Modelado Presa-Depredador mediante Sistema Multiagente

Claudia Sánchez[1,2], Natalia Bustos[1], Miguel Ré[1,2]
Daniel Brusa[1,2], Javier Britch[1,2,*]

[1]Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Córdoba
[2]Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación (FaMAF), Córdoba
[*]javierbritch@hotmail.com

Resumen

En este trabajo se presenta el modelado de un ecosistema sencillo de presas y depredadores, mediante un Sistema Multiagente donde cada individuo de una especie es caracterizado como un círculo de cierto radio que se desplaza con una rapidez constante en un universo plano finito. Las interacciones entre agentes son caracterizadas por las superposiciones de áreas de cada agente durante sus desplazamientos. Este modelo permite ajustar condiciones que muestran una evolución temporal oscilatoria acoplada de las poblaciones, propia de los datos de campo y coincidente con distintas soluciones a la ecuación de Lotka-Volterra.

Palabras claves: Modelado estocástico, presa-depredador, Lotka-Volterra, Sistema Multiagente.

Abstract

In this work, the modeling of a simple ecosystem of prey and predators is presented, through a multi-agent system where each individual of a species is characterized as a circle of a certain radius that moves with a constant speed in a finite plane universe. The interactions between agents are characterized by the overlapping of areas of each agent during their displacements. This model allows adjusting conditions that show a coupled oscillatory temporal evolution of the populations, typical of the field data and in agreement with different solutions to the Lotka-Volterra equation.

Keywords: Stochastic Modeling, Prey-Predator, Lotka-Volterra, Multiagent System

1. Introducción

Muchos sistemas reales pueden ser representados como conjuntos de unidades dinámicas capaces de dar lugar a formas de comportamientos colectivos cualitativamente diferentes de la dinámica individual. Este tipo de comportamiento define a los llamados sistemas complejos. El entendimiento de la complejidad en general y en particular en los ecosistemas surge a partir de la dinámica de las interacciones auto-organizantes[1] de las partes. Las interacciones permiten mantener la integridad del sistema, a través de la autonomía y la autorregulación de éstas. Estos rasgos son los que le proporcionan a los sistemas dinámicos la suficiente robustez y posibilidad de cambio ante las variaciones internas y externas [1].

El modelado ecosistémico ha sido un objetivo de la ecología desde su comienzo [2]. Las distintas aproximaciones validadas sin embargo, han sido sintéticas e integrales, dando descripción de grandes grupos poblacionales o de la evolución temporal de los recursos abióticos más importantes disponibles [3, 4]. No hay aún indicadores cuantitativos de como la biodiversidad permite la flexibilidad ni tampoco del efecto que pueden tener las alteraciones de distintos factores en la evolucion de las poblaciones y recursos. Por otra parte, es aceptado que estos sistemas no pueden modelarse de manera determinista puesto que las trayectorias de cualquier sistema complejo en el espacio de fases es divergente y por lo tanto a partir de pocos elementos su comportamiento se vuelve caótico [5]. Es desde este punto de vista que la construcción de indicadores integrales del estado del ecosistema se tornan esenciales para un entendimiento cuantitativo general, con el objeto de interpretar el comportamiento desde una teoría que busque simplificar la descripción y sitúe los ecosistemas en una termodinámica alejada del equilibrio [6]. De esta manera, estas nuevas perspectivas permiten modelar el comportamiento de sistemas simples como el de presa-depredador, los cuales se encuentran bien estudiados y presentan comportamientos conocidos [7, 8]. En particular, la descripción de ésta relación ha sido abordada a través de Sistemas Multiagentes (SMA) [9, 10, 11, 12], constituyendo una potente herramienta, ya que posibilita la representación de los comportamientos y las interacciones de los individuos [13]. Sin embargo, para comenzar a tener cierto nivel de confianza, es necesario contrastarlo con datos confiables. La escasez de datos experimentales en este campo es consecuencia de las dificultades para su obtención [14]. Por ello se decidió modelar un sistema presa-depredador a través de Sistemas Multiagentes y contrastar [15] contra los resultados de las ecuaciones analíticas de Lotka-Volterra [16]. Es decir, reobtener las características distintivas del modelo con el modelo Multiagente, para luego complejizarlo de manera gradual y comenzar a validad la razonabilidad de los resultados obtenidos mediante una constratación directa de las series temporales.

2. Fundamentos teóricos

La representación analítica de la relación presa-depredador, desarrollada por Alfred Lotka y Vito Volterra da lugar a un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas, conocidas como ecuaciones de Lotka-Volterra [16], las cuales han sido ampliamente estudiada y aplicadas [7, 17, 18]. Las ecuaciones de Lotka-Volerra describen la evolución temporal de las poblaciones de presas y depredadores mediante parámetros externos que establecen el nacimiento y muerte de ambas especies y funciones que regulan

[1] La auto-organización es un proceso por el cual se alcanza dinámicamente la función y el comportamiento global de un sistema a partir de las interacciones de sus elementos.

la interacción.

Por otra parte, la teoría de Sistemas Multiagentes permite describir a un agente como una entidad que actúa sobre su ambiente [19, 20]. Sobre esta base se estima que los agentes son entidades que perciben su ambiente (entradas) y actúan (cambio de estado) en concordancia, deliberando sobre las posibilidades de sus acciones (salidas). Por lo tanto, un Sistema Multiagente es un sistema que está compuesto a nivel micro por agentes que tienen un comportamiento autónomo y proactivo e interactúan con el medio ambiente, resultando en su funcionamiento en un comportamiento del sistema global que se observa a nivel macro.

