien, con el objetivo de aplicar modelos multiagentes, usamos los esquemas de las ecuaciones diferenciales para los modelos generalizados depredador-presa, describiendo todos los agentes que intervienen en el sistema. Lo anterior atiende parcialmente al problema planteado en (Bacab et al., 2013), que consiste en optimizar los recursos usados en estos sistemas silvopastoriles.

*Autor para correspondencia: carlos.islas@uacm.edu.mx

Correo electrónico dalila.almaguer@alumnos.uacm.edu.mx (Dalila Susana Almaguer-Suastegui), carlos.islas@uacm.edu.mx (Carlos Islas-Moreno), pabpad@gmail.com (Pablo Padilla-Longoria), marcoantonio.prado@uacm.edu.mx (Marco Antonio Prado-Záyo), david.vizuet@estudiante.uacm.edu.mx (David Fernando Vizuet-Morales).

En el trópico la ganadería bovina es una actividad importante, principalmente por su contribución en la oferta de productos cárnicos y lácteos para la alimentación humana (para mayor información referimos a ((Gallardo et al., 2006) y (Steinfeld et al., 2006))). Una de las estrategias para la recuperación y mejoramiento de los sistemas ganaderos es el establecimiento de sistemas silvopastoriles (SSP), los cuales, de acuerdo con (Mahecha et al., 2002) y (Karki and Goodman, 2010), constituyen un tipo de agroforestería donde los árboles y/o arbustos interactúan con las forrajeras herbáceas y los animales. En este sistema (una combinación de árboles, arbustos forrajeros y pastos con la producción ganadera en la finca) se requiere una administración de estos recursos de manera que perduren en el tiempo los árboles y arbustos, así como su aprovechamiento en la alimentación animal (por ejemplo la alimentación con el arbusto *L. leucocephala*). La importancia de los mismos (descritos en (Bacab et al., 2013)) es, “que pueden aportar mucho en mantener una cobertura vegetal continua sobre el suelo, posiblemente haciéndolo más fértil a mediano plazo, y además, trae beneficios verificables en la producción animal”. Se destaca en (Lozano et al., 2006) y (Yamamoto et al., 2007) que los SSP con *L. leucocephala*, al proveer múltiples beneficios, son una opción importante para mejorar las condiciones del suelo en muchas zonas ganaderas del trópico; ya que tienen un potencial de fijación de nitrógeno atmosférico de 52 a 320 kg por hectárea, dependiendo de la variedad, densidad y condiciones ambientales. Debido a la importancia de estos sistemas, se ha impulsado el diseño de nuevas modalidades para su aplicación en la ganadería tropical. Ante ello en (Murgueitio and Solorio, 2008), “se desarrollaron los sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala*, así como la generación de servicios ambientales que resultan de la presencia de altas densidades en esta leguminosa”.

La plaga de la *L. leucocephala*. En la Figura 1 se muestra la plaga *Heteropsylla cubana* (obtenida de (Creative Commons Attribution-Share-Alike License, 2015) y (Fabian, 2020)) y en la Figura 2, se muestran los dos depredadores *Chilocorus cacti* y *Chrysoperla* sp. (Bacab and Solorio, 2011) (obtenida de (Molina et al., 2002) y (Manuel, 2016)).



Figura 1: *Heteropsylla cubana* (Creative Commons Attribution-Share-Alike License, 2015) y *L. leucocephala* (Fabian, 2020).



Figura 2: Dos depredadores: (Molina et al., 2002) y (Manuel, 2016).

De acuerdo a (Valenciaga and Mora, 2000), *Heteropsylla cubana* es el principal insecto fitófago que habita en el cultivo

Leucaena leucocephala, sus ninfas y adultos provocan daños al succionar la savia de los **cochollos** y hojas jóvenes de la planta. Esto puede provocar que la planta se marchite y llegue a morir cuando hay ataques severos. Estos daños se favorecen por la expulsión de exudados tóxicos que depositan estos insectos sobre las plantas. El conocimiento del umbral de daño de una plaga determinada o, al menos, el coeficiente de nocividad, resulta muy importante, ya que ambos conceptos definen las posibles pérdidas económicas que provoca este organismo nocivo que se estudia. Los especialistas recomiendan siempre calcular este umbral, ya que define la cantidad de individuos mínimos capaces de ocasionar daños económicos y permite así accionar contra la plaga, antes de que ocurran pérdidas. Sin embargo, cuando no es posible su determinación, debe tratarse de hallar el coeficiente de nocividad, pues con este se conoce el grado de afectación que provoca el insecto fitófago a la planta, o sea la magnitud de sus daños. Obtener esta información es importante para estabilizar la población de esta plaga y encaminar a una optimización de las especies.

