

Explorando la Biocomplejidad en un Curso Subgraduado Multidisciplinario

Elio Ramos
Departamento de Matemáticas
Universidad de Puerto Rico – Humacao

Denny S. Fernandez del Viso
Departamento de Biología
Universidad de Puerto Rico – Humacao

Resumen

Presentamos nuestras experiencias en el proceso de preparación y enseñanza de un curso subgraduado multidisciplinario en donde se combina la matemática, la biología, y la computación. El mismo se viene ofreciendo en la Universidad de Puerto Rico en Humacao desde el 2002 y ha contado con la participación de estudiantes de los programas de bachillerato en Matemáticas Computacionales y Biología. El curso, a cargo de dos profesores de los departamentos de Biología y Matemáticas, consiste de conferencias, trabajos computacionales de laboratorio, y un proyecto final de investigación utilizando como tema central el área de ecología de poblaciones. Durante el semestre los estudiantes tuvieron la oportunidad de realizar proyectos y trabajos de laboratorio en donde se enfatizó la construcción de simulaciones utilizando tres técnicas (i) *el enfoque matemático tradicional*, basado en la solución analítica y numérica de ecuaciones de diferencias y ecuaciones diferenciales lineales y no-lineales y álgebra de matrices (ii) *el enfoque sistemodinámico de Forrester*: basado en la identificación de niveles, flujos, y bucles de retroalimentación para la construcción de los modelos (iii) *el enfoque basado en agentes*: en donde se definen reglas de comportamientos a nivel de los individuos a partir de las cuáles emerge la complejidad. Contrastaremos los tres enfoques y como estos se complementan para facilitar la presentación y comprensión de temas multidisciplinarios avanzados. Específicamente discutiremos como el enfoque sistemodinámico de Forrester resulta ser una herramienta pedagógica efectiva al presentar el efecto del retardo en la dinámica de modelos del tipo logístico y Lotka-Volterra. Además, presentaremos algunas de las simulaciones construidas por los estudiantes, utilizando el enfoque basado en individuos, en las cuáles se incluyó la interacción de varias especies y la dimensión espacial de forma explícita.

Introducción

La tendencia moderna en la ciencia y la matemática aplicada se encamina a la educación e investigación multidisciplinaria. (REFERENCIA) En años recientes hemos visto como las agencias dedicadas a proveer fondos para ambas actividades, tales como la National Science Foundation y el National Institute of Health, enfatizan y promueven el desarrollo de proyectos y programas de investigación en donde se combinen las disciplinas. (REFERENCIA) Cada día son más comunes los proyectos de investigación en las universidades en donde participan investigadores y estudiantes de diferentes áreas y disciplinas aportando sus conocimientos para la solución de un problema en común. Además, es usual el surgimiento de programas graduados no-

tradicionales en donde se fomenta una formación multidisciplinaria de los estudiantes. Mientras que la investigación multidisciplinaria es un fenómeno común en muchas instituciones subgraduadas el desarrollo de cursos no-tradicionales a este nivel resultan ser más limitados. Esta situación plantea un problema importante ya para que un estudiante opte por continuar estudios graduados multidisciplinarios es importante que desarrolle las destrezas y conocimientos necesarios. Es ante esta situación que es importante comenzar a desarrollar cursos experimentales con el fin de explorar y combinar la enseñanza de disciplinas que tradicionalmente se han presentado de forma separada.

Por ejemplo, la enseñanza de la ecología, y específicamente la ecología de poblaciones, es uno de los cursos medulares de un programa de bachillerato en Biología. Esta generalmente se presenta a un nivel cualitativo en donde el estudiante solo es expuesto a algunos modelos clásicos de crecimiento poblacional de una y dos especies sin la posibilidad de explorar escenarios más complejos y realistas. Una de las razones para esto es que para poder considerar situaciones más complejas es necesaria la utilización de modelos matemáticos y computacionales avanzados. Esto, sumado a las limitaciones de tiempo en curso típico de un semestre, dificulta el que se considere su implementación en la práctica. En los programas típicos de bachillerato en Matemáticas y áreas relacionadas (p.e. Ciencia de Cómputos) los estudiantes generalmente son expuestos a modelos matemáticos en un curso de Ecuaciones Diferenciales. En este curso se enseña un conjunto de métodos analíticos y numéricos para la solución de ecuaciones de diversos tipos. Una buena parte de las aplicaciones están relacionadas a fenómenos físicos y mecánicos lo cuál esta vinculado al hecho de que muchas de las leyes físicas están formuladas como ecuaciones diferenciales. Además, siendo el énfasis principal el de resolver cierto tipo de ecuaciones (clásicas) muchas veces el estudiante pierde de perspectiva que los modelos son simplificaciones de fenómenos reales. Es decir, lo que se asume constante, en el mundo real no lo es, y lo que se asume lineal, en el mundo real tampoco lo es. La dificultad surge cuando se contrastan los modelos lineales con los datos experimentales y la conclusión generalizada es que el modelo no es capaz de reproducir los datos. Estamos ante una situación en donde el estudiante con formación en Biología necesita las herramientas matemáticas y computacionales para poder estudiar modelos más complejos y el estudiante con formación en Matemáticas necesita conocer la complejidad del mundo biológico y así poder construir modelos más reales.