2.1. Modelo presa-depredador de Lotka Volterra

Consideremos un hábitat en donde coexisten dos especies que interacúan entre ellas. La especie $N(t)$ será denominada presa y tiene una fuente de alimentación por la que no compite la otra especie $P(t)$, denominada depredador; teniendo a $N(t)$ en su dieta. De esta manera $N(t)$ representa el número de presas en el instante t, mientras que $P(t)$ indica la cantidad de depredadores en ese mismo instante de tiempo t. El modelo presa-depredador de Lotka-Volterra viene dado por:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \alpha N(t) - \beta N(t)P(t) \tag{2.1}$$

$$\frac{dP(t)}{dt} = -\gamma P(t) + \delta N(t)P(t) \tag{2.2}$$

Siendo α, β, γ y δ constantes que regulan la evolución de cada especie y su interacción. Podemos notar que en ausencia de depredadores, las presas tienen un crecimiento Malthusiano siendo α dicha tasa, la cual puede interepretarse como la tasa de reproducción de la población. En ausencia de presas, los depredadores decrecen exponencialmente siendo su tasa de decrecimiento γ pudiendo interpretarse como la tasa de mortalidad. De la misma manera, β puede interpretarse como la susceptibilidad de las presas a ser atrapadas, mientras que δ puede ser interpetrada como la eficacia de los depredadores para atrapar presas. Podemos notar que las poblaciones de presas y depredadores, de acuerdo con este planteo, evolucionan cíclicamente [16]. Las presas, en presencia de pocos depredadores, comienzan a crecer, pero la abundancia de presas produce, con un cierto retraso, el crecimiento de los depredadores [21]. Cuando los depredadores son muchos la población de presas comienza a disminuir y esto provoca la disminución de depredadores. La frecuencia de las oscilaciones poblacionales y su amplitud dependen de las constantes y de las condiciones iniciales [22]. Note que el modelo de Lotka-Volterra asume que los recursos son ilimitados, tanto para la presa como para el depredador. Es decir el modelo tienen una respuesta funcional [2] denominada de tipo I.

Los puntos de equilibrios [24, 25] del sistema Lotka-Volterra están dados por

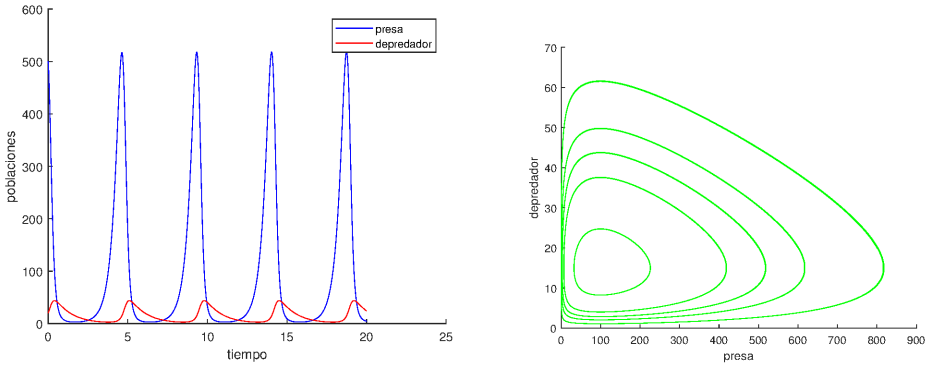
$$x_1^* = (0,0) \tag{2.3}$$

$$x_2^* = (\frac{\gamma}{\delta}, \frac{\alpha}{\beta}) \tag{2.4}$$

donde la primera solución implica la extinción total de ambas especies. La segunda ecuación muestra una situación de coexistencia de ambas especies.

[2] El término, usado originalmente por Solomon [23], describe la relación entre el número de presas consumidas por un depredador en función de la densidad de la presa, en un espacio e intervalos de tiempo fijos.

Podemos notar a partir del análisis de estabilidad [24, 25] del sistema, que el primer punto fijo es un punto crítico inestable, mientras para el punto fijo de coexistencia de especies hay un centro.



(a) (b)

Figura 1: a) Serie temporal de la evolución de las poblaciones para el sistema de ecuaciones diferenciales de Lotka-Volterra. En azul las presas y en rojo los depredadores b) Diagrama de fase del sistema de ecuaciones diferenciales de Lotka-Volterra para varias condiciones iniciales

La Figura 1a muestra la evolución temporal presa-depredador para el sistema de ecuaciones diferenciales de Lotka-Volterra, mientras que la Figura 1b muestra las trayectorias cerradas del sistema.

2.1.1. Otros Modelos Analíticos Presa-Depredador

La ecuación 2.1 presenta una explosión en la población de presas en el caso particular de ausencia de depredadores. Para corregir este comportamiento se introduce un término logístico [26, 27], que da cuenta de la competencia intraespecie cuando el número de presas se hace arbitrariamente grande. Aunque la población de depredadores no presenta en ningún caso el crecimiento exponencial, se puede introducir también el término logístico para modelar la competencia intraespecie de los depredadores.

De esta forma la ecuación diferencial toma la forma:

$$\frac{dN(t)}{dt} = N(t)(\alpha - \beta P(t) - eN(t)) \tag{2.5}$$

$$\frac{dP(t)}{dt} = P(t)(-\gamma + \delta N(t) + fP(t)) \tag{2.6}$$

con $e > 0$ y $f \geq 0$.

Si la población de depredadores es nula, la ecuación 2.5 toma la forma

$$\frac{dN(t)}{dt} = \alpha(1 - \frac{N(t)}{K}) \tag{2.7}$$

que es una ecuación logística, donde $K = \frac{\alpha}{e}$ es la capacidad límite, saturación o carga máxima de la población de presas.