Modelos depredador-presa con ecuaciones diferenciales.

Por (Bacab et al., 2013) es importante ver el crecimiento de la *L. leucocephala*, por ello, comenzaremos con el **Modelo H. cubana vs. *L. leucocephala***. Se representa la interacción que tiene la plaga con el cultivo tratando de simular lo que se presenta en (Valenciaga and Mora, 2005) (ver la Figura 3):

$$\frac{dx}{dt} = \alpha x + \lambda - \mu, \quad (1)$$

donde

x - *H. cubana*;

λ - tasa de incremento de las poblaciones *H. cubana*;

μ - tasa de mortalidad natural de *H. cubana* y

α - coeficiente de competencia intraespecífica de las poblaciones *H. cubana*. En Miranda et al. (2007) con sus técnicas de muestreo, por ejemplo, se obtiene que $\mu = 0.4$, y $\lambda = 1.2$, por lo que la ecuación (1) queda como

$$\frac{dx}{dt} = 0.8x - 0.3x^2, \quad (2)$$

cuyos puntos de equilibrio son:

$$x_{0,1} = 0$$

$$x_{0,2} = 0.8/0.3.$$

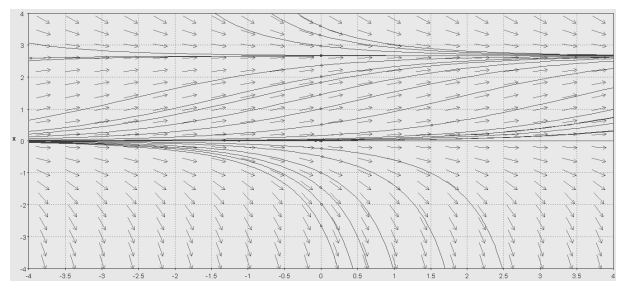


Figura 3: Se muestra la estabilidad de los puntos de equilibrio del modelo de crecimiento poblacional de *H. Cubana*.

Al usar el método numérico de Runge-Kutta (Penney and Edwards, 2009), en la ecuación (2) antes mencionada, encontramos un comportamiento representativo cerca de los puntos

de equilibrio. Esto último aún si no conociéramos la solución analítica (el código del método Runge-Kutta de esta ecuación, se puede encontrar en (Almaguer, 2022c).

Seguimos con el **Modelo H. cubana vs. Chrysoperla y Chilocorus cacti**, en este caso específico usamos el modelo propuesto por (Miranda et al., 2007) que describe el comportamiento de la plaga, pero ahora con la presencia de dos depredadores.

En éste se modela la interacción *Heteropsylla cubana* con *Chilocorus cacti* y *Chrysoperla sp.* en un ecosistema silvopastoril de *Leucaena leucocephala*. Observamos un modelo de ecuaciones diferenciales que describen el crecimiento de la H. cubana, con sus parámetros (mortalidad, natalidad y coeficientes de competencia), así como la interacción que tiene con dos depredadores (*Chrysoperla sp.* y *Chilocorus cacti*):

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= (\alpha x - \lambda x)x - cxy - dxz - \alpha x^2 \\ \frac{dy}{dt} &= e xy - \beta y^2 \\ \frac{dz}{dt} &= f xz - \gamma z^2, \end{aligned} \tag{3}$$

donde

- x - H. cubana;
- y - Ch. cacti;
- z - Chrysoperla sp;
- λ - tasa de incremento de las poblaciones H. cubana;
- μ - tasa de mortalidad natural de H. cubana;
- c - porcentaje de pérdida de H. cubana, atribuida a Ch. cacti;
- d - porcentaje de pérdida de H. cubana, atribuida a Chrysoperla sp;
- e - porcentaje de incremento de Ch. cacti por ingerir una presa y
- f - porcentaje de incremento de Chrysoperla sp., por ingerir una presa
- α, β, γ - coeficiente de competencia intraespecífica de las poblaciones H. cubana, Chilocorus cacti y Chrysoperla sp., respectivamente.

De acuerdo a (Miranda et al., 2007), de los muestreos realizados en campo, se obtuvieron los siguientes valores estimados de los parámetros adimensionales: $\lambda = 1.2$ y $\mu = 0.4$ (otros parámetros y algunos ejemplos se pueden encontrar en (Valenciaga and Mora, 2005) y (Sabelis, 1985)). Se seleccionaron los coeficientes $c = 0.11$ y $d = 0.01$.