En este artículo presentamos nuestras experiencias en la preparación y presentación de un curso multidisciplinario en el que se cubrieron temas de matemáticas, biología, y computación. En la próxima sección mencionamos detalles sobre los participantes del curso así como algunos de los principios filosóficos en los que basamos su creación. Luego mencionamos, en forma detallada, los temas que se cubrieron durante el semestre así como los enfoques utilizados para presentar los mismos. A manera de ejemplo de una de las actividades realizadas en el curso, consideramos el problema de la presa-depredador, y contrastamos la efectividad de los distintos enfoques de enseñanza que utilizamos para este. Finalmente, presentamos las conclusiones así como algunas lecciones útiles para el desarrollo futuro de este tipo de curso.

Participantes

En el año 2000 comenzamos el proceso de crear un curso subgraduado experimental el cual denominamos MECOBI (Métodos Computacionales Aplicados a Sistemas Biológicos). En el

mismo se debían combinar diversos temas en las áreas de biología, matemáticas, y computación. Desde los inicios del curso se planteo la necesidad de utilizar el modelo de enseñanza en equipo (“team-teaching”) en donde las sesiones de clase contaran con la participación de dos profesores, en este caso de los departamentos de matemáticas (E.R.) y biología (D.F.). El curso tres horas semanales en sesiones de conferencia y practicas de laboratorio computacionales en donde se seleccionó la biología de poblaciones como tema central. La selección del tema se basó en la experiencia previa que tenían ambos profesores, sin embargo, se dejo abierta la posibilidad de que en el futuro se consideran otros temas biológicos con conexiones a las matemáticas y la computación como lo son la genética y la biología molecular entre otros. El curso se ofreció por primera vez en el años 2002 y contó con la participación de estudiantes de los programas de bachillerato en Biología y Matemáticas Computacionales en donde la matrícula de ambos programas fue muy similar, situación que cambio significativamente en la segunda ocasión que se ofreció el curso en el 2004 (ver Tabla 1). La evaluación del curso se basó en asignaciones y un proyecto final de investigación.

Año	Matriculados	Matemáticas	Biologia
Agosto-Diciembre 2002	12	6 (50%)	6 (50%)
Agosto-Diciembre 2004	15	5 (33%)	10 (67%)

Tabla 1: Participación de estudiantes en las sesiones del 2002 y 2004.

Temas del curso

El tema central del curso fue el área de biología de poblaciones y comunidades. Específicamente se consideraron modelos de crecimiento poblacional de una especie, modelos de interacción de especies, modelos espacialmente explícitos y poblaciones estructuradas. La distribución de tiempo a lo largo del semestre fue la siguiente:

- Modelos de crecimiento poblacional para una especie: modelos discretos, ecuaciones de diferencias finitas (2 semanas)
- Modelos de crecimiento poblacional para una especie: modelos continuos, ecuaciones diferenciales (2 semanas)
- Modelos de interacción de especies: competencia, depredador-presa, sistemodinámica (3 semanas)
- Modelos espacialmente explícitos: modelado basado en agentes (2 semanas)
- Modelos de poblaciones estructuradas: matrices y álgebra lineal (4 semanas)