Los puntos de equilibrio del modelo presa-depredador se obtienen linealizando el sistema de ecuaciones y del análisis de estabilidad se obtiene que el punto de equilibrio $x_1^* = (0, 0)$ es un punto crítico inestable. El punto crítico $x_2^* = (\frac{\alpha}{e}, 0)$ es un punto

silla (saddle point), mientras que los puntos $x_3^* = (0, \frac{\gamma}{f})$ y $x_4^* = (\frac{\beta\gamma+\alpha f}{\beta\delta+ef}, \frac{\alpha\delta-\gamma e}{\beta\delta+ef})$ son asintóticamente estables. Es decir, la incorporación del término logístico aumenta la estabilidad estructural del sistema. Note que aunque la estabilidad aumenta, no se obtienen órbitas periódicas [25]. Dado que las órbitas periódicas con estabilidad estructural sí se presentan en la naturaleza, usualmente se introducen modelos diferenciales mejorados.

La Ecuación Ecológica es un modelo general que describe de manera más realista el sistema presa-depredador y esta dada por el siguiente sistema de ecuaciones

$$\frac{dN(t)}{dt} = N(t)(g(N) - \phi(N, P)) \tag{2.8}$$

$$\frac{dP(t)}{dt} = P(t)(-\gamma + q(N)) \tag{2.9}$$

donde g, ϕ y q son funciones respuestas [26, 27]. Una característica importante de este modelo es el cambio de estabilidad del punto crítico. Este punto se bifurca en un punto crítico inestable más un atractor cíclico. Dicho comportamiento se denomina bifurcación de Hopf [24].

2.2. La interacción presa y depredador en la naturaleza

Se ha considerado que las poblaciones de depredadores y sus presas están en equilibrio dinámico debido a que se rigen por relaciones denso-dependientes, es decir, el efecto de una especie sobre la otra depende de la abundancia de ambas [28, 29, 30].

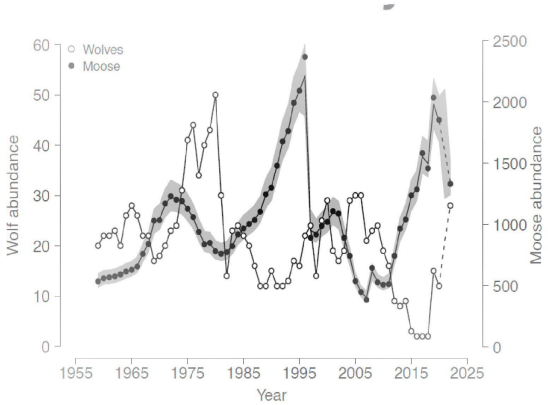


Figura 2: Fluctuaciones en la abundancia de lobos y alces en el Parque Nacional Isla Royale, 1959-2022 [29]

Pearson (1971) [28] estudió la proporción de las densidades presa-depredador encontrando que las proporciones variaban durante los periodos en que fluctuaban la población de ratones de campo (Microtus californicus). En este caso, las respuestas que se observan en los depredadores (mapache-Procyon lotor) ante los cambios en la densidad de la especie presa, indican que la depredación se ve afectada por la densidad, es decir, se pueden presentar oscilaciones períodicas en el número de presas y depredadores. El equilibrio dinámico observado en las interacciones presa-depredador también se ha estudiado en las poblaciones de lobos y alces de la Isla del Parque Nacional de Royale, como parte del estudio ecológico que más ha durado a nivel mundial, reportándose

anualmente y desde 1959 datos sobre la densidad de las especies [29]. Como se aprecia en la Figura 2, el aumento en la población de alces sigue un incremento en la población de lobos, mientras que la disminución en la población de los alces conlleva a la disminución de la población de lobos, en un período aproximado de 25 años.

Por otra parte, es interesante notar que algunos autores sugieren que la aparición de ciclos de abundancia puede ser explicado en términos de la influencia que ejercen los depredadores[3]. Ante un incremento de la población de presas, los depredadores son capaces de impedir que el número de presas sufra un drástico aumento. Cuando la población de presas es grande, el número de depradores aumenta reproduciéndose entonces a una tasa mayor y concentrándose en las regiones de aparición masiva de presas [30].

Podemos notar aquí, que las ecuaciones analíticas de Lotka-Volterra proveen un descripción interesante respecto a la dinámica de algunos comportamientos poblacionales como los descriptos [4].

2.3. Sistemas Multiagentes en Ecología

Los Sistemas Multiagentes son una herramienta en la modelación de sistemas naturales y en particular en ecología, ya que posibilita la representación de los comportamientos y las interacciones de los individuos [13]. Por lo tanto, la posibilidad de describir el comportamiento de cada individuo mediante un Sistema Multiagente avanza sobre el problema presa-depredador desde un enfoque que permite modelar acciones e interacciones entre los agentes posibilitando representar fenómenos que surgen como resultado de las interacciones de un ensamble de agentes con su propia autonomía operacional. Sin embargo, para comenzar a tener cierto nivel de confiaza es necesario contrastarlos. Aunque la aproximación analítica de Lotka-Volterra, y sus modificaciones, describen situaciones muy simples cuyas suposiciones son muy restrictivas y se satisfacen en escasas situaciones en la naturaleza, si estas condiciones se cumplen, la descripción es precisa y puede considerarse un patrón a reproducir [27] por cualquier modelo alternativo, tal como los modelos de Sistemas Multiagente.

3. Metodología

En esta sección se describe el problema presa-depredador mediante la herramienta de Sistema Multiagente. Para esta descripción se utilizó la plataforma Matlab.

