

Seguimiento del aprendizaje mediante análisis de trazas en una simulación de trampas ópticas

Monitoring learning by means of trace analysis in an optical trapping simulation

Artur Carnicer^(1,*), Josep Mas⁽¹⁾, Jordi Cuadros⁽²⁾, Ignasi Juvells^(1,S) y Xavier de Pedro⁽¹⁾

1. Universitat de Barcelona, Departament de Física Aplicada i Òptica. Facultat de Física, Martí i Franques 1, 08028 Barcelona.

2. Universitat Ramon Lull, Departament d'Estadística Aplicada, Institut Químic de Sarrià, Via Augusta 390, 08017 Barcelona.

(*) Email: artur.carnicer@ub.edu

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Recibido / Received: 13/10/2010. Versión revisada / revised versión: 23/02/2010. Aceptado / Accepted: 02/03/2010

RESUMEN:

En este artículo se presenta una simulación de una trampa óptica, es decir, un haz de luz muy focalizado capaz de atrapar partículas dieléctricas alrededor de la zona focal. El programa ha sido diseñado para su utilización en la docencia a nivel de último año del grado de Física o Máster. La aplicación incluye un sistema de seguimiento que permite conocer (trazar) la interacción del estudiante con el programa. Esta herramienta permitirá al profesor analizar el trabajo realizado por el alumno así como también detectar la presencia de errores comunes.

Palabras clave: Óptica Geométrica, Óptica Física, Trampas Ópticas, Tecnología Educativa, Análisis de Trazas.

ABSTRACT:

In this paper we introduce a simulation of an optical trap, ie. a highly focused beam able to trap small dielectric particles in its focal region. The program is intended for senior undergraduate students or even graduate (master) students. The application includes a logging system designed to trace the interaction of the user with program. With this tool, the instructor will be able to analyze the student's work and detect the presence of common errors.

Key words: Geometrical Optics, Physical Optics, Optical Traps, Educational Technology, Trace Analysis.

REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] <http://www.ub.edu/javaoptics>.
- [2] <http://www.blackboard.com>, <http://www.moodle.org>, <http://tikiwiki.org>.
- [3] <http://code.google.com/p/optical-tweezers/>
- [4] A. Ashkin, "Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime," *Biophys. J.* **61**, 569–582 (1992).
- [5] Y. Harada, T. Asakura, "Radiation forces on a dielectric sphere in the rayleigh scattering regime", *Opt. Commun.* **124**, 529–541 (1996).
- [6] E. L. Florin, A. Pralle, E. H. K. Stelzer, J. K. H. Hörber, "Photonic force microscope calibration by thermal noise analysis", *Appl. Phys A-Mater.* **66**, S75–S78 (1998).
- [7] <http://www.r-project.org>
- [8] <http://www.math.montana.edu/Rweb>
- [9] <http://doc.tikiwiki.org/PluginR>

1. Evaluación educativa a partir de la interpretación automática de trazas

Desde el año 2001, nuestro grupo de trabajo ha estado desarrollando herramientas informáticas y materiales curriculares para el aprendizaje de la Óptica en el marco de la enseñanza de la Física. Se ha desarrollado un paquete de programas utilizando el lenguaje Java, debido a su adaptabilidad al entorno de red y a la posibilidad de ser ejecutados de forma independiente de la plataforma utilizada. Este lenguaje permite, además, la elaboración de entornos gráficos sofisticados que facilitan la interacción de los estudiantes con el programa. Los contenidos se encuentran en castellano, catalán y parcialmente en inglés. El curso es de acceso libre y gratuito y los contenidos están protegidos por una licencia de uso público. Todos estos materiales se han agrupado en una página web (ver Fig. 1), bajo la denominación de Curso de Óptica en Java [1].

La utilización de estos recursos en la docencia, ha comportado un cambio en la forma de trabajar del profesorado de nuestro grupo. Se ha pasado de un modelo basado exclusivamente en la clase magistral a impartir docencia combinando la explicación convencional con la manipulación activa de los recursos generados. La aplicación de este modelo requiere una cierta predisposición por parte de los alumnos. En general, todo esto debería traducirse

en una mejora en la adquisición de conocimientos y una mayor capacidad de comprensión de los conceptos. La inminente implementación del plan de Bolonia, así como recientes cambios en la normativa de evaluación del alumnado en la Universitat de Barcelona, ha modificado substancialmente la forma de calificar a los estudiantes. En este contexto, estos materiales, inicialmente pensados como complemento de clases magistrales, pasan a tener un rol y una importancia en la evaluación y el autoaprendizaje que va más allá de lo previsto.