Durante la primera fase del curso nos concentramos en modelos poblacionales para una especie. Comenzamos la discusión a partir de modelos discretos de diferencias finitas en donde las derivadas se discretizan de forma tal manera que el problema se reduce a uno de tipo algebraico. Este material sirvió de preámbulo a modelos continuos en donde la formulación matemática tradicional esta basada en Ecuaciones Diferenciales Ordinarias. En esta etapa se trabajo con los modelos clásicos de crecimiento constante, crecimiento exponencial, y crecimiento logístico. Luego de esta etapa pasamos a considerar modelos continuos de interacción de especies como lo son los de competencia y presa-depredador. Dado que muchos de los temas y prácticas de laboratorio requerían la utilización de técnicas de manipulación algebraica y analítica, así como computación numérica, y visualización resulto conveniente utilizar algún tipo de programado para estos fines. En la primera ocasión que se enseñó el curso utilizamos el ambiente computacional de *Mathematica*, sin embargo, la opinión generalizada de los estudiantes fue muy negativa principalmente debido a algunos aspectos de la usabilidad del programa y otros relacionados a la estabilidad del mismo. En la segunda ocasión se decidió utilizar *Maple*, el cuál tiene muchos elementos similares a *Mathematica*, pero la opinión de los estudiantes fue mucho mas positiva y de esta manera se superaron algunas de las dificultades que se encontraron con *Mathematica*.

Dada la diversidad de temas que se desarrollaron durante el semestre, y el hecho de que muchos de estos temas son solo discutidos en cursos a nivel graduado, se requirió complementar el enfoque tradicional con otras técnicas novedosas de modelado. De esta manera tuvimos la oportunidad de considerar escenarios más complejos y realistas. Aparte de lo que denominamos el enfoque matemático tradicional utilizamos dos técnicas de modelado: la sistemodinámica, y el modelado basado en agentes. Cada una de la cuáles describiremos brevemente.

Modelado basados en la Sistemodinámica

La dinámica de sistemas o sistemodinámica es una técnica interdisciplinaria de modelado desarrollada por J.W. Forrester en la década del 50 con el fin de construir modelos y hacer simulaciones de sistemas complejos (Arracil et al. 1997). Estos sistemas complejos pueden ser de tipo social o natural pero en ambos casos utilizando un lenguaje común para la elaboración de los modelos. Desde el punto de vista del modelado sistemodinámico, para cualquier sistema dinámico podemos identificar dos tipos de propiedades (i) los *niveles* o aquellas propiedades que se acumulan a medida que transcurre el tiempo (ii) *los flujos* o aquellas propiedades que representan procesos que aumentan o disminuyen los niveles. Un ejemplo de un nivel podría ser la cantidad de individuos en una población mientras que el flujo podría ser la tasa de natalidad o mortandad para una cierta población. Desde esta perspectiva cualquier sistema dinámico no es otra cosa que una combinación de niveles con sus respectivos flujos los cuales se encargan de acumular o drenar lo contenido en los niveles. Aparte de los niveles y flujos la sistemodinámica identifica los denominados *conectores* los cuales nos permiten establecer vínculos entre todos los componentes del modelo que se pretenda construir. Además la sistemodinámica enfatiza la visualización de los modelos (con sus respectivos niveles, flujos, y conectores) en forma pictórica a través de lo que se conoce como un *Diagrama de Forrester* (ver Figura 1).



Figura 1: Diagrama de Forrester genérico en donde se ilustra los íconos correspondientes a un nivel y los flujos de entrada y salida correspondientes.

Según aumenta la complejidad de los modelos que se pretenden construir comenzamos a identificar relaciones circulares (bucles de retroalimentación o feedback loops) entre cada uno de los componentes del modelo. Específicamente la sistemodinámica identifica dos tipos de bucles de retroalimentación: el bucle de retroalimentación positivo y el bucle de retroalimentación negativo. Un ejemplo de bucle retroalimentación positiva es la relación que existe entre la población (nivel) y los nacimientos (flujo). Si la cantidad de nacimientos aumenta, la población aumenta, y si aumenta la población aumenta la cantidad de nacimientos. De esta manera un bucle de retroalimentación positivo establece una relación circular donde: si una cierta propiedad aumenta (o disminuye) la otra propiedad aumentará (o disminuirá). Por otro lado, un ejemplo de bucle de retroalimentación negativo es la relación entre la población y la cantidad de muertes. Si las muertes aumentan, disminuye la población y si disminuye la población esto resulta en una disminución en las muertes. Por tanto, los bucles de retroalimentación negativos establecen un mecanismo de control en los sistemas dinámicos.

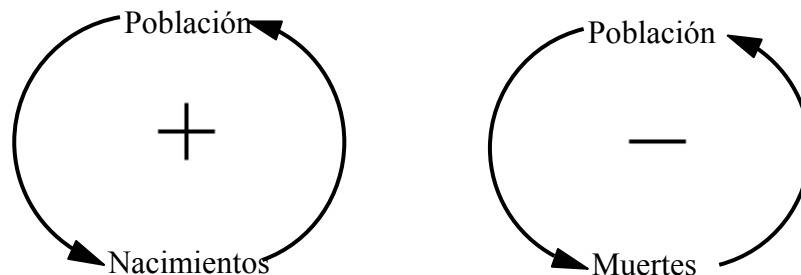


Figura 2: Representación gráfica de los bucles positivos y negativos.

