

EXPERIENCIAS E IDEAS PARA EL AULA

LOS PROGRAMAS DE ORDENADOR DEFORMACIÓN Y MALLA COMO RECURSO PARA EL APRENDIZAJE DE LA GEOLOGÍA

The Deformación & Malla computer programs as a resource for the geology learning

José Manuel Vacas, José María Chamoso y Carmen Urones (*)

RESUMEN

Con este artículo se pretenden presentar los programas Deformación y Malla como recurso para la enseñanza de la Geología para nivel universitario y proporcionar algunas sugerencias de uso. Su objetivo es facilitar la realización de simulaciones con ordenador de deformaciones de estructuras geológicas. Para ello se pueden introducir parámetros geológicos que permiten simular procesos diferentes, desde simples a complejos y desde pequeña escala a una de centenares de kilómetros, y donde la gravedad juega un papel fundamental. Las simulaciones con ordenador pueden ser un recurso fundamental para la enseñanza de las Ciencias de la Tierra ya que pueden ayudar a entender procesos complejos de forma sencilla gracias a la capacidad gráfica de los ordenadores.

ABSTRACT

This article claims to present the programs Deformación & Malla as a resource for the university geology teaching and provides some suggestions for its use. Its objective is to facilitate the realization of computer simulations of geological structures deformations. For it, it is possible to introduce geological parameters that allow simulating different processes, from simple to complexes and from small scale to one of hundreds of kilometers, and where the gravity plays a fundamental role. The computer simulations can be a fundamental resource for the Earth Science teaching because, thanks to the graphical capacity of the computers, can help to understand the most complex processes in easy way.

Palabras clave: simulación; geología; tecnología; aprendizaje significativo.

Keywords: simulation; geology; technology; meaningful learning.

INTRODUCCIÓN

La adaptación de los planes de estudio de educación superior al proceso de convergencia europea está creando expectativas entre el profesorado universitario en España. El sistema de créditos ECTS (European Credit Transfer System), y la formación en competencias debe favorecer una metodología de enseñanza universitaria que potencie la autonomía y el aprendizaje del estudiante. Por ello están surgiendo iniciativas y propuestas docentes innovadoras donde el papel del profesor universitario no sea únicamente de transmisión de conocimiento sino que también tendrá que “enseñar a aprender”. Con ese objetivo se presentan los programas *Deformación y Malla* (versión 2009), que se describen a continuación, y que pueden ser un recurso para conseguir que el alumno universitario de la Licenciatura de Geología “aprenda a aprender” y el del Máster de Formación de Profesores de Secundaria “aprenda a enseñar”.

La enseñanza de la Geología y, en particular la Geodinámica Interna, no debería hacerse desvinculada de la Tecnología Informática. Las posibilida-

des que ofrece la tecnología a la sociedad también se deben aprovechar por el profesor universitario para que los estudiantes mejoren su aprendizaje y lo hagan de manera más significativa y rápida. La interacción que el ordenador permite con el usuario puede ser clave para alcanzar las competencias que deberán lograr los alumnos durante su formación universitaria (Vacas Peña, 2000).

LAS SIMULACIONES

Las simulaciones con ordenador permiten reproducir procesos que, como en el caso de la deformación geológica, pueden tardar millones de años en realizarse y a escalas que pueden ser kilométricas (Snir *et al.*, 1995). Tienen ciertas limitaciones o simplificaciones pero también la ventaja de que permiten que el alumno actúe durante su desarrollo. Modificando parámetros se posibilita estudiar multitud de aspectos, generalmente aquellos que se consideren importantes en cada simulación. Como el alumno participa de forma activa (Andaloro *et al.*, 1991), las simulaciones tienen un alto valor

(*) Departamento de Didáctica de la Matemática y Didáctica de las Ciencias Experimentales. Facultad de Educación. Paseo de Canalejas 169. 37008 Salamanca. E-mails: jmv@usal.es, jchamoso@usal.es, uronesc@usal.es

educativo porque permiten disminuir la capacidad de abstracción necesaria para entender qué se simula (Vacas y Martínez, 2003), lo que se ve favorecido por el hecho de que las acciones simuladas sean más simples que las reales y desprovistas de elementos parásitos (Delval, 1986).

Existen recomendaciones favorables sobre el uso de las simulaciones científicas, tanto analógicas como digitales, en la enseñanza desde los años 80 (Mills et al., 1985; Correig i Blanchar, 1988; Crookall, 1988; Morcillo y Anguita, 1988; Duran et al., 1990; Grimes y Wiley, 1990; Goodyear et al., 1991; Brant et al., 1991; Bacon, 1992; Faryniarz y Lockwood, 1992; Gorsky y Finegold, 1992; López y Oliver, 1992; Ehrlich et al., 1993; Yalcinalp et al., 1995; Castelló, 1995; Raghavan y Glaser, 1995; Schank y Cleary, 1995; Snir et al., 1995; Veenman y Elshout, 1995; Jackson et al., 1996; Martínez Sánchez, 1996; Milheim, 1996; Bedford y Fowler, 1996; Bell y Fogler, 1996; Zamarró et al., 1997; Windschitl y Andre, 1998; De Jong y Van Joolingen, 1998; Gallego y Alonso, 1999; Pontes et al., 2001; Esquembre et al., 2004; Sierra, 2005; Vreman y Jong, 2006; Lee et al., 2008; Robb y Schwartz, 2009). En concreto, por ejemplo, las simulaciones proporcionan un ambiente de aprendizaje que permite la exploración (Laurillard, 1981), ofrecen un acceso directo a la comprobación de las preguntas que plantean los estudiantes (Thomas & Neilson, 1995), reducen el tiempo y costes del experimento (García y Vacas, 1990), facilitan la realización de múltiples experimentos (Snir et al., 1995) y se adaptan al nivel cognitivo del alumno (De Jong y Njoo, 1992). La posibilidad de presentar gráficamente los resultados también favorece el aprendizaje ya que una visualización apropiada puede mejorar la percepción de los objetos representados (Kali y Orion, 1997) y su comprensión conceptual (Linn y Hsi, 2000). El aumento del rendimiento académico (Oliver y López, 1997).