Pese a trabajar con este tipo de herramientas desde hace años, hasta este momento no hemos estudiado la incidencia que tiene sobre el aprendizaje de los estudiantes la utilización de programas de simulación. No se tiene constancia directa de cómo su uso puede guiar positivamente su proceso de aprendizaje (o lo contrario). Se da por hecho que los programas educativos favorecen la autonomía de los estudiantes, desplazando sobre el alumno el centro del proceso de aprendizaje; no obstante, la utilización de estos recursos hace más complejo el seguimiento y evaluación del trabajo de los estudiantes por parte de los equipos docentes, lo que supone una mayor dificultad para ejercer el rol del profesor como instructor.



Fig. 1. Pantalla principal de <http://www.ub.edu/javaoptics>.

Para dar respuesta a este tipo de interrogantes, que son comunes en los ámbitos del conocimiento que utilizan aplicaciones informáticas educativas, se propone registrar automáticamente la actividad del estudiante mientras éste interactúa con los programas. Ejemplos simples de trazado los encontramos en los registros de eventos realizados por los servidores web o en los sistemas de gestión de contenidos y aprendizaje como Blackboard, Moodle o las aplicaciones wiki [2].

A partir del concepto de registro (*log*), se genera un fichero de trazas con información exhaustiva de la interacción del usuario con el programa: las secciones del programa que ha visitado, las selecciones que ha realizado, los objetos que ha pulsado, los valores que ha introducido, los gráficos que ha generado, el tiempo que ha requerido entre acción y acción, etc. A partir del análisis de esta información sería posible reconstruir el proceso que lleva al resultado e inferir información relevante del proceso de aprendizaje. En particular, qué conoce o qué no entiende.

2. Simulación de una trampa óptica

Se ha diseñado una aplicación que simula el proceso por el cual una partícula dieléctrica en suspensión es atrapada cuando incide sobre ella un haz láser focalizado por un objetivo de microscopio. Este programa ha sido desarrollado de manera que incorpora el análisis de trazas en su diseño original. El programa y su código pueden descargarse libremente de [3]. La aplicación registra toda la actividad del usuario y guarda localmente el resultado en un fichero de formato XML. Este archivo puede ser procesado posteriormente, ya sea en el mismo ordenador del alumno o enviado a un servidor.

Las trampas ópticas son haces de luz altamente focalizados capaces de atrapar y manipular pequeñas partículas en el rango 10 nm a 10 μ m. Las partículas son atrapadas en un punto muy cercano al foco. Además, existen técnicas que permiten conocer la fuerza que hace el haz sobre la partícula. Puesto que el potencial de la trampa a la zona central es aproximadamente armónico, al separar lateralmente la partícula de la posición de equilibrio, esta es atraída por el haz con una fuerza $F = -kx$.

En esta aplicación el cálculo de la fuerza se realiza o bien en el régimen de Mie (para partículas mucho más grandes que la longitud de onda de la luz), o en bien en el de Rayleigh (para esferas mucho más pequeñas que λ). El usuario puede seleccionar el régimen de trabajo mediante un menú desplegable situado en la parte superior izquierda de la ventana (ver Fig. 2).

En el panel izquierdo se observa la sección transversal de la trampa, donde el eje vertical corresponde a la dirección de propagación del haz. La partícula puede moverse mediante el ratón a cualquier punto del panel. Unos botones de selección (debajo) permiten visualizar los vectores que representan la fuerza total y las componentes de *scattering* y de gradiente (que tienden respectivamente a empujar la partícula o a atraerla hacia el foco). Al seleccionar *Animation*, el programa arranca la simulación dinámica, consistente en la integración de la segunda ley de Newton considerando la fricción de la partícula con el medio fluido, la agitación térmica (movimiento browniano) y la fuerza óptica.

