

DINÁMICA Y COEXISTENCIA EN SISTEMAS ECOLÓGICOS CÍCLICOS

JORDI BLASCO LOZANO*, MARÍA MESTRE SÁNCHEZ**,
ALEJANDRO OPERÉ SIRVENT*** y CELIA RIBES FLOR****

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue analizar la dinámica y la coexistencia de especies en sistemas ecológicos cíclicos, utilizando el modelo Piedra–Papel–Tijera como caso de estudio. Se llevó a cabo un diseño computacional basado en simulaciones de agentes en una retícula espacial, con múltiples repeticiones para evaluar el efecto de la movilidad y la estructura espacial sobre la diversidad y la extinción de especies. Los resultados mostraron que la movilidad influye significativamente en la probabilidad de extinción y que, bajo ciertas condiciones, es posible la coexistencia estable de las tres especies. Estos hallazgos sugieren que la estructura espacial y la movilidad son factores clave para la estabilidad ecológica en sistemas con dominancia cíclica.

Palabras clave: Dinámica de poblaciones, coexistencia, simulación computacional, sistemas ecológicos, modelo Piedra–Papel–Tijera

INTRODUCCIÓN

La dinámica de poblaciones en sistemas ecológicos con competencia cíclica, como el modelo Piedra–Papel–Tijera, es fundamental para entender la biodiversidad en la naturaleza. Estos sistemas son relevantes porque reflejan interacciones reales observadas en bacterias, lagartos y plantas, donde la jerarquía de dominancia no es lineal sino circular. Se sabe que la estructura espacial y la movilidad de los individuos pueden influir de manera decisiva en la coexistencia o extinción de especies.

Sin embargo, aún no se comprende completamente cómo el movimiento individual y la mezcla rápida afectan la estabilidad y la diversidad en estos sistemas. Los modelos clásicos predicen coexistencia indefinida bajo mezcla perfecta, pero la realidad espacial introduce patrones y

fluctuaciones que pueden romper este equilibrio.

El objetivo de este estudio es analizar, mediante simulaciones computacionales, cómo la movilidad y la estructura espacial modifican la dinámica de coexistencia y extinción en sistemas de competencia cíclica. Se plantea la hipótesis de que la movilidad elevada favorece la extinción, mientras que la limitación espacial promueve la coexistencia. La pregunta central es: ¿cómo afecta la movilidad de los individuos a la estabilidad y diversidad de sistemas ecológicos cíclicos?

MÉTODO

a) Diseño

Se realizó un diseño experimental computacional basado en simulaciones estocásticas espaciales sobre una retícula

*Estudiante, Ingeniería en Inteligencia Artificial, Universidad de Alicante. E-mail: jbl42@alu.ua.es

**Estudiante, Ingeniería en Inteligencia Artificial, Universidad de Alicante. E-mail: mms254@alu.ua.es

***Estudiante, Ingeniería en Inteligencia Artificial, Universidad de Alicante. E-mail: aos35@alu.ua.es

****Estudiante, Ingeniería en Inteligencia Artificial, Universidad de Alicante. E-mail: crf41@alu.ua.es

bidimensional (toroide), permitiendo condiciones de frontera periódicas. El entorno de la investigación fue un entorno de programación en Python, ejecutado en Google Colab y equipos personales, lo que facilitó la replicación y el análisis de los resultados.

b) Población y muestra

Los participantes del estudio fueron agentes simulados, representando individuos de tres especies (A, B y C) con relaciones de dominancia cíclica. La muestra inicial se seleccionó aleatoriamente, distribuyendo uniformemente a los agentes en la retícula. El número total de agentes se mantuvo constante durante cada simulación ($N = L \times L$, con L el tamaño del lado de la retícula, típicamente entre 20 y 100). No se aplicaron criterios de edad ni sexo, ya que los agentes son entidades abstractas sin características biológicas individuales. Cada experimento se repitió al menos 30 veces para obtener resultados estadísticamente robustos.

c) Materiales

Se utilizaron los siguientes materiales y herramientas:

- Python 3.x como lenguaje de programación.
- Librerías NumPy y Matplotlib para simulación, análisis y visualización de datos.
- Algoritmo de simulación de autómatas celulares/agentes para modelar la dinámica de competencia y movilidad.
- Google Colab y equipos personales para la ejecución de los experimentos.

d) Intervenciones

Las intervenciones consistieron en dos procesos principales: (1) interacción competitiva, donde un agente puede convertir a un vecino según las reglas del juego Piedra-Papel-Tijera, y (2) movilidad, permitiendo el intercambio de posición entre agentes vecinos con una probabilidad M . Se exploraron diferentes valores de M

(movilidad) para analizar su efecto sobre la coexistencia y extinción de especies. El sistema se inicializó en cada simulación con una distribución aleatoria y uniforme de las tres especies.

e) Análisis estadístico

Para el análisis estadístico, se registraron series temporales de la abundancia de cada especie, se calcularon índices de diversidad (como el índice de Shannon) y se evaluó la probabilidad de extinción en función de la movilidad. Se emplearon análisis descriptivos, gráficos de evolución temporal, histogramas de abundancias finales y comparaciones entre condiciones experimentales para evaluar los efectos de la movilidad y la estructura espacial sobre la coexistencia y extinción de especies. Los resultados se analizaron mediante técnicas de estadística básica y visualización gráfica, permitiendo identificar patrones emergentes y tendencias generales.

RESULTADOS

a) Recolección de los datos

La recolección de los datos se realizó mediante simulaciones computacionales basadas en el modelo espacial de agentes que implementa dinámicas de competencia cíclica tipo Piedra-Papel-Tijera. Este enfoque fue elegido debido a su capacidad para representar explícitamente interacciones locales, movilidad individual y efectos espaciales, aspectos que no pueden capturarse adecuadamente mediante modelos analíticos de mezcla perfecta.

El instrumento de recolección consistió en un algoritmo programado en Python, validado a partir de su consistencia interna y reproducibilidad. La validez del modelo se estableció comparando los resultados del sistema espacial con las predicciones del modelo teórico del campo medio, verificando así coincidencias en condiciones de baja

movilidad. La confiabilidad se aseguró mediante la repetición independiente de cada simulación al menos 30 veces bajo las mismas condiciones iniciales y parámetros.

El procedimiento de recolección siguió los siguientes pasos: (1) Inicialización de una red bidimensional con condiciones de frontera periódicas, asignado aleatoriamente una de las tres especies. (2) Ejecución iterativa del modelo durante un número fijo de pasos temporales, aplicando las reglas de interacción competitiva y movilidad. (3) Registro periódico de la abundancia absoluta y relativa de cada especie. (4) Almacenamiento de las abundancias finales, la evolución temporal y los índices de diversidad para su posterior análisis estadístico.

b) Análisis de los datos

Los datos obtenidos corresponden a variables de nivel nominal (identidad de la especie) y de intervalo (abundancia, fracción poblacional e índice de diversidad). El análisis se realizó mediante técnicas cuantitativas descriptivas, adecuadas para el nivel de medición de las variables y coherentes con los objetivos del estudio.

Para evaluar la dinámica temporal, se analizaron series temporales de las abundancias relativas de cada especie. La diversidad del sistema se cuantificó mediante el índice de Shannon, calculado a partir de las proporciones poblacionales en cada instante de tiempo. La probabilidad de extinción se estimó como la frecuencia relativa de simulaciones en las que una o más especies alcanzaron abundancia cero al final del experimento.

Los resultados se analizaron en función del parámetro de movilidad (M), comparando múltiples condiciones experimentales. No se utilizaron grupos de control independientes, ya que cada valor de M constituyó una condición experimental distinta. Todas las simulaciones se ejecutaron durante el mismo intervalo

temporal, garantizando comparabilidad entre condiciones.

