

# ***Un Ambiente de Aprendizaje Basado en Software para la Enseñanza de Modelos Matemáticos en Ecología: Model-Lab***

Emilio García Roselló<sup>1</sup>, Rosa Barciela Fdez<sup>2</sup>, Emilio Fernández Suárez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos, Facultad de Ciencias -

Universidad de Vigo, Lagoas-Marcosende s/n, 36200 Vigo - España

<sup>2</sup> Departamento de Ecología y Biología animal, Facultad de Ciencias - Universidad de

Vigo, Lagoas-Marcosende s/n, 36200 Vigo - España

Tel: +34-986-81-26-57. E-mail: erosello@uvigo.es

## ***Resumen***

La enseñanza del modelado ecológico de forma exclusivamente teórica no es suficiente para transmitir al alumno el potencial real de esta aproximación metodológica. Por ello, se ha desarrollado Model-Lab, una herramienta software orientada a la construcción de modelos de sistemas ecológicos. El software permite construir modelos relativamente complejos siguiendo todas las fases de desarrollo de modelos ecológicos: construcción del modelo conceptual, inclusión de ecuaciones y parámetros, evaluación, análisis de sensibilidad y validación. Model-Lab se ha utilizado de forma experimental durante 2 cursos consecutivos (96/97 y 97/98) en clases prácticas de la Licenciatura en Ciencias del Mar de la Universidad de Vigo, evidenciándose que el alumno modifica en gran medida su apreciación de los modelos ecológicos, pasando de percibirlos como un conjunto de ecuaciones estático a comprenderlos como un sistema dinámico, entendiendo claramente la utilidad de éstos como herramienta predictiva en el estudio de los ecosistemas.

## **Palabras Clave**

Modelado ecológico, ambientes de aprendizaje basados en software, software educativo, software de construcción de modelos.

## **1.Introducción.**

El desarrollo de modelos matemáticos es una aproximación ampliamente utilizada con el fin de analizar, comprender y predecir el funcionamiento de cualquier sistema en función de las variables que rigen su dinámica. El gran avance generado por el desarrollo de modelos de simulación en la comprensión del comportamiento de los ecosistemas, ha conducido a su inclusión dentro de la docencia a nivel universitario en materias relacionadas con la ecología. Sin embargo, a menudo se plantea un problema de percepción por parte del alumno de la verdadera naturaleza, funcionamiento y utilidad de estos modelos. La enseñanza del modelado ecológico de forma exclusivamente teórica no es suficiente para transmitir al alumno el potencial real de esta aproximación metodológica. A través de la teoría, el alumno obtiene un conocimiento factual del modelado ecológico, y en consecuencia tiende a percibir los modelos como una serie de ecuaciones invariable, estática, y no como una estructura dinámica que representa la evolución temporal de un sistema real y complejo. La posibilidad de realizar prácticas usando el ordenador y un software de construcción de modelos permite al alumno adquirir un conocimiento procedural de la actividad de modelado, al darle la posibilidad de realizar actividades como el diseño de modelos conceptuales y numéricos, análisis de sensibilidad, validación, etc. (Hestenes, 1987),

adquiriendo así el conjunto muchas características de un ambiente de aprendizaje exploratorio basado en software para la docencia del modelado ecológico (Teodoro, 1992).

La herramienta que se presenta, denominada Model-Lab, nació orientada a la realización de prácticas de modelado ecológico en la licenciatura de Ciencias del mar. Esta necesidad surge del hecho de que en las últimas décadas, el nivel de conocimiento sobre los procesos ecológicos que suceden en el medio marino ha avanzado notablemente, y paralelo a éste ha surgido el interés por el desarrollo de modelos matemáticos como herramienta para describir y predecir el efecto de los cambios ambientales sobre las concentraciones y flujos de elementos biogeoquímicamente importantes en el océano, especialmente el carbono (Evans y Fasham, 1993).