En el régimen de Mie, el haz se representa por un conjunto de rayos que se refractan en la esfera dieléctrica. El momento transferido por cada rayo se calcula a partir del cambio en la dirección del mismo [4]. La energía asociada a cada rayo recibe un peso de acuerdo con una distribución de intensidad gaussiana. Por otro lado, al trabajar en condiciones de Rayleigh (Figura 3), el campo se representa mediante un haz gaussiano TEM₀₀ y el cálculo de las fuerzas se realiza mediante el uso de las expresiones derivadas en [5].

En el panel de la derecha, el usuario puede modificar las condiciones experimentales: potencia del láser, longitud de onda, apertura numérica del objetivo (o la anchura del haz en el plano de convergencia), los índices de refracción de la partícula y el medio, el tamaño de la partícula, la viscosidad del medio o la temperatura. En el régimen de rayos también es posible ajustar el *overflowing* del haz. Este parámetro da cuenta de la relación entre la anchura del haz gaussiano y la dimensión de la pupila de entrada del objetivo.

La pestaña *Force analysis* (Fig. 4) permite visualizar el campo de fuerza que genera la trampa y la proyección de la fuerza en el eje de propagación (F_z) y el transversal (F_x). Pulsando el botón *Plot details* se puede observar en una ventana

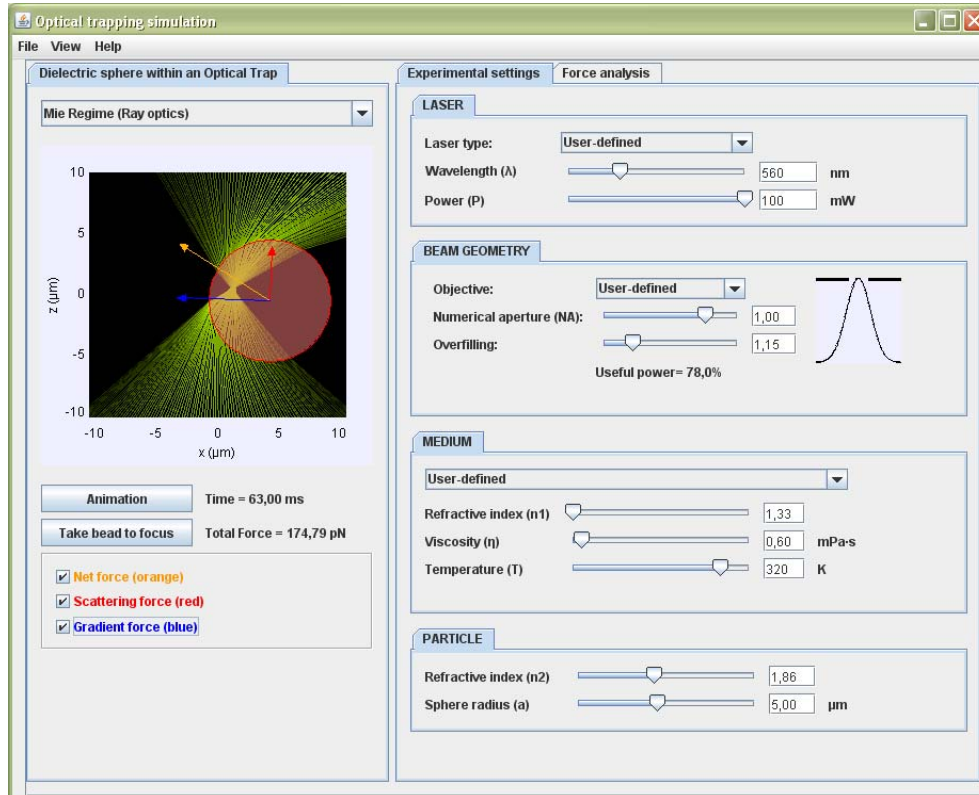


Fig. 2. Simulación en el Régimen de Mie.

