

Figura 3. Gráficas resultantes de la simulación.

de oxígeno en el hipolimnion se explica por el pequeño incremento en la cantidad de fósforo que se ha introducido para simular un hipotético caso de eutrofización natural.

La figura 3b muestra cómo al aumentar la entrada de fósforo al sistema la biomasa del fitoplancton se dispara y crece exponencialmente mientras que el oxígeno hipolimnético empieza a disminuir rápidamente.

V. Actividades

El modelo que hemos presentado es un ejemplo de las posibilidades que tiene el uso de una herramienta de este tipo en la enseñanza de las ciencias. La elaboración del modelo obliga a seguir los procesos que caracterizan el trabajo científico. Se parte de una interrogante, de un problema que se quiere estudiar. El hecho

de seleccionar las variables y establecer las relaciones entre ellas implica partir de una hipótesis de trabajo. Se recopila información que se incorpora al modelo y, una vez finalizado, se puede experimentar con los efectos que provoca la modificación de las distintas variables y parámetros, así como hacer predicciones sobre el comportamiento del sistema y comprobar si se cumplen o no. Lo ideal sería conseguir que por medio de esta herramienta, los alumnos pudieran llevar a cabo un proyecto de investigación que involucrara el proceso completo (estudiando sistemas reales como los que se han dado en Xochimilco o en el lago de Chapala), aunque tal vez sea demasiado ambicioso. Dependiendo del nivel del alumnado con el que nos encontremos podemos pedirles que trabajen con modelos ya elaborados o, a los grupos de alumnos especialmente motivados, darles los mínimos ingredientes y pedirles que realicen el trabajo completo.

Independientemente de la validez del modelo resultante, no cabe duda que el propio proceso de elaboración, al obligar a recopilar información y analizar la relación entre los elementos que constituyen el sistema objeto del estudio, permite aproximaciones interesantes al tema desde un punto de vista sistémico, enfoque que resulta especialmente adecuado cuando se trata del estudio de las cuestiones medioambientales.

VI. Bibliografía y mesografía

- Kirkwood, Craig W. College of Business, Arizona State University, *VensimPLE Quick Reference and Tutorial*. <http://www.public.asu.edu/~kirkwood/sysdyn/VenPLE.pdf>
- Lei L. & Choge N., *A Table Function Example*, Una guía para aprender a utilizar las "Lookup functions" en Vensim. <http://sysdyn.clexchange.org/sdep/Roadmaps/appendix/D-4865.pdf>
- Salas, H. & Martino, P. (1990). *Metodologías simplificadas para la evaluación de eutrofización en lagos cálidos tropicales*. Programa Regional CEPIS/HEP/OPS 1981-1990. Lima, CEPIS. Versión actualizada, enero 2001. <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsaca/e/fulltext/eutrof/eutrof.pdf>

Los profesores pueden copiar esta guía para su uso en clase. Para cualquier otro uso es necesaria la autorización por escrito del editor de la revista.

Abundancia que mata

La eutrofización



Por: Rosa María Catalá
Enero 2010

De: Cecilia Chapa Balcorta y Rosalía Guerrero Arenas
No. 134, p. 22

Maestros:

Esta guía se ha diseñado para que un artículo de cada número de *¿Cómo ves?* pueda trabajarse en clase con los alumnos, como un complemento a los programas de ciencias naturales y a los objetivos generales de estas disciplinas a nivel bachillerato. Esperamos que la información y las actividades propuestas sean un atractivo punto de partida o un novedoso "broche de oro" para dar un ingrediente de motivación adicional a sus cursos.

I. Relación con los temarios del Bachillerato UNAM

Esta guía y el artículo de referencia pueden utilizarla maestros de química, biología, computación y ciencias del ambiente; lo ideal sería hacerlo como un proyecto de investigación integrado. En esta ocasión he tomado como referencia el trabajo del profesor español Manuel García-Viñó Sánchez, publicado en Internet, que es un magnífico ejemplo de lo que se puede hacer por medio de las tecnologías de la información cuando los temas de estudio resultan muy complejos o consumen demasiado tiempo para llevarse a cabo experimentalmente.

II. Más información: un modelo de eutrofización cultural

En el artículo se presenta el modelo sobre la eutrofización cultural realizado como ejercicio final en el curso "El enfoque de sistemas en las Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente" de la Asociación para la Investigación en Educación Ambiental (INVESTEA). La elaboración de este modelo permite explorar las posibilidades del software de simulación de sistemas. No se pretende dar una explicación detallada del manejo del software Vensim, sino exponer el proceso seguido en la elaboración del modelo.