Los objetivos que se plantearon en este trabajo fueron desarrollar una herramienta software de modelado de fácil manejo para estudiantes o investigadores sin conocimientos previos de programación de ordenadores, que permita: mejorar la docencia en la enseñanza de modelos ecológicos. Para ello, se pretendía poder realizar prácticas de construcción y utilización de modelos de simulación ecológicos. Generar una herramienta útil para la docencia, especialmente a nivel universitario, debiendo prevalecer por tanto la sencillez, la facilidad de uso y la orientación didáctica. Dotarle de facilidad para que el usuario "explore" e interactúe con el modelo; esto implica sobre todo una alta flexibilidad y libertad de acción del usuario sobre los modelos que se puedan construir. Todo ello sin renunciar a conseguir una herramienta suficientemente potente como para poder construir modelos relativamente complejos. Adaptarse a las características específicas de los modelos de simulación ecológicos, y cubrir de forma efectiva las etapas y metodología típicas de su desarrollo.

## **2. Características del modelado ecológico.**

A la hora de crear una herramienta para la construcción de modelos ecológicos, debían tenerse en cuenta las características diferenciales de éstos frente a otras disciplinas. Entre éstas, destaca el hecho de que los modelos ecológicos incluyen, por lo general, un número relativamente elevado de ecuaciones y parámetros (Hall & Day, 1977), lo que obliga al diseño previo de un modelo conceptual y una compartimentalización y jerarquización del modelo para poder ser fácilmente abarcable (Overton, 1977). A menudo, los sistemas planctónicos que pretendemos modelar, al igual que otros sistemas ecológicos, se describen mediante modelos conceptuales de compartimentos, donde cada uno de ellos representa un nivel trófico o un grupo taxonómico y las interacciones entre ellos se expresan mediante los flujos establecidos entre los mismos (Odum, 1985).

Se estudiaron las metodologías clásicas de construcción de modelos en dinámica de sistemas (Aracil, 1986), y de modelado ecológico, como la descrita por Overton (1977), y se tuvieron muy en cuenta los trabajos que apuntan al uso de técnicas orientadas a objetos en el diseño e implementación de modelos ecológicos en ordenador (Silvert, 1992; Sequeira et al, 1991, 1997). Según estas metodologías, las fases del desarrollo de un modelo ecológico serían las siguientes:

### *Identificación de los componentes del sistema a modelar.*

Una vez identificados dichos componentes y las relaciones o flujos que se establecen entre ellos, y su inclusión en una jerarquía lógica, obtenemos el modelo conceptual.

*Determinación de las respuestas fundamentales de los componentes a su entorno y a otros componentes.*

Esta fase supondrá la introducción de la funcionalidad que rige el comportamiento de cada componente dentro del modelo, lo que se consigue mediante la identificación de las variables, y parámetros de cada uno de los componentes, así como las ecuaciones que rigen su dinámica.

*Evaluación numérica del modelo*

Se realiza una interpretación matemática de las ecuaciones introducidas de forma iterativa permitiendo obtener así una salida numérica y gráfica de la evolución temporal del modelo.

*Ajuste de los parámetros del modelo. Análisis de sensibilidad.*

A menudo en un modelo se han de realizar variaciones de distintos parámetros para conseguir un ajuste fino de la respuesta del modelo a la deseada (Overton,1977). El análisis de sensibilidad permite observar la respuesta del modelo a cambios en uno o varios parámetros dentro un determinado rango.

*Validación del modelo e inclusión de datos reales.*

Consiste en la comparación de la salida del modelo con datos obtenidos de forma empírica o la inclusión de datos empíricos como variables del modelo.

### **3. Implementación de la herramienta.**

El análisis de la aplicación a diseñar se basó en el estudio de las fases de diseño de un modelo ecológico, así como en las características de estos modelos y de los elementos típicos que intervienen en ellos, tal y como se detalló anteriormente.

Esta herramienta presenta una interfaz gráfica para diseñar el modelo creando componentes que se pueden interconectar, lo que permite implementar el diseño conceptual del modelo de forma visual. La interfaz de usuario es un elemento determinante en el éxito de una herramienta de este tipo, ya que influye de forma decisiva en su sencillez de uso (Shneiderman, 1992)

Asimismo, se pueden implementar componentes que se subdividan a su vez en otros. Un modelo puede jerarquizarse para presentar una estructura en forma de árbol. Se soporta de esta forma la definición de submodelos. Cada uno de estos componentes contiene variables y constantes (que denominamos términos). Las variables tienen una ecuación asociada que determina su funcionamiento. En estas ecuaciones pueden incluirse términos de otros componentes que estén conectados al actual, representando así los flujos entre ellos. También es posible incluir datos procedentes de fuentes externas (ficheros) definiendo variables asociadas a ficheros de datos. La herramienta lleva a cabo una evaluación del modelo, obteniendo así series temporales de datos que pueden visualizarse en formato gráfico o numérico. Para facilitar el análisis de sensibilidad, se pueden almacenar datos históricos así como realizar análisis estadísticos sencillos. El ajuste paramétrico se facilita mediante una ventana desde la que se puede acceder directamente a todas las constantes y valores iniciales definidos en el modelo.