El modelo presentado es genérico, sin especificar un vínculo presa-depredador particular entre especies. Esta primera instancia, simple desde la caracterización de los agentes, pretende recrear la evolución temporal de dos especies en un entorno homogéneo finito mediantes las suposiciones de respuesta funcional de tipo I del modelo analítico diferencial de Lotka-Volterra [16], para luego complejizarlo con mejoras sucesivas implementadas.

[3] Batzli realizó un estudio de roedores del género Microtus y su depredadores (Mustela nivalis: Comadreja)

[4] Aunque también han sido cuestionadas debido a que sus parámetros no contemplan la complejidad de las interacciones, no modelan las acciones individuales y los aspectos cualitativos de las poblaciones [26].

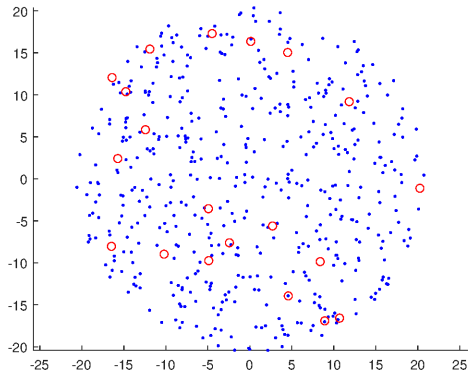


Figura 3: Hábitat donde se desarrolla el modelo. En azul los agentes presa y en rojo los agentes depredadores.

3.1. Implementación del Modelo

Espacio de simulación
El modelo se desarrolla espacialmente en un entorno plano denominado hábitat, el cual está caracterizado por un radio R_h, como se muestra en la Figura 3. En la simulación los agentes no pueden ir más allá de los límites del hábitat.
Agentes
Al comienzo del experimento en el hábitat, se localizan al azar una cantidad determinada de agentes categorizados en dos poblaciones diferentes: agentes presas (N_0) y agentes depredadores (P_0). Cada agente posee características que definen sus interacciones, tamaño, velocidad y dirección de movimiento. Los agentes no tienen sexo, ni edad y se modelan como círculos de radios fijos. El radio de los agentes se interpreta como la percepción del habitat [9] y no como el tamaño del agente. Tanto los agentes presas como los agentes depredadores se mueven en el hábitat en línea recta en direcciones sorteadas al azar. El número de los agentes se modifica por la aparición o desaparición de los mismos en el hábitat. El modelo no contempla procesos de inmigración y emigración.
Reglas
Cuando el agente se mueve por el hábitat, el radio asignado determina el espacio que este agente puede sensar a su paso. En el camino recorrido por el agente se cuentan las interacciones que cada agente realiza con otros agentes.

El modelo, para contar las interacciones entre agentes, calcula la superficie de superposición entre las áreas de los mismos en los encuentros ocurridos durante el viaje o recorrido realizado.

Las distintas interacciones entre agentes se acumulan de la siguiente manera:
• superficie total de interacciones con otros agentes de la misma especie $I_{(1,1)}$: presa-presa, $I_{(2,2)}$: depredador-depredador
• superficie total de interacciones con agentes de especie diferente $I_{(1,2)} = I_{(2,1)}$: presa-depredador.

El movimiento de los agentes se divide en intervalos temporales de duración ΔT al cabo del cual se evalúa:
• las interacciones que definen si hay generación de nuevos agentes y/o desaparición de algunos de los existentes

• el conteo de los agentes de distintas especies
• la posición de los agentes. Si han sobrepasado los límites del hábitat, se sortea una nueva dirección de viaje hacia el interior del mismo.

Al cabo de cada ΔT se evalúa la cantidad de agentes nuevos de cada especie y la cantidad de agentes que desaparecen, asociado al nacimiento y muerte de éstos.

Presas

En el modelo propuesto, para calcular el crecimiento del número de agentes presas, se computa la superficie total de todas interecciones entre presas $I_{(1,1)}$, que ocurrieron en un intervalo y se multiplica a un parámetro r_1. El parametro r_1 puede identificarse con la tasa de nacimiento de las presas introducida en las ecuaciones de Lotkra-Volterra. La velocidad y tamaño de los agentes presa es menor que el de los agentes depredador. La posición de los nuevos agentes presa en el hábitat se determina de manera aleatoria. Por otra parte, para el cálculo del número de agentes presa que desaparecen al cabo de un intervalo ΔT se utiliza la acumulación de interacciones de los agentes presa con depredadores ($I_{(1,2)} = I_{(2,1)}$) y se multiplica por un parámetro a_1 asimilable a la susceptibilidad de la presa de ser atrapada por el depredador.

Depredadores

El cómputo de la cantidad de agentes depredadores nuevos y que desaparecen del hábitat es similar al de los agentes presas. Para calcular el crecimiento del número de agentes depredador, utilizamos un parámetro r_2 multiplicado por la superficie total de todas las interacciones entre presas y depredadores ($I_{(1,2)} = I_{(2,1)}$), que ocurrieron durante ese intervalo. Nuevamente la posición de los nuevos agentes depredador en el hábitat estarán dadas al azar. Para el cálculo del número de agentes depredador que desaparecen al cabo de un intervalo ΔT se utiliza la acumulación de interacciones de los agentes depredador ($I_{2,2}$) y se multiplica por un parámetro a_2 el cual esta relacionado a las interacciones entre los depredadores y puede ser asimilado como la tasa de muerte de éstos. Note que éste tipo de cómputo, que tiene implícito un promedio en las especies y sus interacciones, implica que ΔT represente un tiempo comparable al de los ciclos de reproducción.

Se puede notar que el modelo propuesto puede adaptarse a distintas situaciones mediante la elección de diferentes combinaciones de sus parámetros siendo el modelo sensible a estas combinaciones.