Planteamiento

La eutrofización es un buen ejemplo para ilustrar la complejidad de los problemas medioambientales, en los que existe un gran número de variables interrelacionadas. El mapa conceptual que se elaboró como punto de partida aparece en la figura 1. Para confeccionarlo se eligieron las variables más relevantes en el proceso de eutrofización provocado por el hombre, también conocido como eutrofización cultural. Las sustancias que contienen nitrógeno y fósforo (N y P) procedentes de las actividades humanas son las que normalmente actúan como factores limitantes del crecimiento de las poblaciones

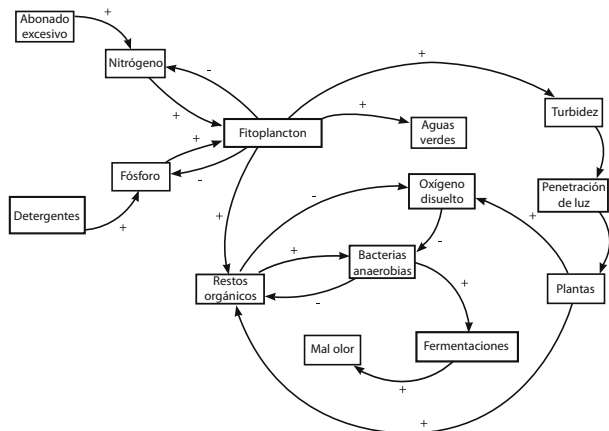


Figura 1. Un posible diagrama causal del proceso de eutrofización cultural.

del fitoplancton, provocando, entre los efectos más importantes: aumento de la turbidez; aguas de color verde; reducción de la cantidad de oxígeno disuelto y mal olor (como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica acumulada).

Es importante destacar que para realizar un modelo de simulación no es recomendable la construcción de un diagrama exhaustivo como punto de partida; una vez completado el proceso, se puede deducir con facilidad un diagrama más completo si se considera adecuado.

En un diagrama causal se señalan con flechas las relaciones entre las variables y se indica mediante un signo “+” o “-” si la relación es directa o inversa, respectivamente. Luego se pueden analizar las interacciones tipo bucle (*loop*) que se producen para analizar de forma cualitativa el comportamiento. Para pasar de dicho diagrama a un modelo hay que llevar todo a un mayor nivel de precisión, estableciendo relaciones cuantitativas entre las variables y descartando todas aquellas de las que no podamos conocer estas relaciones. De la infinidad de variables que pueden afectar el proceso de eutrofización, se debe elegir un conjunto que sea manejable y que, además, dé cuenta en lo fundamental del comportamiento del fenómeno en cuestión. Así, en la elaboración del modelo se decidió prescindir de los aportes de nitrógeno, ya que en la mayoría de los casos es el fósforo el principal factor limitante para el desarrollo del fitoplancton en los lagos. El incremento de los aportes de fósforo provoca

un crecimiento explosivo de las algas del fitoplancton y éste es responsable de los fenómenos observables en un lago eutrofizado.

Los elementos principales de un diagrama de flujo son los niveles (representados dentro de un recuadro), las entradas y salidas (flechas dobles con una válvula) y las variables auxiliares y los parámetros (valores constantes) que controlan dichos flujos de entrada y salida. Las nubes que suelen aparecer en este tipo de diagramas representan las fuentes o los

sumideros de donde proceden o a donde van a parar los flujos que llenan o vacían los niveles, respectivamente.

La parte más complicada en la elaboración del modelo es establecer las ecuaciones que gobiernan las relaciones entre las variables. Esta parte se convertiría en un tedioso trabajo que requeriría muchas horas si no fuese por ese acceso que tenemos a las universidades y otros centros de investigación del mundo entero a través de Internet y a la eficacia y rapidez de los buscadores actuales.

Si bien se pueden encontrar investigaciones en las que se presenten ecuaciones que muestran la relación matemática entre las variables que se quisieron relacionar en este trabajo, podría darse el caso de que hubiese diferencias notables o que su interpretación requiriese de conocimientos matemáticos avanzados que no eran del interés ni dominio del autor. Aquí es donde podemos descubrir el inestimable valor de las “*lookup functions*”. Vensim (<http://www.vensim.com/freedownload.html>) permite introducir la relación entre dos variables mediante una gráfica y, no sólo eso, también modificar dinámicamente la gráfica cuando se ejecuta el modelo y ver qué efectos provocan estos cambios en las otras variables.