Para la implementación del software, se eligió el entorno de desarrollo orientado a objetos Borland Delphi bajo Microsoft Windows 95.

La herramienta se desarrolló en tres grandes módulos:

- Módulo de diseño del modelo.
- Módulo de evaluación del modelo.

- Módulo de salida de datos.

### *Módulo de diseño del modelo.*

Este módulo se encarga de gestionar la interfaz de diseño gráfico. El usuario puede, a través de esta interfaz, crear visualmente los componentes del modelo y establecer las conexiones entre ellos. Estas conexiones permiten que un componente acceda a las variables de otro al que esté conectado. Dentro de este módulo de diseño también existe un editor de componentes, que permite introducir las variables y constantes que definen su funcionamiento.

Cuando se crea un nuevo modelo, el sistema introduce automáticamente tres componentes en el modelo; ninguno de los tres visible, a diferencia de los que añade el usuario, aunque sí son accesibles. Estos componentes son:

Componente SISTEMA: por defecto el componente tiene definida una variable de nombre Tiempo, como  $\text{Tiempo}=\text{Tiempo}+1$ , partiendo de 0, aunque puede ser modificada por el usuario.

Componente FICHEROS: dentro de este componente se pueden definir variables asociadas a ficheros de datos externos.

Componente CONDICIONES\_STOP: Las ecuaciones que se introduzcan dentro de este componente son evaluadas, y si devuelven un valor distinto de 0, se detiene la evaluación del modelo. Es posible indicar desde condiciones de parada sencillas, como que el modelo se detenga cuando la variable Tiempo alcance cierto valor, hasta otras más complejas, por ejemplo que cierta tasa supere un umbral, siendo posible introducir todas las condiciones que

se desee. Cuando cualquiera de las condiciones introducidas se cumple, el sistema muestra un mensaje de aviso, permitiendo al usuario detener el modelo, continuar, o desactivar esta condición de parada de forma que no vuelva a ser evaluada.

Para facilitar un entendimiento visual de la estructura del modelo, éste se presenta en forma diagramática o conceptual, y en forma de árbol (Fig.1), desde el que se puede acceder a cualquier componente y ver los niveles en los que se subdividen los módulos.