Para la condición inicial (x_0, y_0, z_0) fue necesario utilizar un muestreo, con un recorrido en zig-zag sobre la diagonal del campo, formando bloques de 0.5 hectáreas. En cinco de estos bloques, se recolectaron los insectos presentes que se depositaron en bolsas plásticas exponiéndolos a 40 °C durante 10 minutos con la finalidad de provocar su muerte para facilitar la clasificación taxonómica (Valenciaga and Mora, 2000) y Machín et al. (2002). Después se contabilizaron los insectos de H. cubana, así como sus enemigos naturales (Ch. cacti y Chrysoperla sp.). Los parámetros del modelo (tasas de incremento y mortalidad de las poblaciones) se estimaron según el promedio de los cambios poblacionales que se produjeron de un muestreo a otro. El valor del resto de los coeficientes se estima a partir del comportamiento biológico de las poblaciones.

Los valores del incremento poblacional de estos depredadores fueron $e = 0.71$ y $f = 0.63$. Los niveles de competencia intraespecífica se tomaron de acuerdo con el nicho ecológico y el alimento de las poblaciones ($\alpha = 0.3, \beta = 0.0003$ y $\gamma = 0.0002$) Miranda et al. (2007), dando como resultado las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= (0.8x - 0.11xy - 0.01xz - 0.3x^2) \\ \frac{dy}{dt} &= 0.71xy - 0.0003y^2 \\ \frac{dz}{dt} &= 0.63xz - 0.0002z^2. \end{aligned} \tag{4}$$

Tomando como base las ecuaciones diferenciales y utilizando el Método Runge-Kutta de orden cuatro (ver el código completo en (Almaguer, 2022c) y (Almaguer, 2021)) se concluye que los puntos de equilibrio son: $(0, 0, 0)$, $(2.6, 0, 0)$, $(0.002, 6.48, 8.62)$, $(0.003, 7.26, 0)$ y $(0.025, 0, 79.24)$ (ver la Figura 4 y comparar con Miranda et al. (2007)).

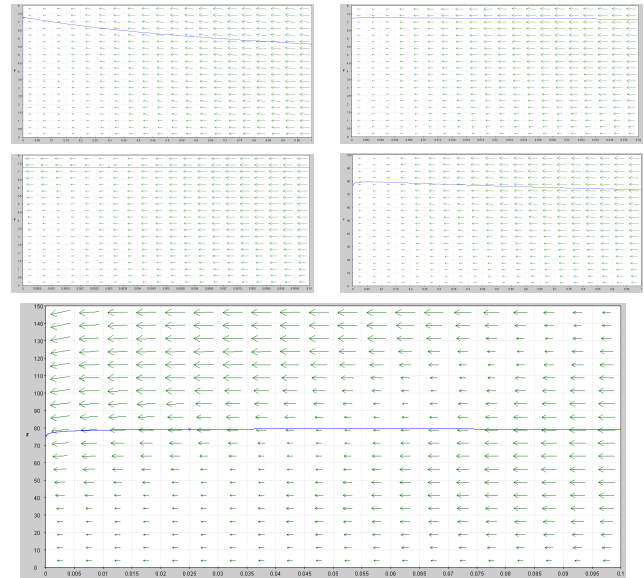


Figura 4: Se ilustran los puntos de equilibrio del sistema (3): $(0, 0, 0)$, $(2.6, 0, 0)$, $(0.002, 6.48, 8.62)$, $(0.003, 7.26, 0)$ y $(0.025, 0, 79.24)$ de H. cubana vs. Ch. cacti y Chrysoperla sp.

Notemos que la interacción con un solo depredador y los puntos de equilibrio hacen que la plaga tienda a cero y el depredador se mantenga estable.

Modelo H. cubana vs. L. leucocephala y sus dos depredadores (Chrysoperla sp. y Ch. cacti), este último modelo representa de manera más amplia el sistema silvopastoril.

Si aumentamos *L. leucocephala*, tendremos el siguiente sistema:

$$\begin{aligned} \frac{dl}{dt} &= \omega l - \kappa l - gly - hlz - ilx + \phi l \\ \frac{dx}{dt} &= mlx - \alpha x^2 \\ \frac{dy}{dt} &= jly - \beta y^2 \\ \frac{dz}{dt} &= klz - \gamma z^2, \end{aligned} \tag{5}$$

donde

x - H. cubana;

y - Ch. cacti;

z - Chrysoperla sp;

l - L. leucocephala;

ω - tasa de incremento de L. leucocephala;

κ - tasa de mortalidad natural de L. leucocephala;

g - porcentaje de pérdida de L. leucocephala, atribuida a Ch. cacti;

h - porcentaje de pérdida de L. leucocephala, atribuida a Chrysoperla sp;

i - porcentaje de pérdida de L. leucocephala, atribuida a H. Cubana;

j - porcentaje de incremento de Ch. cacti por ingerir L. leucocephala;

k - porcentaje de incremento de Chrysoperla sp por ingerir Leucaena;

m - porcentaje de incremento de H. cubana por ingerir L. leucocephala;

o - porcentaje de incremento de vaca por ingerir L. leucocephala y

α, β, γ y ϕ - coeficiente de competencia intraespecífica de las poblaciones H. cubana, Chilocorus cacti, Chrysoperla sp. y L. leucocephala respectivamente.