III. Descripción del modelo

El modelo (figura 2) está concebido como una cascada de acontecimientos que ocurren a consecuencia del excesivo aporte de nutrientes a un lago y que se traducen en una serie de cambios fácilmente observables. El incremento del

aporte de fósforo se traduce en un crecimiento descontrolado del fitoplancton. El aumento de la densidad de este último es responsable de la coloración verdosa de las aguas y provoca un aumento de turbidez que impide la entrada de luz a las zonas profundas. A su vez, el incremento de la biomasa de fitoplancton provoca un aumento en la cantidad de materia orgánica en el fondo como producto de la muerte de microorganismos. La cantidad de oxígeno disuelto en la zona profunda disminuye como consecuencia de la reducción de la tasa fotosintética al reducirse la cantidad de luz que penetra y por el consumo de oxígeno que se produce en la descomposición de la gran cantidad de materia orgánica acumulada en el fondo. Según va decreciendo la cantidad de oxígeno disuelto en la zona profunda empiezan a predominar los procesos de descomposición anaerobia, que son los responsables de los malos olores.

La figura 2 muestra sólo el diagrama de flujo del modelo, pero no las relaciones cuantitativas entre las variables que van a permitir la simulación. Se puede acceder a esta información pulsando sobre cada variable después de haber seleccionado la herramienta “*Equations*” en la barra de herramientas de esquema, pero resulta incómodo y lento consultar una por una. Para revisar el conjunto de ecuaciones que constituyen el modelo es mucho mejor utilizar la herramienta “*Doc*” de la barra de herramientas de análisis. Así se obtiene un listado completo de las variables dispuestas en orden alfabético, la expresión matemática que las controla, las

unidades empleadas en cada una y el comentario que haya querido introducir el autor.

IV. La simulación

Una vez que se han conectado las variables y establecido las relaciones entre ellas ejecuta la simulación del modelo. Probablemente se requieran algunos reajustes en los valores iniciales de las variables, mismos que se pueden realizar por medio de la opción “*Automatically simulate on change*”. Ésta aparece debajo de cada variable, con una barra que nos permite modificar el valor de la misma y una gráfica en miniatura en la que podemos observar inmediatamente las consecuencias de estos cambios. Los recuadros que en la simulación aparecen destacados en azul corresponden a las “*lookup functions*” y si pulsamos sobre ellas aparecerá una ventana en la que se muestra la gráfica que controla la variable a la que apunta esa función y que permite también modificarla para ver qué efecto tiene sobre las variables del modelo.

La figura 3 muestra parte del gráfico de salida que resulta de la simulación del modelo. Es muy gratificante observar que el modelo se comporta como esperábamos y que, por lo tanto, puede servir para explicar el fenómeno que es objeto de nuestro estudio.

Como se puede apreciar en la figura 3a, cuando no hay aporte de fósforo procedente de la contaminación, la biomasa del fitoplancton se mantiene prácticamente constante a lo largo del tiempo. El ligero aumento de la biomasa y el descenso, también ligero, de la cantidad

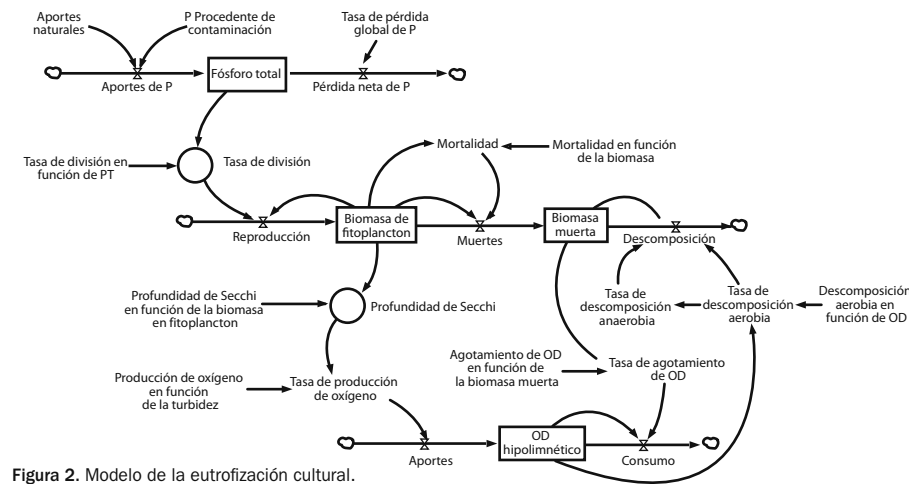


Figura 2. Modelo de la eutrofización cultural.