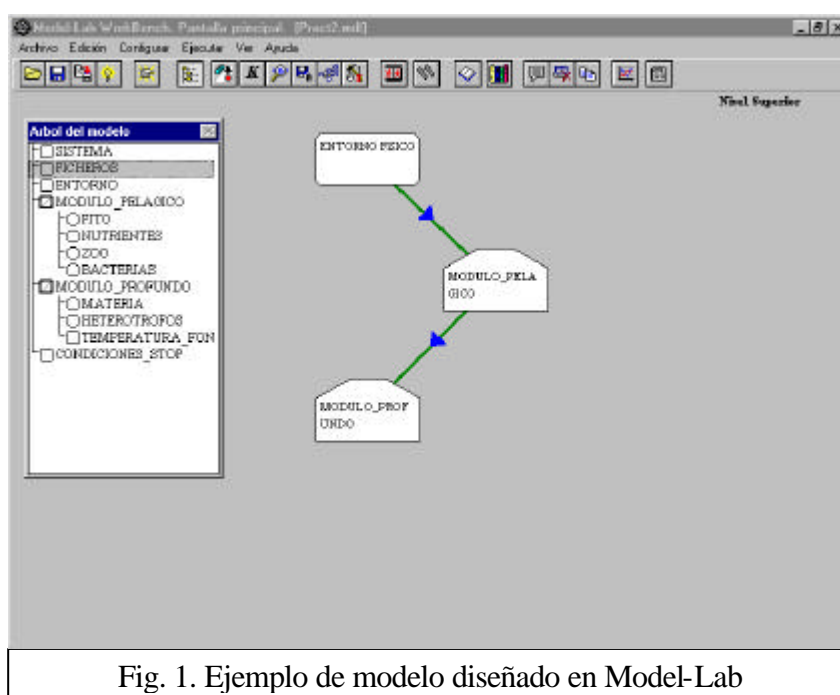


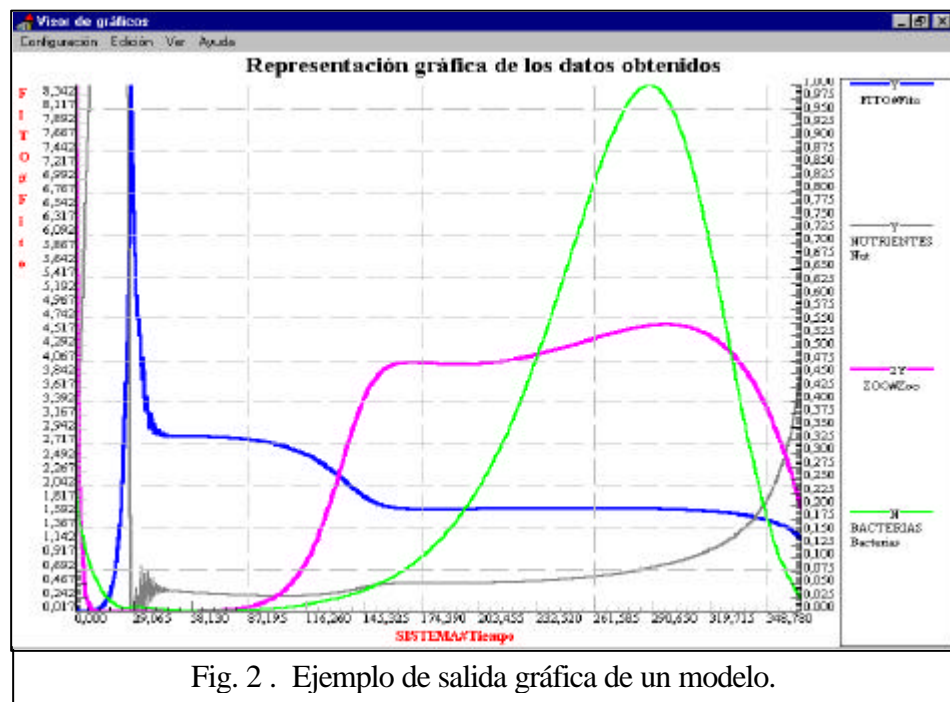
Fig. 1. Ejemplo de modelo diseñado en Model-Lab

### Módulo de evaluación del modelo.

Este módulo es el encargado de evaluar matemáticamente el modelo y de obtener resultados numéricos. Su lógica es sencilla: evalúa cada componente, y dentro de cada componente, cada una de las ecuaciones de éste, de forma iterativa hasta que se cumpla alguna de las condiciones de parada (el usuario también puede detener el proceso a voluntad). Se ha creado también una aplicación que facilita que el usuario pueda definir nuevas funciones. Permite editar el fichero de librería de funciones, ofreciendo así posibilidad de ampliarla. Así, el usuario puede definir una función como una expresión matemática, o también, si es necesario, puede crear una DLL donde implemente nuevas funciones.

### Módulo de salida de datos.

El módulo de salida de datos se compone de dos elementos diferenciados: la salida numérica y la salida gráfica. La primera presenta los datos en forma de tabla, permitiendo copiarlos y pegarlos en otra aplicación o volcarlos a un fichero en ASCII. La salida gráfica (Fig. 2) permite presentar los datos en modo X-Y, y con las posibilidades propias de este tipo de representaciones: cambios de escala, color, etc... Se ha añadido un módulo que calcula los estadísticos básicos de una serie de datos, así como 3 tipos de regresiones (lineal, Passing/Bablok, y cuadrática) y la integral definida.