Sin embargo, hay que tener en cuenta que el ordenador no debe separar al alumno de la realidad natural por lo que se deben mantener las actividades de campo y laboratorio necesarias para su formación pero, una vez que el alumno las conoce, el uso del ordenador puede aumentar notablemente las posibilidades de una experiencia de simulación. Esto es aún más evidente en el caso de simulaciones de fenómenos naturales no reproducibles a escala de laboratorio (García y Vacas, 1990).

NIVEL EDUCATIVO DE LOS PROGRAMAS DEFORMACIÓN Y MALLA.

Ambos programas han sido desarrollados fundamentalmente para la investigación en Geología Estructural, pero dada su facilidad de uso pueden ser un recurso educativo ya que en muchas disciplinas científicas, y en las nuestras también debería ser, el modelado matemático y la simulación mediante ordenador en la enseñanza son hoy en día una práctica común.

El nivel educativo en el que se le puede extraer todo su potencial es el universitario. El uso de las simu-

laciones y de los programas programa, en la Universidad, puede permitir alcanzar los siguientes objetivos:

- Utilizar el ordenador en la enseñanza de la geología estructural.
- Realizar simulaciones que propicien un aprendizaje activo y que motive a los alumnos.
- Favorecer una enseñanza más individualizada al permitir los programas que cada alumno avance a su ritmo durante el desarrollo de las simulaciones.
- Dar un enfoque constructivista de los procesos de enseñanza-aprendizaje gracias a la simulación geológica.
- Integrar la teoría con la práctica al poder aplicar el conocimiento adquirido a diferentes situaciones simuladas.
- Adquirir la capacidad de discutir los conceptos fundamentales de las simulaciones geológicas.
- Construir modelos geológicos e investigar o experimenten sobre ellos.
- Manipular los modelos para poder obtener unos resultados concretos.
- Introducir el uso de otros programas (hoja de cálculo), para el tratamiento de los datos obtenidos en las simulaciones.

FUNDAMENTACIÓN MATEMÁTICA DE LOS PROGRAMAS DEFORMACIÓN Y MALLA

La deformación geológica es un proceso que se puede simular mediante elementos finitos. El proceso consiste en dividir una estructura geológica (Figura 1) en piezas, denominadas elementos y definidas por las coordenadas de sus nodos, y analizar matemáticamente el comportamiento de cada uno de los elementos y combinarlos juntos. Al modelo se le pueden añadir fuerzas externas e internas o desplazamientos y se obtienen resultados en forma de esfuerzos y desplazamientos (deformaciones) de la estructura teniendo en cuenta las condiciones de contorno.

Las rutinas de elementos finitos se basan principalmente en Zienkiewicz (1977) y Zienkiewicz y Taylor (1994), y los cálculos de esfuerzos y deformaciones en Ramsay (1967) y Ramsay y Huber (1983). La reología está basada en las ecuaciones de elasticidad, modificadas para poder simular un comportamiento viscoso lineal o exponencial. Los resultados se obtienen de forma gráfica (Figuras 2 y 4) y representan la deformación en diferentes esta-

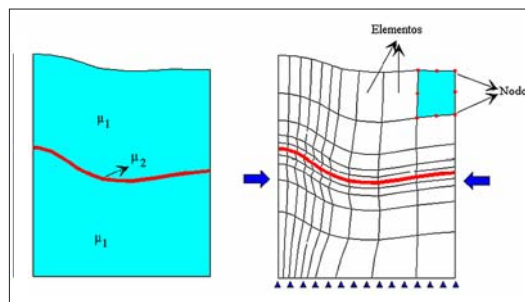


Fig. 1. La malla de elementos finitos está formada por elementos de 8 nodos. El estrato de color negro es más viscoso que la matriz ($\mu_2 > \mu_1$).



Fig. 2. Modelo de grandes dimensiones (una zona de subducción), donde la gravedad es un parámetro importante.

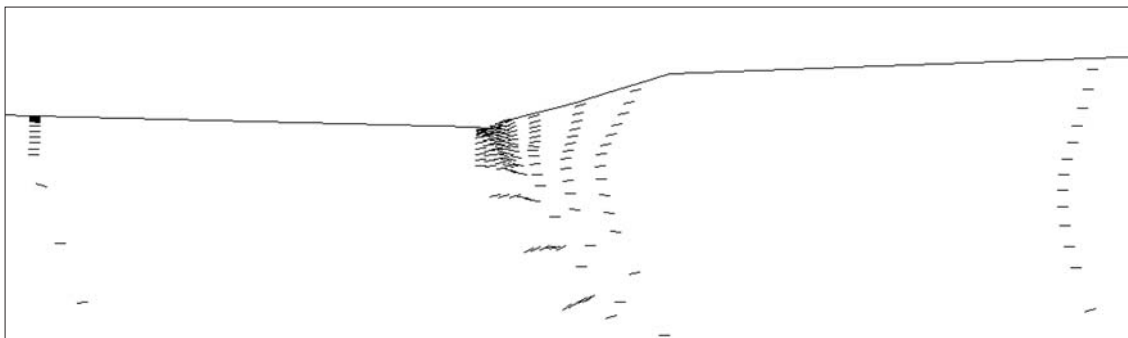


Fig. 3. Detalle del modelo anterior donde se muestra la orientación del esfuerzo principal.

dos junto con los valores y orientaciones tanto del esfuerzo (Figuras 3 y 5) como de la deformación finita (Figura 6).