3.2. Mejoras al modelo

En esta segunda etapa de la modelización se introducen mejoras a la simulación. Como vimos en la fundamentación, el modelo de Lotka-Volterra tiene una respuesta funcional de tipo I la cual asume que los recursos son ilimitados tanto para presa como para el depredador. Por la tanto, la primera modificación en el modelo es introducir un término logístico que da cuenta de competencia intraespecie cuando el número de presas se hace arbitrariamente grande[5]. Una segunda mejora a la modelización se realizó a partir de la suposición que los depredadores regulan la densidad de las presas. Es decir, cuando el crecimiento de la presa supera un cierto umbral, los depredadores aumentan su tasa de nacimiento [30]. Por último, se introdujo una modificación en la tasa de captura de las presas tal como se propone en el estudio de campo realizado en [29]. Las características de los agentes y las reglas en el entorno no fueron modificados.

La cantidad de nuevos agentes de cada especie que aparecen y desaparecen, está dado por:

[5]El modelo diferencial presa-depredador con competencia intraespecie se presentó en la **Sección 2.1**.

• **Mejora I**
Presas
En esta mejora planteada, para el computo del crecimiento de los agentes presa se introdujo un término logístico. Es decir, para calcular este crecimiento, se computa la superficie de todas las interacciones $I_{(1,1)}$, se multiplica por el parámetro r_1 y el término logístico , el cual incluye la capacidad de carga máxima Kc y la superficie total de interacciones entre las presas que ocurrieron en el intervalo ΔT.
• **Mejora II**
Presas
El cálculo del número de agentes presa que desaparecen al cabo de un intervalo ΔT se realiza por la acumulación de interacciones de los agentes presa con depredadores y se multiplica por un parámetro a_1. Este parámetro se propone como el número de interacciones presa-depredador dividido el número de depredadores en cada intervalo ΔT [29]. El parametro a_1 se ajustó con un factor que depende de las interacciones entre las especies y el número de depradores. Podemos notar que este parámetro cambia en el modelado en cada ΔT, a diferencia del modelo original, donde permanecia fijo.
Depredadores
En el modelado mejorado propuesto, r_2 es introducida como una función escalón [31], para regular la población de presas en el hábitat. Es decir, si las presas alcanzan una población máxima, los depredadores se repreducen a una tasa mayor [30].

4. Resultados y Análisis

En esta sección, evaluaremos si el modelo Multiagente propuesto reproduce características distintivas del modelo analítico de Lotka-Volterra. Usaremos series temporales y diagramas de fase como herramienta de análisis. Para ejemplificar el modelo utilizamos los datos de las poblaciones de lobos y alces en el Parque Nacional Royale [29]. Para ésto, tomamos las condiciones inciales en el modelo Multiagente coincidente con los valores iniciales del estudio de campo. Los valores del radio del agente, rapidez, crecimiento y desaparición fueron determinados con el mismo criterio que se planteó en la metodología. El conjunto de parámetros y datos iniciales, se muestran en la Tabla 1.

	presa	depredador
Población inicial	500	20
Radio del agente	2	16
Rapidez	5	8
Crecimiento	$r_1 = 10$	$a_2 = 0{,}5$
Desaparición	$a_1 = 1{,}7$	$r_2 = 0{,}5$

Tabla 1: Párametros y datos inicilales del modelo. Unidades arbitrarias.

La Figura 4 muestra la evolución temporal del número de agentes presa y depredador, para los valores dados en la Tabla 1. Podemos observar que el modelado nos permitó reproducir el comportamiento típico observado en la relación presa-depredador decriptas en la ecuaciones de Lotka-Volterra. Es decir, este modelo de agentes reproduce las características distintivas del modelo de Lotka-Volterra con ciclos, retraso entre las especies y oscilaciones acopladas [16, 21].

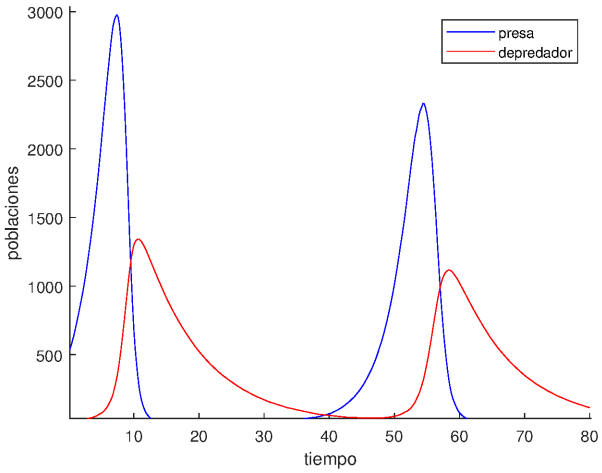
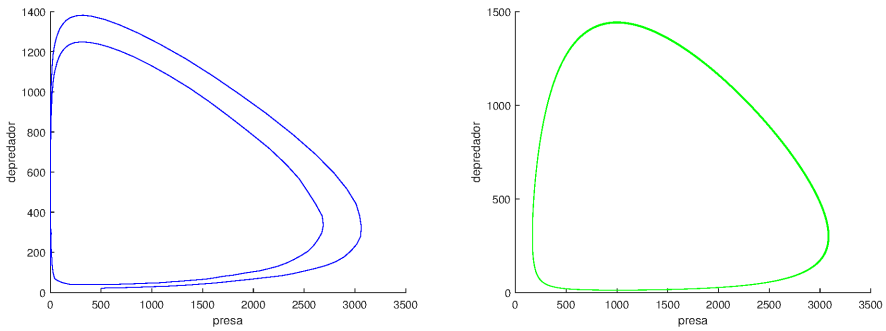


Figura 4: Serie temporal de las poblaciones para el Modelo Multiagente. Los valores iniciales se toman de los datos del Parque Nacional Royale. Los parámetros del programa se muestran en la Tabla 1.