## 4. Utilización en la docencia.

Son relativamente numerosas las herramientas polivalentes de modelado que permiten desarrollar modelos de dinámica de sistemas en disciplinas científicas

diversas, como Stella<sup>MR</sup>, Powersim<sup>MR</sup>, Modellus<sup>MR</sup> o Simulink-Matlab<sup>MR</sup>. Existen también precedentes en el desarrollo de software dedicado al modelado de procesos ecológicos tanto en el campo de la investigación, por ejemplo los paquetes EcoSim<sup>MR</sup>, Ecowin (Ferreira, 1995) o BSIM (Silvert, 1992), como a nivel académico (Ewell, 1989). La necesidad de disponer de un entorno sencillo, de fácil manejo, en el que la mayor parte del tiempo se dedique a la actividad de modelado, y no al aprendizaje de la utilización de la herramienta y, por otro lado, la pretensión de disponer de un entorno lo más adaptado posible a las características de las técnicas de modelado ecológico que se pretendían enseñar justifican la decisión de desarrollar un software específico.

Model-Lab se ha utilizado en 2 cursos consecutivos (96/97 y 97/98) en las clases prácticas de la materia "Medio Ambiente" de la Licenciatura en Ciencias del Mar de la Universidad de Vigo. Las prácticas constaron de 8 horas, y se realizaban en grupos de 20 a 25 alumnos trabajando en grupos de 2 a 3 personas en cada ordenador, lo que parece mejorar la capacidad de los estudiantes para comprender y completar el ejercicio con éxito (Quinn, 1996). El alumno recibe un guión en el que se describe un modelo sencillo de un ecosistema planctónico que consta de 23 ecuaciones y 22 parámetros. Se explica al alumno, aproximadamente en 30 a 45 minutos, el funcionamiento básico de Model-Lab, y posteriormente éste procede al diseño conceptual del modelo (similar al mostrado en la Fig. 1), a la inclusión de los parámetros, variables y ecuaciones, a un análisis de sensibilidad y al estudio de la respuesta del modelo a cambios en ciertos parámetros, todo ello usando el software como herramienta básica.

El hecho de que Model-Lab permita trasladar de forma directa el modelo conceptual al ordenador reduce el esfuerzo del alumno, ya que no tiene que adaptarse a una determinada metodología de diseño, ni a una simbología específica que normalmente no es parte de su formación en la materia. La sintaxis de las expresiones matemáticas es similar a la empleada en las hojas de cálculo más usuales, reduciendo así la curva de aprendizaje para aquellos usuarios que ya conozcan alguno de estos sistemas. El tiempo de aprendizaje de manejo del software se ve de esta manera claramente reducido.

Gracias a la posibilidad de jerarquizar su construcción, se soslaya de forma eficaz la complejidad que alcanzaría el modelo si debiera construirse definiendo todos sus componentes a un mismo nivel; además, permite al alumno entender y practicar los conceptos de diseño jerárquico y utilización de submodelos. La creación de conexiones entre compartimentos del modelo para poder luego acceder a términos de un compartimento desde otro ayuda al alumno a captar las interrelaciones y los flujos existentes entre compartimentos.

La aplicación docente experimental de Model-Lab ha permitido comprobar que: el 100% de los alumnos consigue construir el modelo conceptual correctamente. en algunos casos, la introducción de las expresiones matemáticas lleva a confusión debido a las diferencias de sintaxis entre las ecuaciones en su forma matemática y la aceptada por el software, lo que ha planteado la posibilidad de modificar este punto. La posterior evaluación del modelo, el análisis de sensibilidad, y el uso de gráficas para comparar resultados no suelen plantear grandes dificultades a los alumnos.

Se ha puesto también de manifiesto que el alumno modifica en gran medida su apreciación de los modelos ecológicos, pasando de percibirlos como un conjunto de ecuaciones estático a comprenderlos como un sistema dinámico, sujeto a variaciones, y cuyo análisis a menudo entraña más interés del inicialmente previsto a partir de la explicación teórica, entendiendo claramente la utilidad de los modelos como herramienta predictiva del funcionamiento de los ecosistemas.