Los programas *Deformación* y *Malla* permiten simular la deformación de cualquier estructura que se pueda diseñar teniendo en cuenta la influencia de la gravedad, con lo que el tamaño del modelo es un parámetro fundamental. Son una versión avanzada y optimizada del programa *Folding&g* y están basados en la misma fundamentación matemática (ver Vacas y Martínez, 2004). Por lo que sabemos *Folding&g* fue el primer programa diseñado para modelar pliegues de diferente tamaño, desde milimétricos a kilométricos para los que la gravedad es un parámetro esencial (Vacas y Martínez, 2003, 2004).

ESTRUCTURA DE LOS PROGRAMAS *DEFORMACIÓN* Y *MALLA*

El programa ha sido realizado en Pascal, compilado en Delphi y funciona con los sistemas operativos Windows XP, Vista y Windows 7. Se estructura

en los ficheros *Deformación.exe* y *Malla.exe* (Figura 7), que están disponibles en Internet junto a su forma de uso, por lo que a continuación únicamente se explicará su estructura general y se hará hincapié en su potencial. Cada uno de ellos incluye numerosos menús, una caja de herramientas, varias cajas de diálogo y diversas ventanas de información que permiten una sencilla forma de introducir los datos y parámetros del modelo y funcionar en uno o más ciclos de acortamiento durante los cuales se puede visualizar el proceso en diferentes ventanas.

PROGRAMA *DEFORMACION.EXE*

Cuenta con un menú principal que tiene cinco submenús: Fichero, Parámetros, Gráficos, Cálculos. Cada uno de ellos tiene, a su vez, varias opciones:

- a) **Fichero:** Permite salvar y exportar modelos en diferente estado de evolución y abrir e importar modelos existentes. Tiene las siguientes opciones:
 - *Cargar:* Permite mostrar y continuar una simulación previamente salvada.

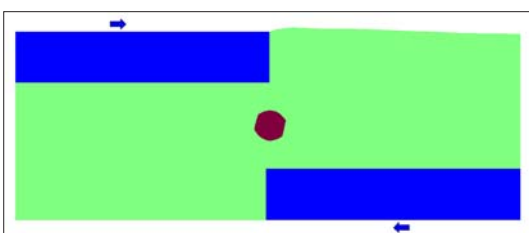


Fig. 4. Pequeño modelo en el que se muestra la rotación de un granate.

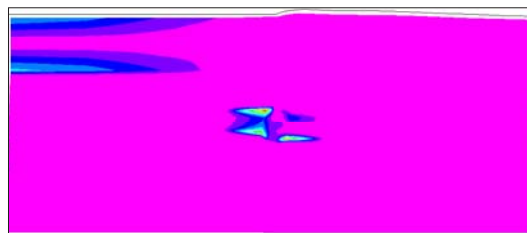


Fig. 5. El modelo de la figura 4 en el que se muestra el valor del esfuerzo diferencial.

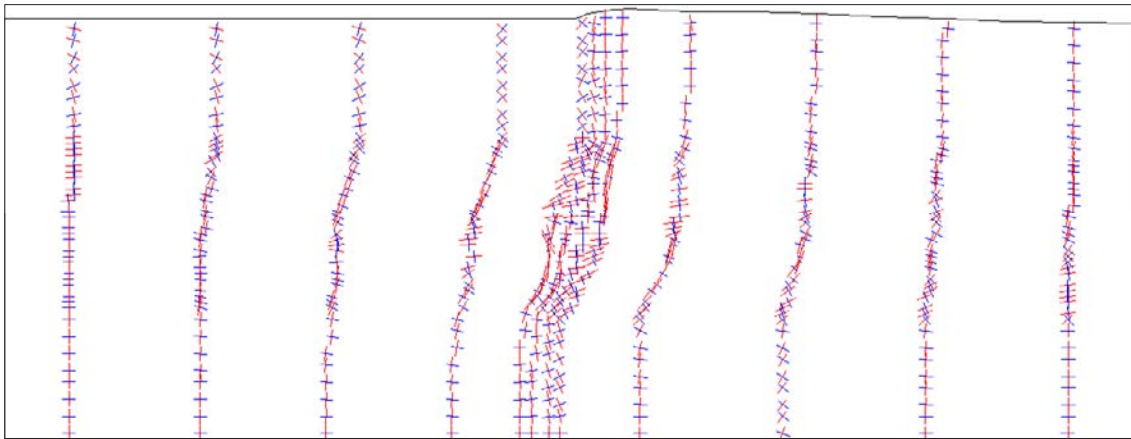


Fig. 6. El modelo de la figura 4 en el que se muestra el valor de los ejes principales de la deformación.

- **Salvar:** Permite crear un fichero con el modelo actual, sus parámetros, las coordenadas de los elementos finitos y el estado de acortamiento.
 - **Importar parámetros y la red de Malla:** Permite cargar un modelo que se haya creado con el programa Malla.
 - **Exportar la red al programa Malla:** Permite guardar la red del modelo que se esté visualizando para poder utilizarse con el programa Malla.
 - **Imprimir:** Permite imprimir el modelo actual.
 - **Salir:** Permite cerrar y salir del programa.
 - **Programa Plegamiento:** Permite mostrar información sobre el programa, versión, autor y dirección de correo electrónico.
 - Cargar y Salvar pueden ser activados directamente desde la barra de herramientas.
- b) **Parámetros:** Permite introducir los Parámetros generales para lo cual se abre una ventana de diálogo con múltiples opciones como: acortamiento para cada intervalo (en %), velocidad de deformación (en s-1), confinamiento del modelo en su parte

superior (la parte inferior y los lados están siempre confinados), salvar gráficos, acortar uno o ambos lados (o ninguno), posibilidad de “plane strain” o “plane stress”, diversas formas de integración (2x2 y 3x3), gravedad y viscosidad lineal o exponencial. La velocidad de deformación puede introducirse en formato exponencial para lo que se recomiendan valores realistas ($1E-7$ a $1E-15$ s⁻¹). Si se introduce la gravedad en modelos de muchos kilómetros, el intervalo de acortamiento debe ser inferior a 0.1% para evitar el colapso de la estructura.