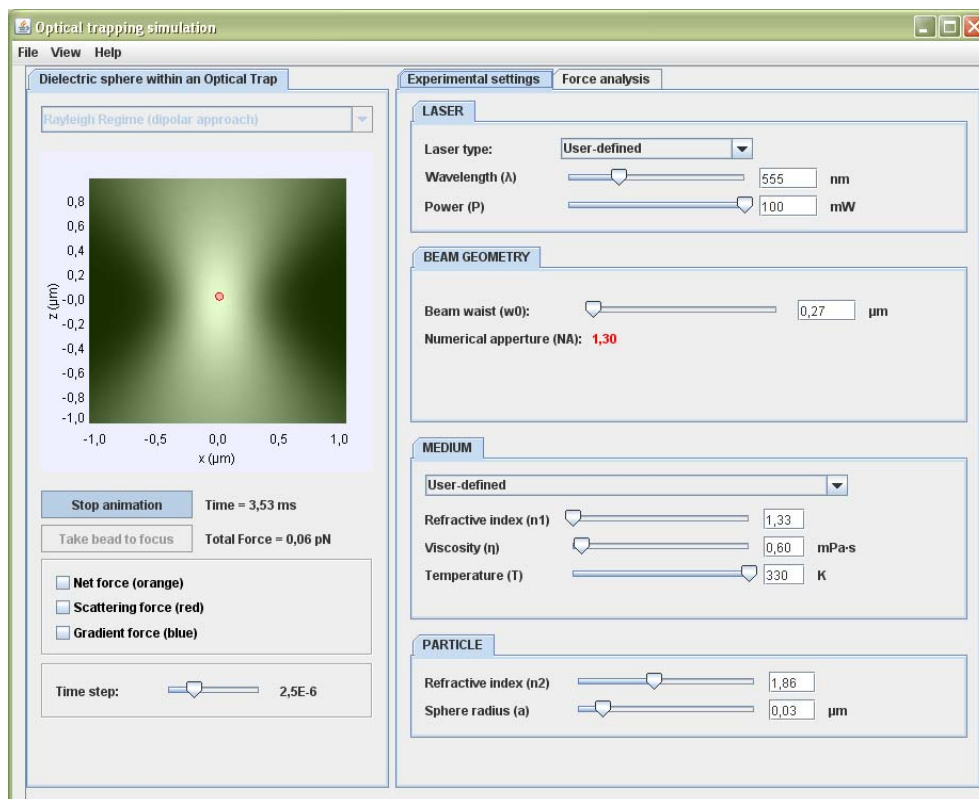


Fig. 3. Simulación en el Régimen de Rayleigh.

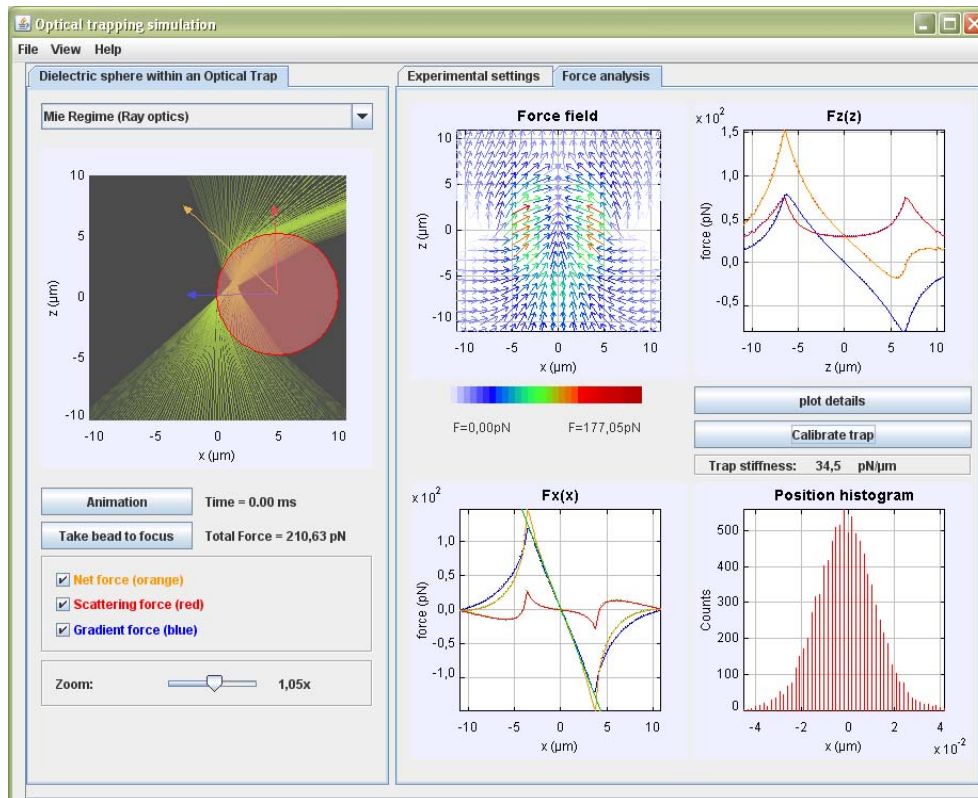


Fig. 4. Cálculos en el régimen de Mie. El panel derecho muestra el campo de fuerzas y la calibración de la trampa.