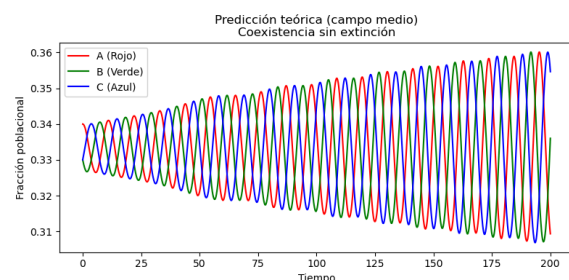
La hipótesis planteada fue evaluada contrastando la persistencia o extinción de especies bajo distintos niveles de movilidad. Los resultados muestran diferencias sistemáticas en la estabilidad del sistema en función de M , permitiendo aceptar la hipótesis planteada en relación con el efecto de la movilidad sobre la coexistencia.

c) Presentación de los datos

Los resultados se presentan siguiendo el orden de los objetivos del estudio, comenzando por los resultados principales relacionados con la dinámica poblacional y la coexistencia de especies.

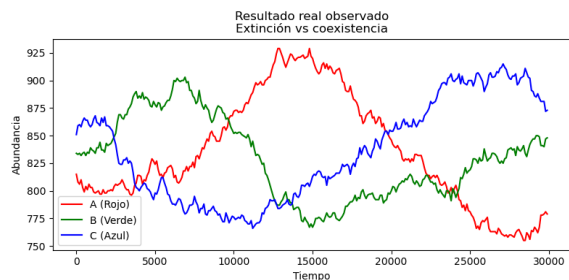
En el modelo teórico de campo medio, las ecuaciones replicadoras mostraron oscilaciones periódicas de las fracciones poblacionales de las tres especies alrededor del punto de coexistencia equitativa ($\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}$).

Figura 1. Evolución temporal de las fracciones poblacionales según el modelo teórico.



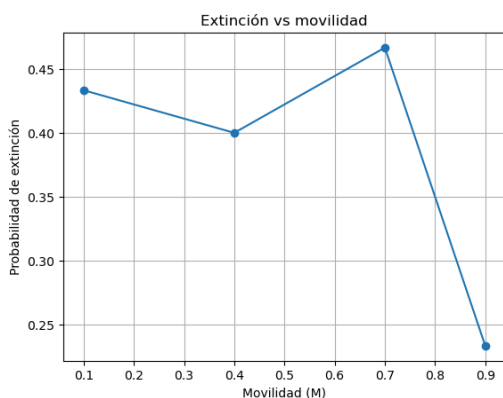
En el modelo espacial basado en agentes, las series temporales revelaron fluctuaciones irregulares en las abundancias relativas, con amplitudes dependientes del valor de la movilidad. En múltiples simulaciones se observó la convergencia hacia los estados absorbentes caracterizados por la dominancia de una sola especie.

Figura 2. Series temporales de abundancia relativa de las especies A, B y C en el modelo espacial.



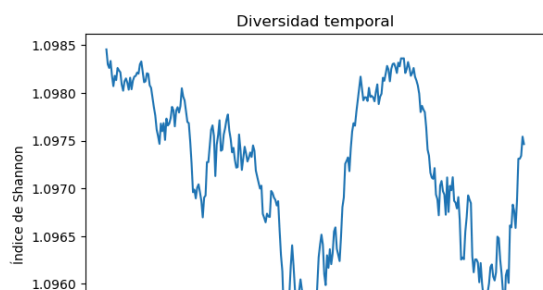
El análisis de la probabilidad de extinción mostró una variación sistemática con la movilidad, observándose una mayor frecuencia de extinción para valores bajo de M y una disminución progresiva de esta probabilidad al aumentar la movilidad.

Figura 3. Experimento de movilidad-extinción.