c) **Gráficos:** Incluye principalmente opciones gráficas algunas de las cuales se pueden ejecutar desde la barra de herramientas:

- **Elementos:** Permite dibujar los elementos finitos del modelo.
- **Nodos:** Permite dibujar los elementos con sus nodos.
- **Colores:** Permite dibujar diferentes capas de colores asignados en parámetros.
- **Centrar:** Permite centrar el modelo en la pantalla ajustándose al tamaño de la misma (la misma función también se realiza desde un icono con cuatro flechas convergentes).
- **Salvar gráfico BMP:** Permite crear un fichero con el gráfico actual.
- **Cargar gráfico BMP:** Permite abrir un fichero gráfico previamente guardado.
- **Carrusel BMP:** Permite secuenciar los sucesivos estados de un modelo creando un efecto animado, siempre que se hayan salvado en formato BMP.
- **Copiar:** Permite copiar el gráfico actual en el portapapeles para que se pueda pegar en otra aplicación.

Además, en la barra de herramientas se incluyen dos iconos que permiten agrandar o reducir el modelo mostrado.

d) **Cálculos:** Permite poner en marcha el programa y tiene varias opciones para mostrar los ejes principales, los esfuerzos y las deformaciones:

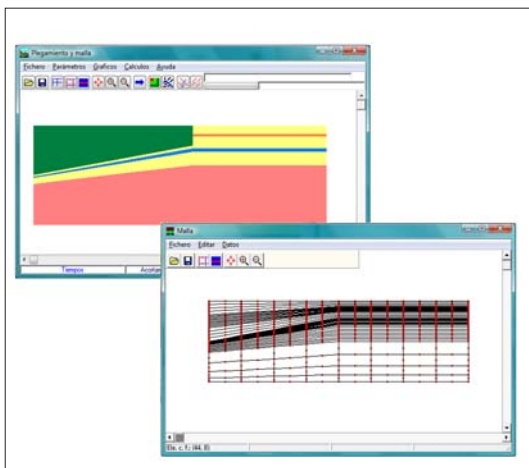


Fig. 7. El modelo generado en el programa Malla es exportado al programa Plegamiento.

- *Un ciclo*: Permite iniciar los cálculos de un único proceso de acortamiento (es una opción equivalente a la de la flecha horizontal de la barra de herramientas).
- *Más ciclos*: Permite ejecutar varios ciclos de acortamiento.
- *Ejes del esfuerzo máximo*: Permite calcular y mostrar la orientación del esfuerzo principal máximo durante el último acortamiento.
- *Valores del esfuerzo*: Permite mostrar un valor aproximado del estado del esfuerzo en cada elemento durante el último acortamiento utilizando colores. Pueden ser visualizados como esfuerzo diferencial $(\sigma_1 - \sigma_2)$, esfuerzo medio $(\sigma_1 + \sigma_2)/2$ y esfuerzo máximo de cizalla $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$.
- *Contornos del esfuerzo*: Permite mostrar los mismos datos que la opción anterior pero en forma de contornos.
- *Ejes de la deformación máxima*: Permite calcular y mostrar la orientación de la deformación máxima finita.
- *Ejes principales de la deformación*: Permite mostrar la deformación máxima y mínima, su orientación y el valor relativo.
- *Valores de la deformación*: Permite mostrar el valor medio de la deformación acumulada para cada elemento hasta el estado actual del modelo.
- *Contornos de la deformación*: Permite mostrar un mapa de contornos de la deformación finita del modelo.

A algunas de las opciones anteriores se tiene acceso desde la barra de herramientas.

PROGRAMA MALLA. EXE

Cuenta con un menú principal que tiene tres submenús: Fichero, Editar y Datos. Cada uno de ellos tiene, a su vez, varias opciones (Figura 8):

a) **Fichero**: Permite salvar, cargar, importar y exportar parámetros y mallas con las siguientes opciones:

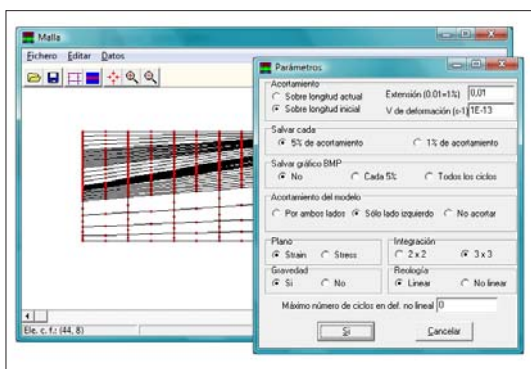


Fig. 8. Se muestra la ventana principal del programa Malla donde aparece el menú principal y otra ventana secundaria con los parámetros generales de un modelo.

- *Cargar parámetros iniciales*: Permite cargar los parámetros iniciales del programa.
- *Cargar malla*: Permite cargar una malla previamente creada.
- *Salvar malla*: Permite salvar la malla que se tenga en el programa.
- *Cargar y editar gráficamente coordenadas iniciales*: Permite cargar la malla previamente salvada sin parámetros y editarla gráficamente sin más que pinchar y arrastrar con el botón derecho del ratón.
- *Salvar coordenadas iniciales*: Permite salvar las coordenadas iniciales que se hayan introducido.
- *Importar de Deformación*: Permite importar un modelo del programa *Deformación* si, por ejemplo, se considera necesaria una densificación de elementos en toda la malla o una zona de la misma. Una vez cargado advierte que hay que salvar las coordenadas. Posteriormente se puede volver a exportar al programa *Deformación*.
- *Programa Malla*: Permite mostrar información sobre el programa, versión, autor y dirección de correo electrónico.

b) **Editar**: Permite:

- *Deshacer*: Permite deshacer los últimos tres desplazamientos de nodos que se hayan realizado con el botón derecho del ratón.
- *Copiar*: Permite copiar el gráfico que se encuentre en pantalla.

c) **Datos**: Permite introducir los parámetros de la simulación y la malla que se quiera crear o modificar con las siguientes opciones:

- *Introducir parámetros iniciales*: Permite introducir datos en el sistema cgs, cm, g, s y sus unidades derivadas en unas cajas de diálogo que se pueden abrir. Los valores calculados por el programa están en el mismo sistema (ejem. dina cm⁻² ; 1 Pa = 10 dina cm⁻²). Hay que tener en cuenta que las propiedades se introducen por bloques. Algunos parámetros destacados que se pueden introducir son:

- **Coeficiente V**: Es el equivalente a la relación de Poisson para medios viscosos. Para materiales incompresibles toma el valor de 0.5 (es aconsejable poner 0.49995 para evitar divisiones entre cero que generarían error).

- **Viscosidad**: Se usa sólo para casos de deformación lineal pero es necesaria cuando se introduce la gravedad.

- **Parámetros no lineales**: Incluye cuatro parámetros:

- n como exponente del esfuerzo diferencial σ
- A como constante característica de los materiales.
- Q como energía de activación del “creep”.

- T como temperatura absoluta.

Estos valores se pueden encontrar para rocas naturales en Heard y Carter (1968), Heard y Raleigh (1972), Parrish (1973) y Kuszniir y Park (1986, 1987).

- *Crear nueva malla*: Permite crear una malla desde el principio introduciendo los datos en sucesivas cajas de diálogo.
- *Modificar malla*: Permite modificar una malla previamente creada como en el caso anterior (se pueden modificar los parámetros).
- *Generar malla 1x2*: Permite generar un modelo con un número de filas doble que el inicial y con los mismos parámetros.
- *Generar malla 2x1*: Permite generar un modelo con un número de columnas doble que el inicial y con los mismos parámetros.
- *Generar malla 2x2*: Permite generar un modelo con un número de columnas y filas doble que el inicial y con los mismos parámetros.
- *Generar malla 4x4*: Permite generar un modelo con un número de columnas y filas cuatro veces el inicial y con los mismos parámetros.
- *Generar malla nxn*: Permite generar un modelo con un número de columnas y filas definido por el usuario y con los mismos parámetros.

USO DE LOS PROGRAMAS *DEFORMACION Y MALLA*

La deformación natural es muy difícil de simular experimentalmente en el laboratorio debido, principalmente, a la resistencia de las rocas, el tamaño de muchas estructuras y la lentitud natural del proceso que puede ser de miles o millones de años. Por ello las simulaciones con ordenador constituyen un método que hace posible ofrecer este proceso a los estudiantes dinámicamente. De esa manera participarán activamente en la construcción del conocimiento dentro del marco del EEES (Espacio Europeo de Educación Superior). Algunas formas de utilización como recurso pueden ser:

- La clase expositiva para, por ejemplo, motivar a los alumnos, aclarar conceptos y, sobre todo, disminuir la capacidad de abstracción que es necesaria para entender un proceso geológico complejo.
- Cualquier metodología activa para la enseñanza de las ciencias como, por ejemplo, realizar una investigación dirigida con una serie de preguntas sugerentes o avanzada donde sea necesario utilizar alguna o todas las fases del método científico como formular hipótesis, diseñar experimentos, observar resultados y formular nuevas hipótesis y experimentos. Un ejemplo podría ser abordar el problema: ¿El tamaño y separación de los diapiros estará relacionado con la potencia de las capas de baja densidad? Para investigarlo sería necesario identificar y controlar las variables que inter-

vienen, estudiar las tablas de datos y las representaciones gráficas y escribir los avances en un informe científico (Anexo I).

Algunas de las capacidades, competencias y destrezas generales que se podrían trabajar con el simulador *Deformación y Malla* son:

1. Adquirir una visión en cuatro dimensiones de los procesos espacio-temporales de la Tierra.
2. Recoger, almacenar y analizar datos utilizando las técnicas de campo y laboratorio adecuadas.
3. Integrar datos de campo y de laboratorio con otros teóricos siguiendo una secuencia de observación, reconocimiento, síntesis y modelización.
4. Capacitar para recoger e integrar diversos tipos de datos y observaciones con el fin de comprobar hipótesis geológicas.
5. Capacitar para analizar, sintetizar y resumir información geológica de manera crítica.
6. Capacitar para aplicar conocimientos para abordar problemas usuales o desconocidos.
7. Planificar, organizar, conducir y exponer investigaciones que incluyan el uso de datos secundarios.
8. Preparar, procesar, interpretar y presentar datos usando las técnicas cualitativas y cuantitativas adecuadas, así como los programas informáticos apropiados.

En los contenidos formativos comunes, en concreto en la materia *Geología interna* que se imparte en la mayor parte de los programas universitarios de Licenciatura o Grado de Geología, quizás sea la mejor oportunidad para utilizarla. Entre otros, se podrían trabajar los siguientes contenidos:

1. Análisis del esfuerzo.
2. Análisis de la deformación.
3. Respuesta de las rocas frente al esfuerzo.
4. Pliegues.
5. Foliaciones.

Para la clasificación de pliegues se puede utilizar el programa *Isogons* (Vacas, 2001).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por el Ministerio de Educación y Ciencia de España, SEJ2007-61428/EDUC, y por la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León (España), SA116A07.

Nota: Los programas citados en este trabajo se pueden descargar de la página de Internet <http://web.usal.es/jmvp/>

BIBLIOGRAFÍA

- Andaloro G., Donzelli V. y Sperandeo-Mineo R.M. (1991). Modelling in physics teaching: role of computer simulation. *International Journal of Science Education*, 13(3), 43-254.
- Bacon, R.A. (1992). The use of computers in the teaching of Physics. *Computers & Education*, 19(1), 57-66.
- Bedford, A. y Fowler, W. (1996). *Estática y Dinámica. Simulaciones interactivas*. Buenos Aires: Addison-Wesley.