La sistemodinámica es una metodología en donde el objetivo final es crear un modelo y simularlo con la ayuda del computador. De esta manera se pueden explorar diferentes escenarios y utilizarlos para el desarrollo de algún tipo de estrategia o decisión con impacto práctico. Para estos fines existen dos tipos de ambientes computacionales para la construcción de modelos: STELLA (REFERENCIA) y VENSIM (REFERENCIA). Cada uno de ellos posee sus peculiaridades pero ambos están basados en el mismo conjunto de componentes comúnmente utilizados en la sistemodinámica. Por ejemplo, STELLA posee una interfaz gráfica que tiene a ser mucho más simple de utilizar para el usuario principiante, mientras que VENSIM suele ser más apropiado para la investigación. Sin embargo, en la práctica ambos se utilizan tanto para la educación como para la investigación.

Modelado Basado en Agentes

El modelado basado en agentes (MBA) (o individuos) es una técnica de simulación en donde la complejidad que se observa globalmente está determinada por la interacción local de los individuos de una población (REFERENCIA). Los agentes de la población podrían ser plantas y animales en un ecosistema, vehículos en el tráfico, personas en un tumulto de gente, o agentes autónomos en un juego de video. Este tipo de modelos consisten de un *ambiente* en donde ocurren las interacciones entre los agentes, reglas de comportamiento de los agentes, y otros *parámetros* que caracterizan la simulación. Este tipo de metodología contrasta con las técnicas que hemos mencionado hasta el momento en donde las características de una población (población anual, densidades, etc.) son promediadas y el modelo pretende reproducir variaciones en las cantidades promediadas. El MBA posee una serie de características que lo hacen muy atractivo para el modelado de organismos en un ecosistema, entre las cuáles podemos mencionar: (i) la simulación de movilidad en los organismos (ii) y la posibilidad de incluir la dimensión espacial de forma explícita. Como antecedente histórico al MBA podemos mencionar el desarrollo de los Automatas Celulares por John von Neumann y Stanislaw Ulam en la década del 40. Sin embargo, en la actualidad podríamos categorizar los autómatas celulares como pertenecientes a un grupo general de metodologías conocidas como MBA.

Existen diferentes ambientes computacionales en los que se pueden construir y programar simulaciones con agentes. Uno de los más conocidos, y posiblemente uno de los más antiguos, es el SWARM (REFERENCIA) desarrollado en el Instituto de Santa Fe en Nuevo Méjico. El mismo consiste de una serie de librerías en el lenguaje Objective-C y Java las cuales se pueden utilizar para elaborar modelos con un número de indeterminado de agentes interactuando concurrentemente. Otro ambiente, muy parecido a SWARM, es RePast (The Recursive Porous Agent Simulation Toolkit) creado en la Universidad de Chicago y al igual que el SWARM consiste de una serie de librerías en Java para facilitar la construcción de los modelos. Todos estos ambientes de programación tienen en común que para poder construir los modelos hay que tener experiencia previa en programación con un lenguaje de alto nivel. Esta situación nos planteó un problema ya que siendo un curso multidisciplinario muchos de los estudiantes no tenían experiencia previa en programación. Ante esta situación necesitábamos un ambiente de programación en donde el periodo de aprendizaje fuera relativamente corto y que a la vez nos permitiera construir simulaciones de poblaciones biológicas con un cierto nivel de complejidad. Todas estas características las encontramos en el ambiente de programación de agentes NetLogo.

NetLogo fué creado en el Center for Connected Learning and Computer-based Modeling de la Universidad de Northwestern en Evanston Illinois. A partir del nombre podemos apreciar que uno de sus predecesores filosóficos es el lenguaje Logo, desarrollado en la década del 70 por Seymour Papert, utilizado para la enseñanza de matemáticas y programación a niños. NetLogo mantiene algunas de las metáforas utilizadas originalmente en Logo pero ha evolucionado al permitir definir cientos de miles de agentes en donde a cada uno de ellos se le asignan reglas de comportamiento específicas. En los últimos años NetLogo (y otro de sus predecesores StarLogo) ha resultado ser un lenguaje muy popular para el modelado basado en agentes ya que además de ser muy apropiado para la enseñanza este provee los elementos necesarios para desarrollar modelos a nivel avanzado y de investigación. En NetLogo el mundo es en dos dimensiones y consiste de un conjunto de parches (patches) de distintos tipos y un cierto número de tortugas

(turtles) de diferentes especies. A cada una de de las tortugas se les puede indicar que hacer si se topa con una tortuga de un cierto tipo o cuando se coloca sobre un parche de un tipo en particular. Además, NetLogo provee diversas herramientas para la construcción de interfaces gráficas sencillas lo cuál no solo facilita la exploración de los modelos sino que facilita la presentación y divulgación de los mismos.