Una solución numérica es presentada en (Almaguer, 2022c) cuyo resultado se ve en la Figura 5.

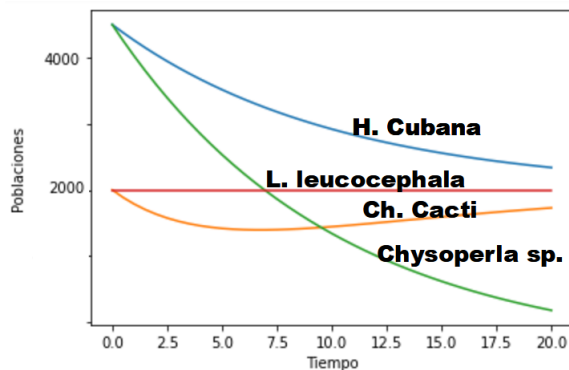


Figura 5: Soluciones numéricas de las ecuaciones diferenciales del modelo H. cubana vs. L. leucocephala y sus dos depredadores (Chrysoperla sp. y Ch. cacti).

En la sección 5 será atendido este problema utilizando un modelo basado en agentes para encontrar las soluciones.

2. Modelos basados en agentes

Un tipo particular de modelado es el basado en agentes o modelado basado en individuos, como se les denomina generalmente en el ámbito de la biología y ecología (Daniela and Erkki, 2012). Por completez presentamos las características principales de un modelo basado en agentes.

Se entiende que los modelos basados en agentes (MBA) son creados, no sólo con el propósito de modelar un sistema, como un todo, sino para representar de forma individual a los agentes que forman parte de dicho sistema.

Los individuos o agentes pueden representar a seres humanos, instituciones, organismos, células, etc. Por lo que se da por

entendido que los MBA son capaces de describir a los individuos como una entidad única y autónoma, la cual tiene la capacidad de interactuar con su entorno. Cabe mencionar que los agentes se diferencian a través de sus particularidades, como son: tamaño, ubicación, color, género, etc., actuando cada uno de éstos mismos, de acuerdo a sus propios objetivos establecidos de forma autónoma. Una característica importante atribuida a los agentes, es el hecho de poseer la capacidad de adaptarse; pueden ajustar su comportamiento dependiendo de su estado actual, así como de los demás involucrados y del entorno Rails-back and Grimm (2011). Por todo lo anterior los MBA tienen una dinámica propia del sistema, que surge a partir de las interacciones individuales de cada agente, conviviendo dentro de su entorno (ver Figura 6).

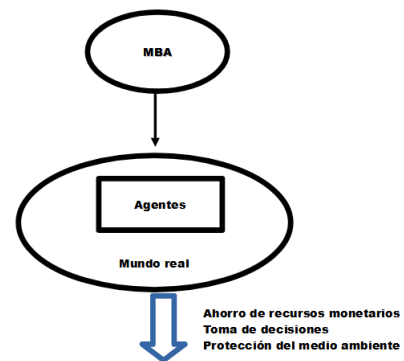


Figura 6: Características y etapas del modelo basado en agentes.

Fundamentos del modelo basado en agentes (MBA). "Un modelo basado en agentes se identifica como los tipos de individuos que representan las entidades significativas del sistema, sus interacciones y el entorno en el que están situados éstos mismos" (Mestras et al., 2012).

Las siguientes características y etapas de un modelo basado en agentes pueden ser consultadas en (Mestras et al., 2012).

Características de los agentes:

- Entidades identificables, poseen un conjunto de características y reglas que gobiernan su comportamiento, pueden tomar decisiones por sí mismos.
- Los agentes deciden independientemente sus acciones, con base a sus objetivos establecidos; es decir son autónomos.
- Capacidad de adaptar su comportamiento a las circunstancias basándose en la experiencia adquirida, de alguna manera poseen cierta memoria.
- Rasgos diferentes, lo que permite reconocer y distinguir a otros agentes. Pueden interactuar de manera distinta con unos agentes y otros, de acuerdo a sus rasgos o afinidades.
- Se sitúan en un entorno físico, donde pueden sentir, así como actuar, lo que les permite interactuar con otros agentes.