- Bell, J.T. y Fogler, H. S. (1996). Vicher: A Virtual Reality Based Educational Module for Chemical Reaction Engineering. *Computer Applications in Engineering Education*, 4(4), 285-296.
- Brant, G., Hooper, E. y Sugrue, B. (1991). Which comes first the simulation or the lecture? *Journal of Educational Computing Research*, 7, 469-481.
- Castelló, A. (1995). Inteligencia artificial en entornos instruccionales. En Genovard Rosselló, Beltrán Llera y Rivas Martínez (Eds.), "*Psicología de la instrucción III. Nuevas Perspectivas*". Madrid: Síntesis.
- Correig i Blanchar, T.M. (1988). Recursos didácticos de un modelo para explicar la formación de pliegues y fallas. V *Simposio sobre Enseñanza de la Geología*, 241-247.
- Crookall, D. (1988). Computerized simulation: An overview. *Social Science Computer Review*, 1, 1-11.
- De Jong, T., y Njoo, M. (1992). Learning and instruction with computer simulations: learning processes involved. In E. de Corte, M. Linn, H. Mandl, & L. Verschaffel (Eds.) *Computer-based learning environments and problem solving* (NATO ASI series F: Computer and Systems Series) (pp. 411-429). Berlin: Springer.
- De Jong, T. y Van Joolingen, V. (1998). El entorno SMISLE: diseño y aprendizaje con entornos integrados de simulación. En Vizcarro y León (comp.), *Nuevas Tecnologías para el aprendizaje*. Madrid: Ediciones Pirámide.
- Delval, J. (1986). *Niños y máquinas. Los ordenadores y la educación*. Madrid: Alianza Editorial.
- Duran, H., Gold, G., Colomer, M. (1990). Recursos didácticos para el estudio del plegamiento de las rocas: *Experimentación, análisis de gráficas y construcción de modelos*. VI Simposio sobre la enseñanza de la Geología, 171-180.
- Ehrlich, R., Dworzecka, A., Mac Donald, W. y Tusinsky, J. (1993). Text materials to accompany simulations for the CUPS-Project. *Computer in Physics*, 7(5), 508-518.
- Esquembre, F., Martin, E., Christian, W., y Belloni, M. (2004). *Fislets: Enseñanza de la Física con Material Interactivo*. Madrid: Pearson - Prentice Hall.
- Faryniarz, J.V. y Lockwood, L.G. (1992). Effectiveness of microcomputer simulations in stimulating environmental problem solving by community college students. *Journal of Research in Science Teaching*, 29, 453-470.
- Gallego, D. y Alonso, C. (1999). *El ordenador como recurso didáctico*. Madrid: UNED.
- García, I. y Vacas, J.M. (1990). Actividades de Física y Biología con ordenador. *Aula*, 3, 135-142.
- Goodyear, P., Njoo, M., Hijne, H. y van Berkum, J.J.A. (1991). Learning processes, learner attributes and simulations. *Education & Computing*, 6, 263-304.
- Gorsky, P. y Finegold, M. (1992). Using computer simulations to restructure student's conceptions of force. *Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching*, 11, 163-178.
- Grimes, P.W. y Wiley, T.E. (1990) The effectiveness of microcomputer simulations in the principles of economics course. *Computers & Education*, 14, 81-86.
- Heard, H.C. y Carter, N.L. (1968). Experimentally induced 'natural' intragranular flow in quartz and quartzite. *American Journal of Science* 266, 1-42.
- Heard, H.C. y Raleigh, C.B. (1972). Steady-state flow in marble at 500° to 800° C. *Geological Society of America Bulletin* 83, 935-956.
- Jackson, S.L., Stratford, S.J., Krajcik, J. y Soloway, E. (1996). A learner-centred tool for students building models. *Communications of the ACM*, 39, 48-49.
- Kali, Y., y Orion, N. (1997). Software for assisting high school students in the spatial perception of geological structures. *Journal of Geoscience Education* 45, 10-21.
- Kuszniir, N.J. y Park, R.G. (1986). Continental lithosphere strength: the critical role of lower crustal deformation. En J.B. Dawson, D.A. Carswell, J. Hall y K.H. Wedepohl (eds.), *The Nature of the Lower Continental Crust, Geological Society Special Publications*, 24, 79-93.
- Kuszniir, N.J. y Park, R.G. (1987). The extensional strength of the continental lithosphere: its dependence on geothermal gradient, and crustal composition and thickness. En M.P. Coward, J.F. Dewey y P.L. Hancock (eds.) *Continental Extensional Tectonics, Geological Society Special Publications* 28, 35-52.
- Laurillard, D.M. (1981). The promotion of learning using CAL. En *Computer Simulation in University Teaching*. Amsterdam: Wildenberg D.
- Lee, Y., Guo, Y. & Ho, H. (2008). *Explore Effective Use of Computer Simulations for Physics Education*. Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching, 27(4), 443-466. Chesapeake, VA: AACE.
- Linn, M.C., y Hsi, S. (2000). *Computers, Teachers, Peers: Science Learning Partners*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- López Naval, M. y Oliver, C., (1992). Tectónica de placas con ordenador aplicada a la E.S.O. VII *simposio sobre enseñanza de la geología*, 431-438.
- Martínez Sánchez, F. (1996). La enseñanza ante los nuevos canales de comunicación. En Tejedor, F. y A. García Valcárcel, *Perspectivas de las Nuevas Tecnologías en la Educación*. Madrid: Narcea.
- Milheim, W.D. (1996). Interactivity and computer-based instruction. *Journal Educational Technology Systems*, 24, 225-233.
- Mills, T.J., Amend, J. y Seibert, D. (1985). An assessment of water resource education for teachers using interactive computer simulation. *Journal of Environmental Education*, 16(4), 25-29.
- Morcillo, J.G. y Anguita, F. (1988). Un programa de simulación como introducción a la geología aplicada, en primero de geológicas. V *Simposio sobre Enseñanza de la Geología*, 91-96.
- Oliver, C. y López, M. (1997). El ordenador como herramienta auxiliar en el laboratorio de geología en educación secundaria. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 1997 (5.2), 159-164.
- Parrish, D.K. (1973). A nonlinear finite element fold model. *American Journal of Science* 273, 318-334.
- Pontes, A., Martínez, M.P. y Climent, M.S. (2001). Utilización didáctica de programas de simulación para el aprendizaje de técnicas de laboratorio en ciencias experimentales. *Anales de Química*. 97(3), 44-54.
- Raghavan, K. y Glaser, R. (1995) Model-Based analysis and reasoning in science: the MARS curriculum. *Science Education*, 79, 37-61.
- Ramsay, J.G. (1967). *Folding and fracturing of rocks*. New York: McGraw-Hill.
- Ramsay, J.G. y Huber, M.I. (1983). *The techniques of modern structural geology. Vol. 1: strain analysis*. London: Academic Press.
- Robb Lindgren y Schwartz, D.L. (2009). *Spatial Learning and Computer Simulations in Science. International Journal of Science Education*, 31, 419 - 438.