Model-Lab ha demostrado ser de gran utilidad en el ámbito académico, para facilitar la comprensión y la realización de prácticas por parte de los estudiantes de ciencias relacionadas con la ecología, disciplina ésta donde el modelado de ecosistemas se considera ya un conocimiento necesario. Dada la facilidad de manejo del software desarrollado, es adecuado para ser utilizado en el desarrollo de clases prácticas de modelado de sistemas impartidas en cursos avanzados de la licenciatura, puesto que aunque no es necesario tener experiencia previa en el campo de la informática, sí requiere un conocimiento de los conceptos básicos relacionados con la transferencia de energía a través de los ecosistemas..

Es de destacar que Model-lab puede encuadrarse como una herramienta no directiva (Scardamaglia, 1989), es decir, ofrece un entorno donde el alumno puede desarrollar sus conocimientos, experimentar y aprender a través de la práctica. Al tratarse de una herramienta de tipo exploratorio, permite al alumno profundizar por iniciativa propia en el estudio del funcionamiento de un modelo, realizar análisis de sensibilidad, y tratar de responder a preguntas del tipo "¿qué pasaría si...?" o tratar de dilucidar el por qué del comportamiento de un modelo. En este sentido Model-Lab ofrece la máxima libertad al usuario a la hora de plasmar sus conocimientos y probar sus hipótesis.

Como expansión futura, para aumentar la interdisciplinaridad y versatilidad de la herramienta, se está implementando la posibilidad de que el usuario pueda modificar la forma de los componentes, eligiéndola de una librería de formas previamente creada, permitiendo así que, según la disciplina o técnica de modelado en la que se pretenda usar Model-Lab, el usuario pueda usar su propia simbología en el diseño de modelos.

## 5. Agradecimientos.

Este software ha sido desarrollado como parte de un proyecto de innovación educativa financiado por el Vicerrectorado de Innovación Educativa de la Universidad de Vigo.

## 6. Bibliografía.

- Aracil, J.(1986). *Introducción a la dinámica de sistemas*. Ed. Alianza Editorial, Madrid.
- Evans, G. T y Fasham, M. J. R. (eds.) (1993). *Towards a Model of Ocean Biogeochemical Processes*. NATO ASI SERIES, Vol 1 10. Springer-Verlag, Berlin.
- Ewell, K. C. (1989). Learning to simulate ecological models on a microcomputer. *Ecological Modelling*. **47**: 7-17.
- Ferreira, J. G. (1995). ECOWIN – an object-oriented ecological model for aquatic ecosystems. *Ecological Modelling* . **79**: 21-34.
- Hall, A.S. y Day J.W. (1977) Systems and Models: Terms and basic principles. *Ecosystem modelling in theory and practice*. University press of Colorado.
- Hestenes, D. (1987). Towards a modeling theory of physics instruction. *American Journal of Physics*. **55**: 440-454.
- Odum, E. P. (1985). *Fundamentos de ecología*. Editorial Interamericana, México.
- Overton, W.S. (1977) A strategy of model construction. *Ecosystem modelling in theory and practice*. University press of Colorado.

- Quinn and others. (1996). The effects of group and task structure in an Instructional Simulation. *Proceedings of selected research and development presentations at 1996 National Convention of the Association for Educational Communications and Technology*.
- Scardamaglia, M., Bereiter, C., McLean, R.S., Swallow, J., & Woodruff, E. (1989). Computer supported intentional learning environments. *Journal of Educational Computing Research*. **5**: 51-68.
- Sequeira, R. A., Olson, R. L. y McKinion, J. M. (1997). Implementing generic, object-oriented models in biology. *Ecological Modelling*. **94**: 17-31.
- Sequeira, R. A., Sharpe, P. J. H., Stone, N. D., El-Zik, K. M. y Makela, M. E. (1991). Object-oriented simulation: plant growth and discrete organ to organ interactions. *Ecological Modelling*. **58**: 55-89.
- Silvert, W. (1992). BSIM, a Portable Package for Distributed Ecological Modelling. *8th ISEM Int. Conf. on Ecological Modelling*, Kiel, Germany.
- Silvert, W. (1992). Object Oriented Simulation Programming in Ecological Modelling. *8th ISEM Int. Conf. on Ecological Modelling*. Kiel, Germany.
- Sneiderman, B. (1992). Designing the User Interface. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.
- Teodoro, V.D. (1992). Learning with computer-based exploratory environments in science and mathematics. *NATO Advanced Study Institute on Educational and Psychological Foundations of Computer-Based Learning Environments*. Creta.