aparte algunos de los parámetros significativos de las curvas de fuerza. Nótese por ejemplo que si los valores experimentales seleccionados permiten una trampa estable, se indica la posición donde la partícula queda atrapada, así como los máximos de fuerza y las pendientes de las curvas en la posición de equilibrio. Cuando se pulsa el botón *Calibrate*, el programa ejecuta el método de calibración de trampas basado en el análisis de la distribución espacial del movimiento browniano. Esto permite medir la constante recuperadora de la trampa a partir del histograma de posiciones de la partícula atrapada (para la coordenada x , por ejemplo) [6]. Cuando el número de cuentas es suficientemente alto, el histograma pasa a tener una forma gaussiana, la anchura de la cual está relacionada de forma directa con el valor de la constante elástica k . (cuanto más fuerte sea la trampa, más estrecho será el histograma). Se puede comprobar que el valor calibrado de la constante elástica en la dirección x coincide con la pendiente de la curva de fuerza transversal (F_x) en la zona lineal.

3. Generación de ficheros de trazas

Los ficheros de registro de la actividad del estudiante se graban de forma local en el ordenador donde se ejecuta el applet, cuando el propio estudiante activa la opción de grabar el fichero de trazas (opción desactivada por omisión). Este archivo incluye, entre otras, las siguientes informaciones:

1. Aplicación que está siendo ejecutada por el alumno (con qué applet está interactuando)
2. Acción concreta que ha realizado el alumno: qué objetos ha pulsado o ha modificado, dónde ha introducido datos, etc.
3. Cambios introducidos por el alumno: qué datos ha introducido, dónde ha movido una barra de desplazamiento de valores de una variable, etc.
4. Valores significativos del sistema en el momento de la interacción: en el caso de simulaciones estocásticas o de fenómenos dependientes del tiempo, qué se muestra en pantalla, cuál es el estado del sistema simulado cuando se produce la acción del usuario, etc.
5. Resultados obtenidos tras la acción del alumno: resultados de la variable de salida de datos, qué gráfico ha modificado, etc.

El objetivo es que este archivo de registro de acciones contenga información suficiente para reproducir significativamente el proceso de interacción del usuario con la aplicación, de forma que puedan inferirse de dichos datos informaciones relevantes para el proceso de enseñanza-aprendizaje.

4. Ejemplo de traza a partir del applet sobre pinzas ópticas

En la Fig. 5 se muestra un ejemplo de traza generada con el programa de pinzas ópticas. El programa registra todas las operaciones que el usuario realiza al interactuar con el programa y las guarda en un archivo en formato XML. El código XML puede parecer a simple vista un tanto críptico pero es posible leer la información contenida línea a línea.

Como prueba de concepto, se ha desarrollado un programa que analiza la traza y genera un informe a modo de resumen y en un formato legible para el profesor o, eventualmente, el propio alumno cuando así interese.

El programa que elabora este informe puede ser ejecutado en un ordenador local o bien en un servidor web tras haber subido el archivo de trazas a procesar. A modo de ejemplo, supóngase que el alumno ha de resolver un ejercicio con la ayuda del applet de pinzas ópticas, y selecciona manualmente que el applet genere un archivo de trazas respecto a su interacción con el programa. Al acabar la interacción con el programa y cerrar el applet, el alumno podría seleccionar su archivo de trazas grabado en el disco duro local y enviarlo al profesor o subirlo a una página web que le ofrecería un informe sobre la actividad realizada. El tipo de informe que se ha desarrollado hasta el momento aporta datos como el número y tipo de simulaciones realizadas en una sesión, los datos utilizados en cada simulación, el número de objetos con los que se ha interactuado, el tiempo invertido y otros (Fig. 6).