En la Figura 5 se presenta la evolución temporal del número de agentes presa y depredador en el espacio de las fases.



(a) (b)

Figura 5: Evolución del número de agentes presa y depredador en el espacio de las fases a) Diagrama de fase del modelo propuesto b) Diagrama de fase para Lotka Voterra con $\alpha = 3{,}0$; $\beta = 0{,}01$; $\gamma = 7{,}0$ y $\delta = 0{,}007$.

La Figura 5a corresponde a la representación de la evolución temporal para el modelo propuesto junto a la correspondiente evolución temporal predicha por el modelo de Lotka-Volterra para una situación similar. En estas imágenes se observa la diferencia entre un comportamiento determinista, dada por la órbita cerrada en la Figura 5b y el modelo presentado mostrado en la Figura5a, el cual no es determinista. Note también, que ambas gráficas siguen un comportamiento similar, en el sentido que ambos modelos muestran evoluciones periódicas.

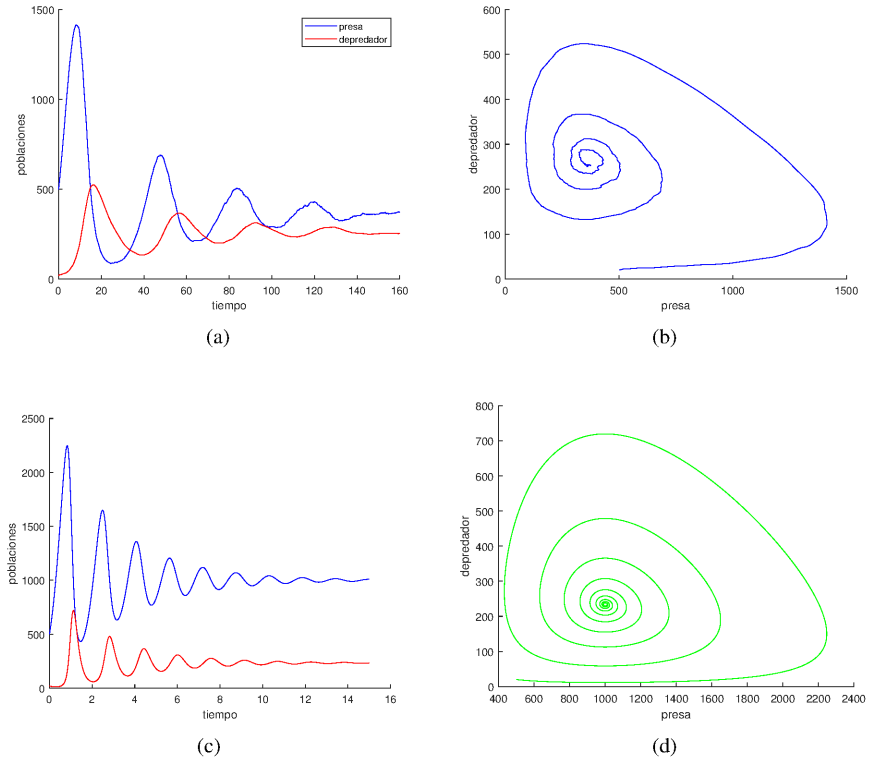


Figura 6: Serie temporal y mapa de fase de las poblaciones de presas y depredadores a) y b) Modelo Multiagente Mejorado I con $K_c = 15$. Los valores iniciales se toman de los datos del Parque Nacional Royale. Los parámetros del programa se muestran en la Tabla 1. c) y d) Modelo de Lotka-Volterra con $\alpha = 3{,}0$; $\beta = 0{,}01$; $\gamma = 7{,}0$ y $\delta = 0{,}007$ y $K_c = 1500$

La Figura 6a muestra una corrida realizada, para los mismos parámetros y condiciones iniciales de la Tabla 1, cuando al modelo se le introduce un término logístico K_c. La Figura 6c muestra la evolución temporal para el modelo de Lotka-Volterra. Como habíamos visto en la **Sección 2.1.1** en el modelo analítico, la introducción del término logístico aumenta la estabilidad estructural del sistema, pero no se obtiene soluciones periódicas. Podemos notar aquí que en el modelo Multiagente se obtiene un comportamineto semejante. La Figura 6b y Figura 6d muestran el diagrama de fase correspondiente a cada modelo, donde puede notarse trayectorias en espiral, a diferencia de la orbita cerrada (ver **Sección 2.1**) observada en la Figura5b. Es decir, la incorporación del término logístico altera radicalmente el patrón de las trayectorias, que dejan de ser cíclicas alrededor del punto crítico, para convertirse en oscilaciones amortiguadas que terminan convergiendo al estado estacionario.

La Figura 7 muestra los resultados de la simulación cuando se introducen en el programa la **Mejora II**, en los parámetros a_1 y r_2. En esta gráfica se observa que la población de depredarores desciende drásticamente respecto a las poblaciones observadas en el modelo original Multiagente, mientras que la población de presas disminuye, pero no de manera sustancial. Se ha observado que éstos parámetros modifican el período, el cual se redujo a aproximadamte a 25 ciclos. Notese que la mejora introducida describe cualitativamente los valores de las poblaciones y ciclos dados en [29]