Etapas de la modelación basada en agentes:

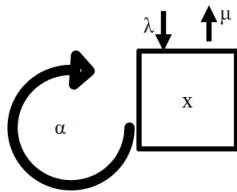
- Abstracción del sistema objeto de estudio, identificar el contexto y propósito del modelo. Esta tarea es responsabilidad de los expertos del área de estudio.
- Diseño y especificación del modelo basado en agentes. Para realizar esta actividad el modelador se apoyará en el paradigma de agentes.

- Transformación en un modelo computacional, que se adapte a las características de la plataforma de simulación.
- Programación del modelo sobre la plataforma.
- Inferencia: obtención de las conclusiones a partir de las premisas del modelo.
- Análisis de resultados; permite verificar el comportamiento del modelo computacional.
- Interpretación de los resultados; valida el modelo basado en agentes.

3. Modelo multiagente de la plaga

El modelo propuesto intenta representar de manera realista, el comportamiento de la presa (H. cubana) con su alimento, la L. leucocephala. Para esto se implementó un modelo basado en agentes con la plataforma NetLogo, en el que se presentan dos agentes conviviendo de forma natural en un ecosistema. Los agentes conviven en el mismo ambiente. Dicho entorno describe el espacio de interacción de las especies que se mueven aleatoriamente y al interceptarse, crecen o decrecen, dependiendo de los parámetros involucrados, además de que cada agente tiene un parámetro propio de crecimiento temporal.

Específicamente vemos la creación de dos agentes: H. cubana y L. leucocephala. Se colocan siete deslizadores (*slider button*) para modificar el crecimiento del pasto, número de plagas, cultivo (L. leucocephala), tasa de reproducción de ambos agentes, así como ganancia por comida. Usamos el siguiente esquema para tomar como base la ecuación diferencial usada en la sección anterior.



$$\frac{dx}{dt} = \alpha x + \lambda - \mu.$$

Una vez que se formuló el problema con las hipótesis de la sección anterior, se crea el programa NetLogo, generando el código (Almaguer, 2022a).

4. Modelo H. cubana vs. Chrysoperla sp. y Ch.cacti

En esta sección se añaden más deslizadores, pues entra en contacto la plaga (H. cubana) y sus dos depredadores (Ch. cacti y Chrysoperla sp.). Nos basamos en el siguiente esquema de la sección 2. Ahora se muestra un resultado de este modelo (una corrida del programa), con población inicial H. cubana 20, tasa de reproducción 5 por ciento y ganancia por comida 5; población inicial de L. leucocephala 50, tasa de reproducción 10 por ciento y ganancia por comida (espacio de ramoneo) 20; con población inicial Ch. cacti 80, tasa de reproducción 2 por ciento y ganancia por comida 20; población inicial de Chrysoperla sp. 80, tasa de reproducción 6 por ciento y ganancia por comida 20.

Podemos observar que la plaga (H. cubana), así como el cultivo (L. leucocephala) están interactuando en este agroecosistema con Ch. cacti y Chrysoperla sp; sin embargo, de acuerdo a los parámetros de interacción, la H. cubana, mantiene bajos niveles de crecimiento, lo que permite que la planta siga creciendo de forma natural (ver la Figura 7).

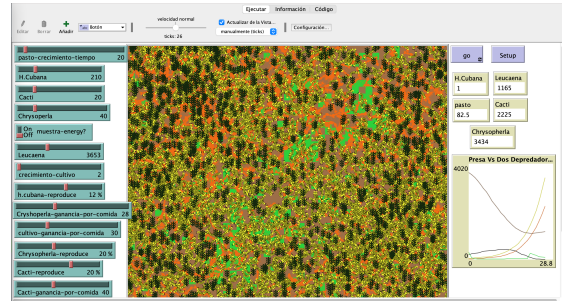
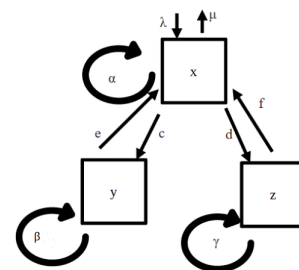


Figura 7: Ventana del programa de NetLogo de: H. Cubana vs. Leucaena y sus dos depredadores (Cacti y Chrysoperla).