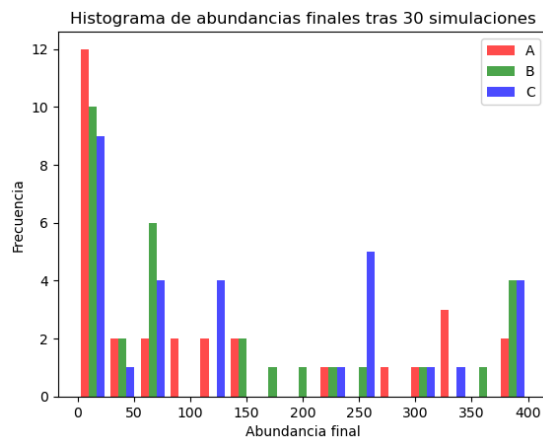
En el segundo experimento, al analizar el efecto de la movilidad, se observó una disminución progresiva del índice de Shannon a medida que aumentó el valor de M , indicando una reducción de la diversidad efectiva del sistema.

Figura 4. Evolución temporal del índice de Shannon para distintos valores de movilidad.



Finalmente, el histograma de abundancias finales tras 30 simulaciones mostró una alta dispersión en los estados finales, con una frecuencia considerable de extinción de dos especies bajo condiciones de alta movilidad.

Figura 5. Histograma de abundancias finales de las especies tras múltiples simulaciones.



DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la movilidad y la estructura espacial influyen de manera decisiva en la dinámica y la estabilidad de sistemas ecológicos con dominancia cíclica. En el modelo espacial basado en agentes, la coexistencia de las tres especies no se mantiene indefinidamente bajo todas las condiciones, sino que depende de manera crítica del grado de movilidad de los individuos.

El análisis de la probabilidad de extinción en función de la movilidad evidenció que existen diferencias sistemáticas entre las condiciones

exploradas , lo que confirma que la movilidad actúa como un parámetro de control relevante en la estabilidad del sistema. Además, las series temporales de abundancia mostraron fluctuaciones irregulares y la aparición de estados absorbentes, en contraste con las oscilaciones regulares predichas por el modelo teórico de campo medio. Esta diferencia pone de manifiesto el papel de las interacciones locales y de la estructura espacial en la dinámica del sistema.

Estos resultados son coherentes con estudios previos sobre juegos evolutivos en redes y sistemas espaciales. En particular, Kerr et. al (2002) demostraron que la dispersión local puede promover la biodiversidad en sistemas reales tipo Piedra-Papel-Tijera, mientras que Szabó y Fáth (2007) destacaron que la topología espacial y la movilidad influyen directamente en la estabilidad de la coexistencia. Del mismo modo, el contraste observado entre el modelo espacial y las predicciones del campo medio concuerda con el trabajo clásico de May y Leonard (1975), donde se muestra que la coexistencia en modelos no espaciales es estructuralmente inestable frente a perturbaciones.

Desde el punto de vista teórico, los resultados refuerzan la idea de que la estructura espacial no es un detalle secundario, sino un componente fundamental para comprender la dinámica de sistemas ecológicos cíclicos. La incorporación del espacio y de la movilidad permite capturar patrones emergentes que no aparecen en modelos bien mezclados, aportando una representación más realista de los sistemas biológicos.

Este estudio presenta algunas limitaciones, ya que se consideró una retícula regular bidimensional y reglas de interacción simplificadas, lo que limita la generalización directa a ecosistemas reales más complejos. Además, el análisis se centró en un rango acotado de parámetros y no exploró otras posibles fuentes de heterogeneidad, como tasa

de interacción asimétricas o variabilidad ambiental. Estas limitaciones podrían influir en la magnitud de los efectos observados, aunque no invalida las tendencias generales identificadas.

Futuras investigaciones, podrían ampliar este trabajo, incorporando otras tipologías espaciales, distintos tipos de movilidad o perturbaciones externas, así como extender el análisis a sistemas con más especies o interacciones no cíclicas.

BIBLIOGRAFÍA

SZABÓ, G. & FÁTH, G. (2007). "Evolutionary games on graphs". *Physics Reports*, 446(4-6): 97-216.

KERR, B.; RILEY, M.A.; FELDMAN, M.W. & BOHANNAN, B.J.M. (2002). "Local dispersal promotes biodiversity in a real-life game of rock-paper-scissors". *Nature*, 418(6894): 171-174.

MAY, R.M. & LEONARD, W.J. (1975). "Nonlinear aspects of competition between three species". *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 29(2): 243-253.