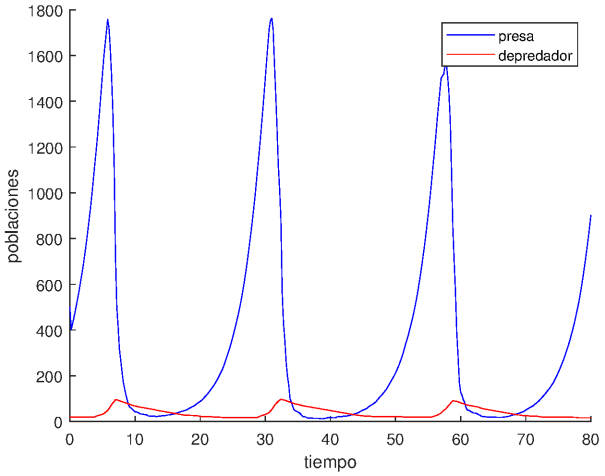


Figura 7: Serie temporal de las poblaciones para el Modelo Multiagente Mejorado II. En azul los agentes presa y en rojo los agentes depredadores Los valores iniciales se toman de los datos del Parque Nacional Royale. Los parámetros del programa se muestran en la Tabla 1.

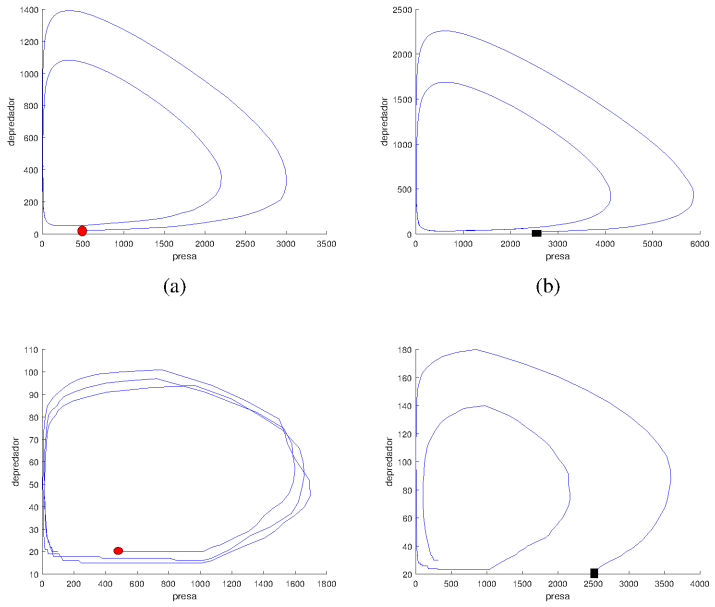


Figura 8: Evolución temporal del número de agentes presa y depredador en el espacio de las fases a) y b) para el modelo Multiagente original , c) y d) para el modelo Mejorado II. Los círculos rojos representan las condiciones iniciales $N_0 = 500$ y $P_0 = 20$. Los cuadrados negros condiciones iniciales $N_0 = 2400$ y $P_0 = 20$.

Por último, la Figura 8 muestra el espacio de las fases de las poblaciones para el modelo original y el modelo luego de implementar la **Mejora II**. Ambos modelos se corren para dos condiciones iniciales diferentes, tomadas del estudio del Parque Nacio-

nal Royale. Podemos visualizar a partir de las figuras, las diferencias en las trayectorias en los modelos de simulación. Note que en la Figura 8c y la Figura 8d correspondiente a los cambios en los parametros a_1 y r_2, podemos observar similitudes a los sistemas ecológicos caracterizados por respuestas funcionales donde los parámetros no son constantes, sino que dependen de las interacciones, y presentan ciclo límite [25, 24].

5. Conclusiones

Se ha modelado un sistema presa-depredador a través de un Sistema Multiagente que reproduce en líneas generales la características distintivas del modelo analítico de Lotka-Volterra: ciclos, retrasos en las especies y oscilaciones acopladas. Se han incorporado mejoras al software original en base a consideraciones bibliograficas tales como respuestas funcionales al comportamiento intraespecies y modificaciones en los parámetros asimilables a la tasa de muerte de las presas y a la tasa de nacimiento de los depredadores, ambas sujetas a la abundancia de la presas. El parámetro Kc en el modelo Multiagente no reproduce soluciones períodicas ya que tiende a un valor constante, es decir, el modelo describe las características distintivas del sistema analítico con el término logístico. Por otra parte, notamos que las modificaciones en los paramátros r_2 y con mayor peso el parámetro a_1, el cual se autoregula con la interacción entre los agentes y no desde un valor externo fijo, recortan las poblaciones de los agentes, modifican los ciclos de las mismas y reproducen comportamientos semejantes a los sistemas con respuestas funcionales [26, 27]. Hemos observado que las mejoras realizadas al modelo original Multiagente planteado describen de manera cualitativa los valores de las poblaciones y ciclo del trabajo de campo realizado en el Parque Nacional Royale, además de comportamientos semejantes respecto a la estabilidad descripta en sistemas naturales.

Por lo tanto, los resultados iniciales obtenidos comienzan a conformar un panorama de validez de nuestro modelo, que nos habilita a avanzar con sucesivas mejoras y detalles, para así ajustarlo de manera más satisfactoria a la descripción de la interacción presa-depredador en la naturaleza.

Referencias

[1] Ross Ashby, W., (1956). .^n Introduction to Cybernetics". New York.

[2] Granda Velepucha, S., González Carrasco, V, López Bravo, M. (2016). "Principios de la Ecología General". Universidad Técnica de Machala - Ecuador. Ediciones utmach. ISBN: 978-9978-316-95-5.

[3] Bolker, B.M. (2008)."Ecological Models and Data in R". Princeton University Press, Princeton.

[4] Daily, G. C. (1997). "Natures services: societal dependence on natural ecosystems". Island Press, Washington DC.

[5] Mullin, Tom Ed.(2005). "The Nature of Chaos". Oxford Science Publications. ISBN 019 853954 1 (Pbk).