Esquema	
Especie	Cantidad
Población inicial de H. cubana	20
Tasa de reproducción de H. cubana	5 %
Ganancia por comida de H. cubana	5
Población inicial de L. leucocephala	50
Tasa de reproducción de L. leucocephala	10 %
Ganancia por comida de L. leucocephala (espacio ramoneo)	20
Población inicial de Ch. cacti	80
Tasa de reproducción de Ch. cacti	2 %
Ganancia por comida de Ch. cacti	20
Población inicial de Chrysoperla sp	80
Tasa de reproducción de Chrysoperla sp	6 %
Ganancia por comida de Chrysoperla sp	20



$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= (\alpha x - \lambda x) - cxy - dxz - \alpha x^2 \\ \frac{dy}{dt} &= ey - \beta y^2 \\ \frac{dz}{dt} &= fzx - \gamma z^2. \end{aligned}$$

El código completo del Programa de NetLogo está en (Almaguer, 2022b).

Especie	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	Corrida 5	Corrida 6
L. leucocephala ganancia por comida	0	0	0	10	10	10
Cryshoperla sp. ganancia por comida	10	15	20	10	15	20
Ch. cacti ganancia por comida	17	17	17	17	17	17
Población inicial de Chrysoperla sp.	40	40	40	40	40	40
Población inicial de L. leucocephala	299	299	299	299	299	299
Tasa de reproducción de H. cubana	20	20	20	20	20	20
Población inicial de H.cubana	210	210	210	210	210	210
Tasa de reproducción de Ch. cacti	20	20	20	20	20	20
H.cubana ganancia por comida	40	40	40	40	40	40
Tasa de reproducción de Chrysoperla sp.	20	20	20	20	20	20
Tasa de reproducción de L. Leucocephala	13	13	13	13	13	13
Población inicial de Ch. cacti	20	20	20	20	20	20

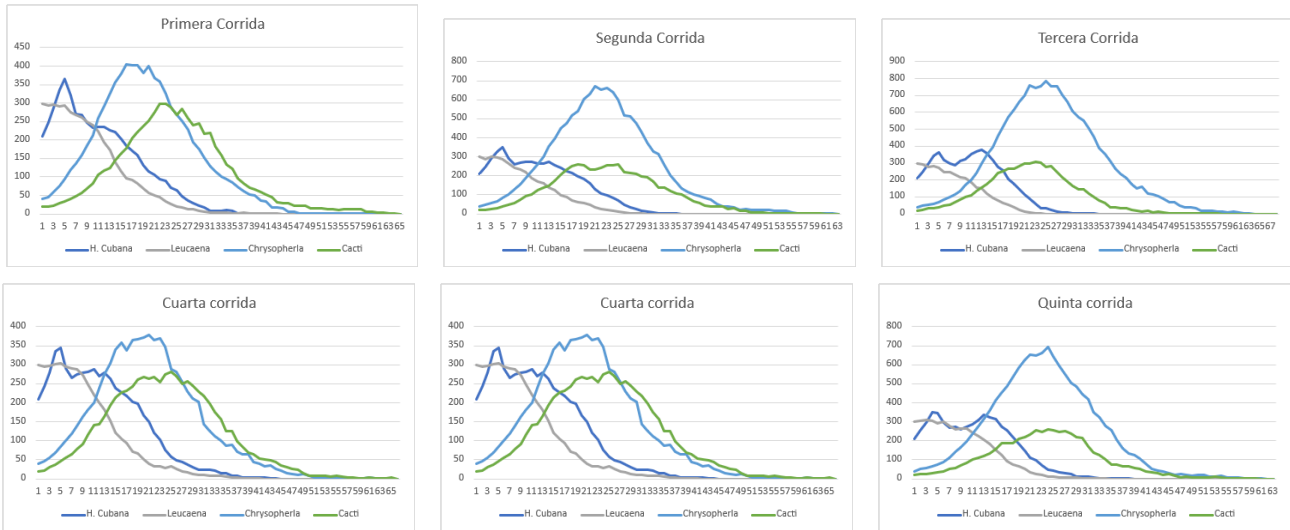


Figura 8: Corridas del programa en NetLogo de H. Cubana vs. Leucaena y sus dos depredadores (Cacti y Chrysoperla).

Al intervenir más variables, después de cierto tiempo, disminuye la plaga (H. cubana) controlándola con sus dos depredadores (Chrysoperla sp. y Ch. cacti). Esto requiere que el cultivo (L. leucocephala), se optimice de forma natural con los parámetros de interacción del agroecosistema. Cabe mencionar que en este modelo, la plaga come mucho cultivo y tiene una tasa de reproducción y de mortandad bastante alta.