El Problema de la Presa-Depredador

Con el fin de contrastar los tres enfoques presentados anteriormente consideraremos el problema de la presa-depredador. Al mismo se le dedico una cantidad de tiempo sustancial del semestre tanto en conferencias como en las prácticas de laboratorio. Con el mismo pretendemos mostrar de forma concreta las virtudes y defectos de cada una de los enfoques utilizados.

Formulación del Problema

El problema de la presa-depredador pretende modelar la interacción entre una presa y un depredador en un ecosistema. Este problema se puede formular matemáticamente como un sistema de dos ecuaciones diferenciales acopladas las cuáles son comúnmente denominadas como Lotka-Volterra.

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= Ax - Bxy \\ \frac{dy}{dt} &= -Cy + Dxy\end{aligned}$$

En donde x corresponde a la cantidad de presas y y corresponde a la cantidad de depredadores. El modelo posee una serie de constantes como lo son: A (la tasa de crecimiento de la presa), B (la tasa a la que el depredador destruye la presa), C (la tasa de mortalidad del depredador), y D (la tasa a la que el depredador aumenta al consumir la presa). Noten que el primer término de la primera ecuación corresponde a un modelo de crecimiento exponencial de la presa la cuál se ve diezmada a causa de la interacción con el depredador según lo establece la constante B. Mientras que la segunda ecuación presenta la reducción del depredador a causa de muerte (primer término) y el incremento de este por el consumo de la presa (segundo término). La solución para un escenario típico de Lotka-Volterra ($A=1.5$, $B=1$, $C=3$, y $D=1$) y condiciones iniciales $x_0=10$ y $y_0=5$ se muestran en la Figura 3.

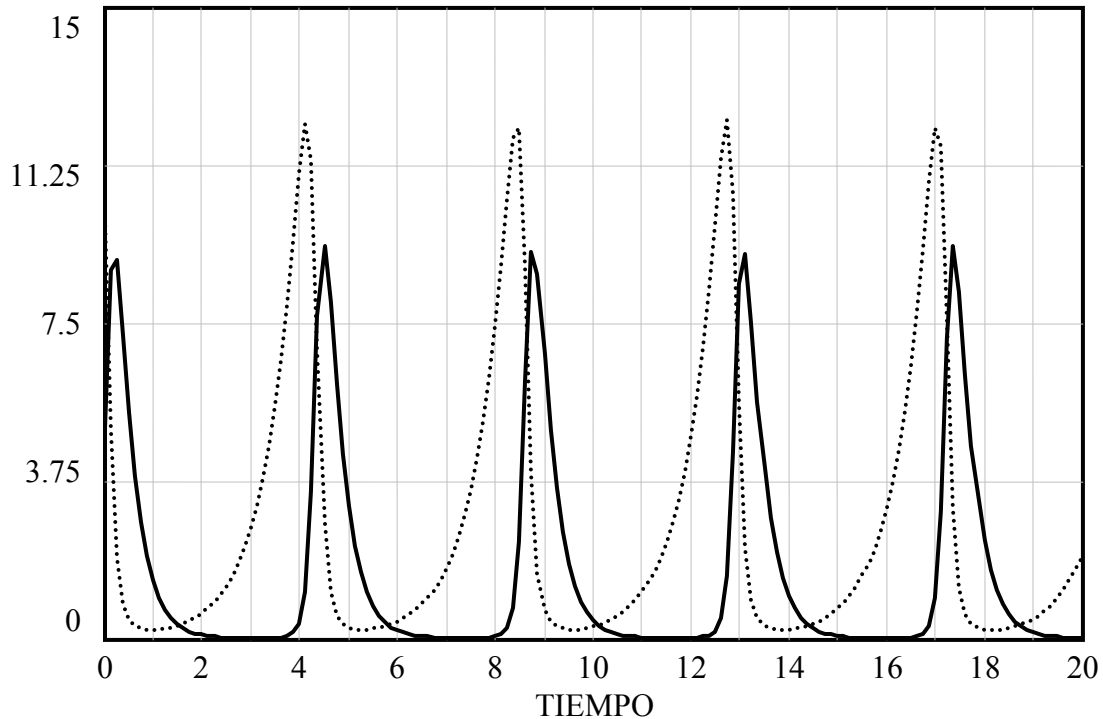


Figura 3: Solución numérica del sistema de ecuaciones diferenciales Lotka-Volterra para $A=1.5$, $B=1$, $C=3$, y $D = 1$ y condiciones iniciales $x_0 = 10$ (presa) y $y_0 = 5$ (depredador). La línea punteada corresponde a la presa y la línea continua corresponde al depredador.