Schank, R.C. y Cleary, C. (1995). *Engines for Education*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Sierra, J.L. (2005). *Estudio de la influencia de un entorno de simulación por ordenador en el aprendizaje por investigación de la Física en Bachillerato*. Centro de Investigación y documentación Educativa. N° 167 de la colección Investigación. Ministerio de Educación y Ciencia.

Snir, J., Smith, C. y Grosslight, L. (1995). Conceptually enhanced simulations: a computer tool for science teaching. In D. N. Perkins, J. L. Schwartz, M. M. West y M. S. Wiske (eds) *Software Goes to School: Teaching for Understanding with New Technologies*. New York, NY: Oxford University Press.

Thomas, R. y Neilson, I. (1995). Harnessing simulations in the service of education: The interact simulation environment. *Computers & Education*, 25, 21-29.

Vacas Peña, J.M. (2000). Un programa de ordenador para la enseñanza de la metodología científica y la genética. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales* 14, 117-125.

Vacas Peña, J.M. (2001). Isogons: a program in pascal to draw the dip isogons of folds. *Computers & Geosciences* 27, 601-606.

Vacas Peña, J.M. y Martínez Catalán, J.R. (2003). Folding&g: a research program transformed into a program for teaching. *Computers & Education* 40, 393-403.

Vacas Peña, J.M. y Martínez Catalán, J.R. (2004). A computer program for the simulation of folds of different sizes under the influence of gravity. *Computers & Geosciences* 30, 33-43.

Veenman, M.V.J. y Elshout, J.J. (1995). Differential effects of instructional support on learning in simulation environments. *Instructional Science*, 22, 363-383.

Vreman-de Olde, C. y de Jong, T. (2006). Scaffolding learners in designing investigation assignments for a computer simulation. *Journal of Computer Assisted Learning*, 22(1), 63-73.

Windschitl, M. y Andre, T. (1998). Using computer simulations to enhance conceptual change: the roles of constructivist instruction and student epistemological beliefs. *Journal of Research in Science Teaching*, 35(2), 145-160.

Yalcinalp, S., Geban, O. y Oezkan, I. (1995). Effectiveness of using computer-assisted supplementary instruction for teaching the mole concept. *Journal of Research in Science Teaching*, 32, 1083-1095.

Zamarro, J.M, Hernández, A., Martín, E. y Härtel, H. (1997). Uso de las simulaciones en la construcción de conocimientos científicos. *Enseñanza de las Ciencias: V Congreso Internacional sobre Investigación e Innovación en la Didáctica de las Ciencias*. 273-274.

Zienkiewicz, O.C. (1977). *The finite element method* (3ª ed). London: McGraw-Hill.

Zienkiewicz, O.C. y Taylor, R.L. (1994). *The finite element method*, Vol. 1 (4ª ed.). London: McGraw-Hill ■

Fecha de recepción del original: 30/04/09

Fecha de aceptación definitiva: 26/09/09

ANEXO I

PROBLEMA

Se plantea a los alumnos el siguiente problema: ¿El tamaño y separación de los diapiros está relacionado con la potencia de las capas de baja densidad?

En primer lugar, se enseña al alumno el uso de los programas, para ello en el archivo comprimido en el que está el programa (puede ser descargado en la dirección de Internet <http://web.usal.es/jmvp/>), se encuentra un tutorial de utilización, paso a paso, con el ejemplo de modelización de un diapiro.

En segundo lugar, los alumnos deberán repasar todo lo que conocen sobre los diapiros y realizar una búsqueda bibliográfica.

Con esos conocimientos ya pueden enfrentarse a la tarea de responder la pregunta inicial.

De todas formas, mediante preguntas sugerentes se les puede guiar, sobre todo, si es su primera experiencia con el programa y con las simulaciones.

- ¿Qué variables intervienen en el desarrollo de los diapiros que se puedan introducir en el modelo?
- ¿Qué variables se controlarán y permanecerán fijas en el transcurso de la experiencia?
- ¿Cuál será la variable independiente que permita contestar a la pregunta inicial?

SOLUCIÓN

¿Qué variables intervienen en el desarrollo de los diapiros que se puedan introducir en el modelo? Las variables que intervienen son (Figura 1):

- Longitud del modelo.
- Potencias del modelo. Pondremos dos lechos:
 - Uno superior, Capa 1.
 - Otro, Capa 2 (Capa de baja densidad)
- Viscosidades de las capas.
- Densidades de las capas.
- Gravedad.