La rutina de generación del informe ha sido programada en R [7], un lenguaje de programación y software libre multiplataforma dirigido a realizar cálculos estadísticos en el que resulta relativamente sencillo manipular datos de todo tipo, incluyendo cadenas alfanuméricas o incluso archivos XML reconociéndolos como tal, lo que permite procesar

y analizar la traza como resulte más adecuado en cada caso. Esta rutina puede ser ejecutada en un servidor web con el software adecuado como, por ejemplo, RWeb [8] o Tiki CMS/Groupware [9]. La manipulación de los ficheros via web va a permitir, en el futuro, tratamientos automatizados y simultáneos para todos los alumnos de un grupo clase.

```
<event application="Tweezers-applet" action="Applet started" user="xavi"
session="2009_07_06-15_39_42" time="1246887592241" number="1">
  <param name="power" value="0.049499999999999995"/>
  <param name="Wavelength" value="5.5E-7"/>
  <param name="N1" value="1.33"/>
  <param name="N2" value="1.58"/>
  <param name="NA" value="1.3"/>
  <param name="w0" value="5.318223636855334E-7"/>
  <param name="R" value="5.0E-6"/>
  <param name="Viscosity" value="6.0000000000000001E-4"/>
  <param name="Temperature" value="320.0"/>
  <param name="Regime" value="0.0"/>
  <param name="Pupil2waist" value="1.0"/>
  <param name="Zoom" value="0.6"/>
  <param name="Dt" value="1.0E-4"/>
  <param name="K (Stiffness)" value="0.0"/>
</event>
<event application="Tweezers-applet" action="Power changed"
user="xavi" session="2009_07_06-15_39_42" time="1246887631617" number="2">
  <param name="Power (mW)" value="0.051519999999999996"/>
</event>
<event application="Tweezers-applet" action="Change in Wavelength"
user="xavi" session="2009_07_06-15_39_42" time="1246887649570" number="3">
  <param name="Wavelength (nm)" value="5.5500000000000001E-7"/>
</event>
```

Fig. 5. Ejemplo de traza generada por el programa.

```
"Basic report on the xml file"
"-----"
"nodeCounts.param", 70
"nodeCounts.event", 30
"nodeCounts.log", 1
"nodeCounts.description", 1
"attributes.event.application", 30
"attributes.event.action", 30
"attributes.event.user", 30
"attributes.event.session", 30
"attributes.event.time", 30
"attributes.event.time_ms", 1
"attributes.event.number", 30
"attributes.param.name", 70
"attributes.param.value", 70

"Basic report on student activity"
"-----"
"Number of Calibrations", 1
"Number of Animations", 2

"Calibrations"
"-----"
"Parameters at the Calibration Number", 1
  "power", 0.059599999999999999
  "Wavelength", 5.5500000000000001E-7
```

Fig. 6. Parte del informe generado a partir de la traza anterior.

5. Discusión

El análisis de las trazas de la actividad de los alumnos obtenidas en este trabajo permitirá obtener información relevante tanto del proceso de

enseñanza-aprendizaje como del funcionamiento del recurso educativo utilizado.

Desde el punto de vista del estudio del trabajo del alumno, el análisis de las trazas permite conocer aspectos como su dinámica de trabajo (tiempo de dedicación, número de usos del recursos, número de interacciones), el proceso de resolución seguido ante un problema concreto (pasos realizados, orden de los mismos, repeticiones, etc.). Asimismo el tratamiento de los datos de los registros, puede permitir la identificación de problemas de aprendizaje, conceptuales o metodológicos, a través de la comparación con errores típicos, procedimientos de resolución inadecuados o concepciones alternativas.

Desde el punto de vista del grupo y del proceso de enseñanza-aprendizaje, el análisis puede permitir identificar patrones de estudiantes, errores típicos y procedimientos alternativos de resolución (correctos o incorrectos). Asimismo permitirá

conocer las lagunas de aprendizaje de los estudiantes y adaptar entonces la enseñanza a las observaciones realizadas.

Por último, desde el punto de vista del recurso educativo, la traza servirá para detectar que elementos del programa no son fácilmente accesibles, crean confusión o son difíciles de usar de forma adecuada, permitiendo la mejora de los recursos creados.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Agència d'Ajuts Universitaris i de Recerca de la Generalitat de Catalunya, proyecto MQD200700042 y l'Institut de Ciències de l'Educació de la Universitat de Barcelona, proyecto REDICE B0801-01.