La Sistemodinámica y la Presa-Depredador

En el enfoque sistemodinámico comenzamos planteando las preguntas que queremos contestar: por ejemplo, ¿Qué efecto tendrá en la presa la interacción con un depredador? ¿Cuáles de los parámetros de la presa o el depredador (tasas de crecimiento, mortandad, etc.) que determinan el que la presa o el depredador sobreviva? Evidentemente estas son preguntas importantes y las podremos contestar una vez completamos la construcción del modelo. Sin embargo, para comenzar la construcción del modelo debemos comenzar identificando los niveles y flujos del modelo. ¿Qué se acumula en lo que queremos modelar? Evidentemente necesitamos un nivel correspondiente a la cantidad de presas y un nivel correspondiente a la cantidad de depredador. ¿Cuáles serán los flujos? Podemos identificar, con el beneficio de que conocemos la formulación de Lotka-Volterra, varios flujos como los son la tasa de crecimiento de la presa, la tasa de mortalidad del depredador, entre otros.

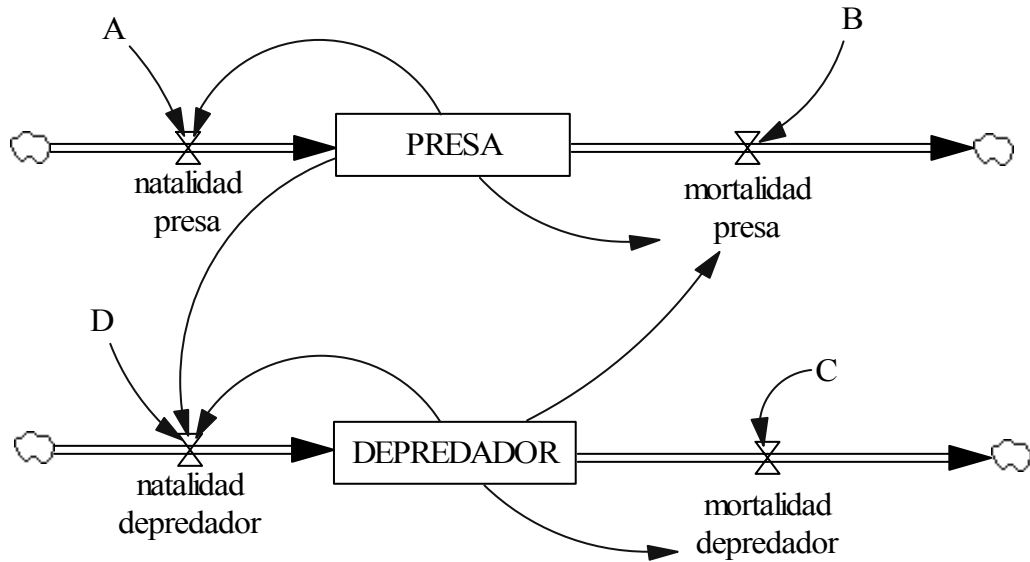
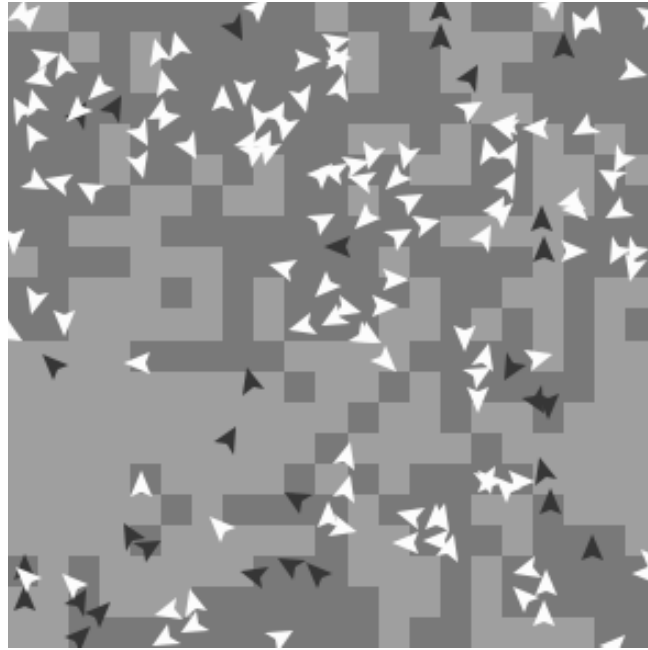


Figura 4: Modelo sistemodinámico del problema de la presa-depredador.