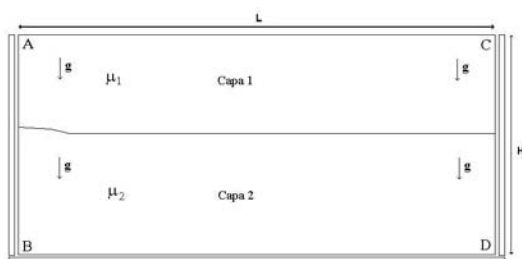


Fig. 1. Diseño del modelo para el desarrollo de diapiros.

¿Qué variables se controlarán y permanecerán fijas en el transcurso de la experiencia? Las variables controladas serán:

- Longitud.
- Potencia del lecho superior que hemos llamado Capa 1.
- Viscosidades de las capas.
- Densidades de las capas.
- Gravedad.

¿Cuál será la variable independiente que permita contestar a la pregunta inicial? La variable independiente será la potencia de la Capa 2 o potencia de la capa de baja densidad.

Valores introducidos para cada una de las simulaciones que se realizan a modo de ejemplo (Cada alumno podría dar valores distintos a los que se indican).

Simulación 1.

- Longitud $L=5.000 \text{ m}=500.000 \text{ cm}$. (Poner todas las unidades en el sistema c.g.s.).
- Potencias. Pondremos dos lechos:
 - Uno superior, Capa 1, de 38.000 cm .
 - Otro, Capa 2, de 23.000 cm . (Este es el único valor que cambia).
- Viscosidades:
 - Capa 1= 1E^{20} poises y Capa 2= 1E^{19} poises.
- Densidades:
 - Capa 1= $2,7 \text{ gr/cm}^3$ y Capa 2= $2,2 \text{ gr/cm}^3$.
 - 981 cm/s^{-1} .
- Fijamos en 10.000 el número de ciclos de cálculo para ambos modelos.

Simulación 2.

- Longitud $L=5.000 \text{ m}=500.000 \text{ cm}$.
- Potencias. Pondremos dos lechos:
 - Uno superior, Capa 1, de 38.000 cm .
 - Otro, Capa 2, de 28.000 cm . (Este es el único valor que cambia).
- Viscosidades:

- Capa 1=1E 20 poises y Capa 2=1E 19 poises.
- Densidades:
- Capa 1=2,7 gr/cm³ y Capa 2=2,2 gr/cm³.
- 981 cm/s⁻¹.
- 10.000 ciclos de cálculo.

Simulación 3.

- Longitud L=5.000 m=500.000 cm.
- Potencias. Pondremos dos lechos:
 - Uno superior, Capa 1, de 38.000 cm.
 - Otro, Capa 2, de 23000 cm. (Este es el único valor que cambia).
- Viscosidades:
 - Capa 1=1E 20 poises y Capa 2=1E 19 poises.
- Densidades:
- Capa 1=2,7 gr/cm³ y Capa 2=2,2 gr/cm³.
- 981 cm/s⁻¹.
- 10.000 ciclos de cálculo.

RESULTADOS

Se muestran los resultados de tres simulaciones, pero podría plantearse que los alumnos realizaran un número mayor de experimentos.

La Figura 2 representa el resultado de las simulaciones y a partir de ella ya se podrían sacar conclusiones, pero podemos medir y hacer represen-

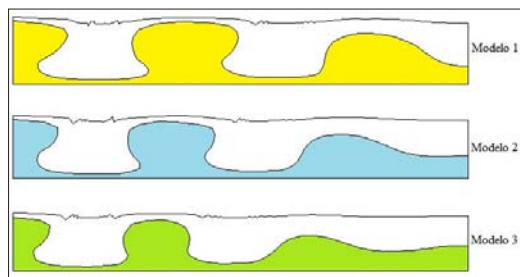


Fig. 2. Resultado de las simulaciones.

taciones gráficas que permitan cuantificar los resultados y contestar con precisión a la pregunta inicial.

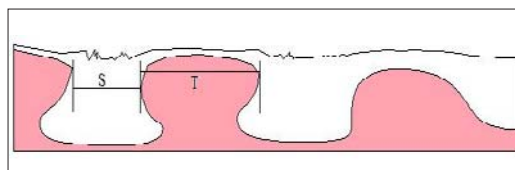


Fig. 3. Lugar en el que se han realizado las medidas.

Si medimos el desarrollo del segundo diapiro como se muestra en la Figura 3, y la separación entre el primero y segundo, para los tres modelos, teniendo en cuenta la escala del dibujo, obtenemos los valores que aparecen en la Tabla 1.

	Separación- S	Tamaño-T
Modelo 1	694 m.	1192 m.
Modelo 2	763 m.	969 m.
Modelo 3	797 m.	754 m.

Tabla 1.

CONCLUSIONES

La Tabla 1 y la Figura 4 permiten llegar a las siguientes conclusiones:

En relación con la separación. Los diapiros se generan más próximos unos a otros cuanto mayor es la potencia de la capa de baja densidad.

En relación con el tamaño. Los diapiros son de mayor tamaño cuanto mayor es la potencia de la capa de baja densidad.

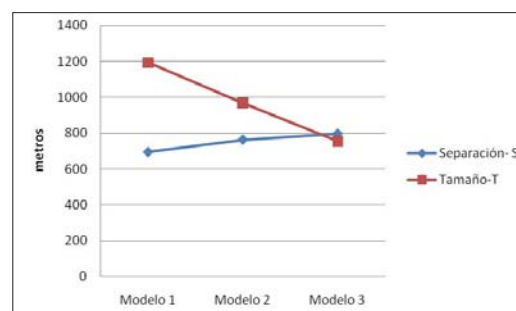


Fig. 4. Gráfico que muestra la separación entre diapiros y su tamaño en los tres modelos.