Con los parámetros que se destacan del analizador de comportamiento de NetLogo usando: tasa de reproducción de Chrysoperla sp. 5, H. cubana-ganancia-por-comida 4, número inicial de Ch. cacti 20, número inicial de Chrysoperla sp. 45, tasa de reproducción de H. cubana 4, Chrysoperla sp. ganancia por comida 20, número inicial de H. cubana 210, Ch. cacti-ganancia-por-comida 20 y tasa de reproducción de Ch. cacti 5. Podemos observar que en todas las gráficas se controla a la plaga mediante los dos depredadores, pues lo que se hizo, fue fijar el parámetro de la tasa de reproducción de H. cubana, es decir, se mantuvo constante, sólo se incrementa la tasa de reproducción de los depredadores. Por ejemplo en la gráfica tanto Ch. cacti como Chrysoperla sp. tienen la misma tasa; a pesar de eso sube más la población de Ch. cacti. Después en la segunda y tercera gráficas se incrementó una unidad en este último. En la cuarta corrida aumenta la tasa de reproducción de Chrysoperla sp. 6, y Ch. cacti sigue con su parámetro inicial 5; en la quinta se mantiene Chrysoperla sp. y Ch. cacti 6; en la sexta Chrysoperla sp. 6 y Ch. cacti 7. Con base en lo anterior, podemos inferir que lo mejor es mantener parámetros bajos de reproducción de H. cubana y sólo ajustar las tasas de reproducción, así como la ganancia por consumo de presa de los depredadores con la

finalidad de estabilizar el agroecosistema (ver la Figura 8).

Notemos que, en cada una de las corridas, se observa un modelo presa dos depredadores, donde intervienen tres especies la plaga (H. cubana) y dos depredadores (Ch. cacti y Chrysoperla sp.). Se observa que estos dos controlan a la presa, pues a medida que van perdiendo energía los depredadores, vuelve a subir la plaga, después de cierto tiempo mueren la plaga y los depredadores.

5. Resultados

En los trabajos ya citados (Bacab et al., 2013) y (Miranda et al., 2007) se concluye que los modelos de ecuaciones diferenciales describen de manera realista la dinámica de los sistemas silvopastoriles. En este trabajo hemos reproducido la dinámica de dichos modelos mediante modelos basados en agentes. Esto último nos permite validar, en cierta medida, las versiones más complejas de los modelos basados en agentes aquí presentados.

Comparando los modelos de ecuaciones diferenciales y los basados en agentes, podemos concluir que: la plaga (H. cubana), así como el cultivo (L. leucocephala) están interactuando en un agroecosistema; sin embargo, de acuerdo a los parámetros de interacción, H. cubana mantiene bajos niveles de crecimiento, lo que permite que la planta siga creciendo de forma natural. Después de cierto tiempo, disminuye de forma radical la H. cubana controlándola con su depredador Ch. cacti. Esto quiere decir que al introducir una variable más al agroecosistema podemos controlar la producción de L. leucocephala. Además, implementamos un modelo presa dos depredadores,

donde intervienen tres especies la plaga (*H. cubana*) y dos depredadores (*Ch. cacti* y *Chrysoperla* sp.), en el que se observa que estos dos controlan a la presa, pues a medida que van perdiendo energía los depredadores, vuelve a subir la plaga, después de cierto tiempo, mueren la plaga y los depredadores.

Cabe mencionar que las simulaciones que se presentan de los modelos basados en agentes son representativas del comportamiento del sistema silvopastoril entre una gran cantidad de simulaciones realizadas. En otras palabras, el comportamiento que se exhibe en estas simulaciones es de alguna manera prototípico.

La validación rigurosa de la significancia estadística de las simulaciones de los modelos basados en agentes es objeto de estudio de otro trabajo.