Un modelo basado en agentes de la interacción presa-depredador

En esta sección describiremos de forma general una implementación del problema de la presa-depredador utilizando *NetLogo*. El mismo es un ejemplo de una serie de prácticas de laboratorio en donde los estudiantes desarrollaron simulaciones de la interacción presa-depredador así como algunas extensiones al modelo básico. Para construir la simulaciones comenzamos por identificar los agentes participantes en la misma: dos conjunto de tortugas. El primer conjunto de tortugas deberán corresponder a la presa mientras que el segundo conjunto deberá corresponder al depredador. Las reglas de comportamiento de cada presa son muy sencillas: se deberán desplazar aleatoriamente, se deberán reproducir, y en caso de posesionarse en un parche ocupado por un depredador deberán morir. En el caso del depredador: se deberán desplazar aleatoriamente, se deberán reproducir, y en caso de posicionarse en un parche ocupado por una presa deberá consumirlo (comerlo) lo cual implicará un aumento de de energía para el depredador. Una vez se define las reglas de comportamiento para cada conjunto de agentes se estable un número inicial para cada uno de ellos y en cada iteración se aplican las reglas de comportamiento correspondientes y se contabilizan el número de presas y depredadores. Una corrida típica de la simulación se muestra en la FIGURA.

(a)



(b)

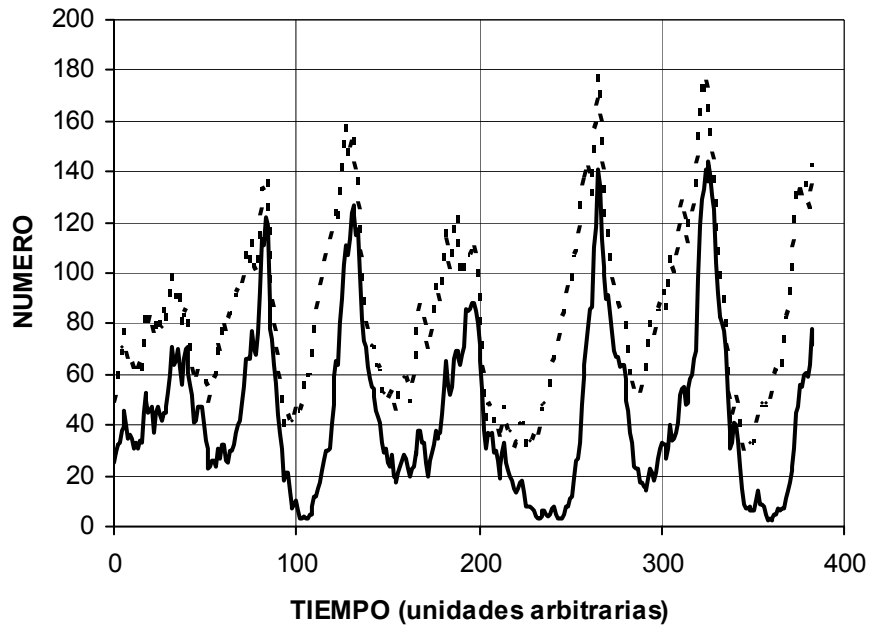


Figura 5: Implementación en NetLogo del problema de la presa-depredador. (a) visor gráfico en donde se muestra la interacción de la presa (flechas blancas), depredador (flechas negras), los parches gris claro corresponden al alimento de la presa (herbívora). (b) perfil de las poblaciones de la presa (línea punteada) y el depredador (línea continua).