[6] Konedepudi,D., Prigogine,I. (2015) "Modern Thermodynamics. From Heat Engines to Dissipative Structures". John Wiley and Sons Ltd. Second Edition. ISBN 978-1-118-37181-7 (pbk.)

[7] Skvortsov, A., Ristic, B., y A. Kamenev (2018). "Predicting population extinction from early observations of the Lotka-Volterra system", Applied Mathematics and Computation, 320, 371-379.

[8] Yang,Y, Tang,W. (2018) Research on a 3D Predator-Prey Evolutionary System in Real Estate Market Complexity".

[9] Tanev, I., Katsunori, S. (2003). .On Role of Implicit Interaction and Explicit Communications in Emergence of Social Behavior in Continuous Predators-Prey Pursuit Problem". E. Cantú-Paz et al. (Eds.): GECCO 2003, LNCS 2723, pp. 74-85.

[10] Chang, Y., Zheng, B. y Feng, S. (2010). "Theoretical Analysis and Multi-agent Simulation of the Ecosystem in Tibet". Sixth International Conference on Natural Computation (ICNC 2010).

[11] Seitbekova, Y., y Bakibayev, T. (2018). "Predator-Prey Interaction Multi-Agent Modelling", International Conference on Application of Information and Communication Technologies.

[12] Yamada, Y., Shawe-Taylor, J., y Fountas, Z. (2020). .Evolution of a Complex Predator-Prey Ecosystem on Large-scale Multi-Agent Deep Reinforcement Learning". In Proc. 2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)

[13] Bousquet, L. y Le Page, C., (2004). "Multi-agent simulations and ecosystem management: a review". Ecological Modelling, 176:313-332.

[14] González Suárez, M. (2014) Â¿ Es relevante la ecología del comportamiento para entender y predecir la dinámica de las poblaciones? . Ecosistemas 23(3): 93-97 . Doi.: 10.7818/ECOS.2014.23-3.12

[15] Grimma V., Augusiak J., Focks A, Franke B., Gabsif f., Johnstong A., Liug C., Benjamin T. Martina B., Mattia Meli M., Radchukc V., Thorbek P., Railsbackk S (2014). "Towards better modelling and decision support: Documenting model development, testing, and analysis using TRACE". Ecological Modelling 280. 129-139.

[16] Lotka, A. J. (1910). Çontribution to the Theory of Periodic Reactions". The Journal of Physical Chemistry, 14 (3), 271-274.

[17] Bunin, G. (2017). " Ecological communities with Lotka-Volterra dynamics". Physical Review E, 95, 042414, (2017). Disponible en https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.95.042414.

[18] Portalier, S. M. J., Fussmann, G. F., Loreau, M. y Cherif M. (2019). "The mechanics of predator-prey interactions: First principles of physics predict predator-prey size ratios", Functional Ecology 33, 323-334, (2019). Disponible en https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1365-2435.13254.

[19] Ferber, J., Gutknecht, O., Michel, F., 2004. "From Agents to Organizations : an Organizational View of Multi-Agent Systems". AgentOriented Softw. Eng. IV, Lecture Notes in Computer Science 2935, 214-230. doi:10.1007/978-3-540-24620-6-15.

[20] Jennings, N.R., Wooldridge, M.J., 1995. .Applying Agent Technology". Appl. Artif. Intell., Appl. Artif. Intell. (USA) 9, 357-369.

[21] Perko, L. "Diferential Equations and Dynarnical Systems". Springer. 1991.

[22] Jiang, D., Zhang, Q., Hayat, T., y Alsaedi A. (2017). "Periodic solution for a stochastic non-autonomous competitive Lotka-Volterra model in a polluted environment"Physica A. Statistical Mechanics and its Applications, 471, 276-287.

[23] Solomon, J (1949). "The natural control of animal populations". J. Anim. Ecol. 18:1-35.

[24] Strogatz S. H. (2018). "Nonlinear Dynamics And Chaos With Applications To Physics, Biology, Chemistry, And Engineering". Boca Ratón: CRC Press Taylor and Francis Group, ISBN 13: 978-0-8133-4910-7

[25] Valdivia, M.(1998) " Análisis Matemático III", Tomo I. UNED. .

[26] May, R. y McLean, A. (2007). "Theoretical Ecology Principles and Applications". Oxford University Press Inc., New York. ISBN 978-0-19-920998-9.

[27] Book .Ecological Systems Selected Entries from the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology".Springer. ISBN978-1-4614-5754-1 ISBN978-1-4614-5755-8(eBook). DOI10.1007/978-1-4614-5755-8.

[28] Pearson, O. (1971). " Additional measurements of the impact of carnivores on California voles (Mi-crotus californicus). Journal of Mammalogy, 52:41-49.

[29] Peterson, R. O. y J. A. Vucetich (2022). Ecological Studies of Wolves on Isle Royale, Annual Report 2021-2022. School of Forestry and Wood Products, Michigan Technological University. Houghton, Michigan.

[30] Batzli,G. (1981). "Population and energetics of small mammals in the tundra ecosystem". En: L.C.Bliss, O.W. Heal y J.J. Moore (eds.). Tundra Ecosystems: a Comparative Analysis, pp. 377-396. Cambridge University Press.

[31] Stewart, J. (2011). Cáculo. (7ma Edición). Cengage Learning Editores, S.A.

[32] Grimma V., Augusiak J., Focks A, Franke B., Gabsif f., Johnstong A., Liug C., Benjamin T. Martina B., Mattia Meli M., Radchukc V., Thorbek P., Railsbackk S (2014). "Towards better modelling and decision support: Documenting model development, testing, and analysis using TRACE". Ecological Modelling 280. 129-139.