Referencias

- Almaguer, D. (2021). Control biológico de una plaga usando un modelo generalizado depredador presa con multiagentes. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de la Ciudad de México UACM.
- Almaguer, D. (2022a). Netlogo. <https://github.com/Grayfenix/NetLogo>.
- Almaguer, D. (2022b). Netlogo. <https://github.com/Grayfenix/NetLogo>.
- Almaguer, D. (2022c). Runge-kutta. <https://github.com/Grayfenix/RungeKutta>.
- Bacab, H. M., Madera, N. B., Solorio, F. J., Vera, F., and Marrufo, D. F. (2013). Los sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala*: una opción para la ganadería tropical. *Universidad de Colima, Volumen 17, número 3, páginas 67-81*.
- Bacab, H. M. and Solorio, F. J. (2011). Oferta y consumo de forraje y producción de leche en ganado de doble propósito manejado en sistemas silvopastoriles en Tepalcatepec, Michoacán. *Tropical and Subtropical Agroecosystems 13*, pages 271–278.
- Creative Commons Attribution-Share-Alike License (2015). *Heteropsylla cubana*— news · newspapers · books · scholar · jstor. <https://www.naturalista.mx/taxa/330261-Heteropsylla-cubana>.
- Daniela, C. and Erkki, S. (2012). *Computational Mathematical Modeling: An Integrated Approach Across Scales*. Siam.
- Fabian, M. V. (2020). Imagen tomada de *Leucaena*, *Acacia* forrajera (*Leucaena leucocephala*). <https://infopastosyforrajes.com/arb-ol-forrajero/leucaena/>.
- Gallardo, J. L., Luna, M. E., and Albarrán, D. M. (2006). Situación actual y perspectivas de la producción de carne de bovino en México. *Coordinación General de Ganadería. SAGARPA. México*, page 45.
- Karki, U. and Goodman, M. S. (2010). Cattle distribution and behavior in southern-pine silvopasture versus open-pasture. *Agroforestry Systems 78*, pages pp. 159–168.
- Lozano, M. D., Amparo, C. G., Vanegas, M. A., Figueroa, L., Ramírez, G. M., Carrero, H. G., Constanza, V. N., and Aguirre, M. C. (2006). Sistemas silvopastoriles con uso de biofertilizantes: opción tecnológica para el Valle Cálido del Alto Magdalena. *CORPOICA. Colombia*, page pp. 32.
- Machín, L. M., Valenciaga, N., Ruiz, T. E., Mora, C., and Noda, A. (2002). Disposición espacial y temporal de la *Heteropsylla cubana* (Crawford) en un área de *Leucaena*. *Rev. Cubana Cienc. Agríc.*
- Mahecha, L., Rosales, M., Duran, C. V., Molina, C. H., Molina, E. J., and Uribe, F. O. (2002). Evaluación del forraje y los animales a través del año en un silvopastoril conformado por *Cynodon plectostachyus*, *Leucaena leucocephala* y *Prosopis juliflora*, en el Valle del Cauca, Colombia. *CIPAV. Colombia*, page <http://www.cipav.org.co/redagrorfor/memorias99/SeminInd.htm>. (Consulta el 10 de febrero de 2011).
- Manuel, S. (2016). Imagen tomada de *Chrysoperla* sp". *España, Lugo*.
- Mestras, J. P., Paredes, A. L., and Ordax, J. M. G. (2012). Modelo basado en agentes para el estudio de sistemas complejos. *Revista Novática*, pages 13–18.
- Miranda, I., Herrera, D., Valenciaga, N., Mercedes, L., and Fernández, M. (2007). Modelación de la interacción presa-dos depredadores para el sistema *heteropsylla cubana* - *Chilocorus cacti* - *Chrysoperla* sp. *Revista Cubana de Ciencia Agrícolas, Instituto de Ciencia Animal Cuba, Volumen 41, número 4, páginas: 313-316*.
- Molina, J. C., Pereira, G. P., and Quirós, M. (2002). Insectos y Ácaros del guayabo (*psidium guajava* l.) en plantaciones comerciales del estado Zulia, Venezuela. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*, pages pp. 140–148.
- Murgueitio, E. and Solorio, H. (2008). El sistema silvopastoril intensivo, un modelo exitoso para la competitividad ganadera en Colombia y México. *En: V Congreso Latinoamericano de Agroforestería para la Producción Pecuaria Sostenible. Universidad Rómulo Gallegos, Universidad Central de Venezuela, Universidad de Zulia*, page Venezuela (Publicación electrónica).
- Penney, D. E. and Edwards, C. H. (2009). *Ecuaciones Diferenciales y problemas con valores en la frontera. Computo y Modelado*. Editorial Pearson.
- Railsback, S. F. and Grimm, V. (2011). *Agent-based and individual-based modeling: a practical introduction*. Princeton university press.
- Sabelis, M. W. (1985). *Capacity for population increase. En W. Helle M. W. Spider mites: their biology, natural enemies control*. World Crop Pest.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., and de Haan, C. (2006). *Livestock's long shadow. environmental issues and options. LEAD-FAO. Italia*, page pp. 377.
- Valenciaga, N. and Mora, C. (2000). Estudio poblacional de insectos en siembras de *leucaena* intercaladas con maíz (*Zea mays*) y *vigna* (*Vigna unguiculata*). *Rev. Cubana Cienc. Agríc.*, page 34:85.
- Valenciaga, N. and Mora, C. (2005). Determinación del coeficiente de nocividad del psílido *heteropsylla cubana* en condiciones de insectarios. *Rev. Cubana Cienc. Agríc.*, page 39:93.
- Yamamoto, W., Dewi, I. A., and Ibrahim, M. (2007). Effects of silvopastoral areas on milk production at dual-purpose cattle farms at the semi-humid old agricultural frontier in central Nicaragua. *Agricultural Systems 94*, pages pp. 368–375.