Enfoque	Descripción	Ventajas	Desventajas
Ecuaciones Diferenciales	Enfoque matemático tradicional. Es una ecuación en donde las derivadas de una función aparecen como variables.	Enfoque formal continuo. Existe una amplia variedad de métodos analíticos y numéricos para resolverlas así como una extensa base teórica.	Incluir efectos biológicos realistas tales como retrasos (delays) y otras no-linealidades requiere la utilización de métodos números avanzados. Incluir la dimensión espacial requiere la formulación de una ecuación diferencial parcial.
Sisteminámica	Técnica multidisciplinaria para la construcción y simulación de modelos basada en la identificación de niveles, flujos, y conectores.	Permite construir modelos de forma cualitativa utilizando un lenguaje gráfico. Provee para explorar escenarios alternos. Es un lenguaje de modelización de alto nivel basado en las ecuaciones diferenciales. Facilita la presentación y divulgación de los modelos.	El programado disponible es de tipo comercial (propietario) lo cual limita el acceso a los usuarios. No se puede incluir la dimensión espacial de forma explícita.
Simulación basada en agentes	Se programan agentes los cuáles a partir de la interacción local generan complejidad global.	Permite construir modelos en donde la dimensión espacial es explícita. El programado disponible es gratuito.	Requiere conocimientos básicos de programación.

Tabla 2: Comparación de los tres enfoques de modelización aplicados al problema de la presa-depredador.

Resultados y Discusión

El curso MECOBI se ha ofrecido en dos ocasiones en la Universidad de Puerto Rico en Humacao. La receptividad general de los estudiantes a sido muy positiva como los demuestra la evaluaciones estudiantiles en la sesión del 2002 (REFERENCIA?). La utilización de los tres enfoques de enseñanza mencionados en este artículo fueron desarrollados por primer vez durante la sesión del 2004. En el 2002 se utilizó fundamentalmente el enfoque matemático tradicional. La experiencia con los tres enfoques resulto ser muy enriquecedora tanto para los estudiantes como para los profesores. De esta manera muchos estudiantes reconocieron que al poder enfocar un mismo problema, desde diferentes puntos de vista, lograban complementar y en muchos casos aclarar problemas conceptuales.

Uno de los requerimientos más importantes del curso es el proyecto final de investigación. En el mismo los estudiantes tienen que desarrollar un problema de investigación relacionado a alguno de los temas discutidos durante el semestre. En el siguiente listado mostramos los títulos de algunos de los proyectos realizados por los estudiantes.

Título	Autores
<i>Análisis poblacional de Dermochelys coriacea (Tinglar)</i>	José Aponte (MC) Luz R.
<i>Un modelo matemático para el estudio de la incidencia de meningitis en Puerto Rico</i>	Aixa (BMC) Luis Pérez (MC)
<i>Modelo de sustentabilidad para el árbol de Caoba</i>	Sol Taína (BMC) Delíz Torres (MC)
<i>La propagación de drogas como un sistema dinámico</i>	Yetzenia Alicea (MC)
<i>Modelo de una comunidad utilizando redes alimentarias</i>	Tomás Maquez (MC) Sofía Olivero (BMC)
<i>Efecto de la introducción de un depredador a un cultivo agrícola infectado por una población de áfidos</i>	Vilmaliz (MVS)

De este listado se puede apreciar la variedad de temas e intereses desarrollados por los estudiantes. En esta etapa MECOBI se ofrece de forma experimental en la UPRH estando el prontuario bajo consideración con el fin de convertirlo en un curso regular. Entendemos que se están dando los primeros pasos en el proceso de fortalecimiento y consolidación de la enseñanza multidisciplinaria.

Agradecimientos

Queremos agradecer al Dr. Pablo Negrón, Director del Departamento de Matemáticas, y a la Dra. Carmen Baerga, Directora del Departamento de Biología, por el apoyo prestado en la preparación y realización del curso.

Referencias

1. Wolfram, S. 2003. The Mathematica Book. Wolfram Media Press.
2. Heck, A., Heck, André 2003. Introduction to Maple. Springer-Verlag.
3. Altschuler, D.R., Medín, J., Nuñez, E. 2005 Ciencia, Pseudociencia, y Educación. Ediciones Callejón.
4. Minar, N., Burkhar, R., Langton, R., Askenazi, M. 1996 The Swarm Simulation System: A Toolkit for Building Multi-Agent Simulations.
5. Ventana Systems. Ventana Systems Homepage 2005. <http://www.vensim.com>
6. Aracil, J., Gordillo, F. 1997. Dinámica de Sistemas. Alianza Editorial. Madrid.
7. Resnick, M. 2000. Turtles, Termites, and Traffic Jams. MIT Press.
8. Tissue, Seth, Wilensky U. 2004. NetLogo: A Simple Environment to Modeling Complexity. International Conference on Complex Systems, Boston.
9. Edelstein-Keshet, L. 1988 Mathematical Models in Biology. McGraw Hill.