

Experiencia de innovación didáctica en el Seminario Universitario 2015

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

Leandro Sarmiento¹, Nicolás Budini^{2,3}, Irma Manuela Benítez², Jorge Brandolín²

¹Facultad Regional San Francisco, Universidad Tecnológica Nacional, Av. de la Universidad 501, San Francisco (CP 2400), Córdoba, Argentina.

²Facultad Regional Paraná, Universidad Tecnológica Nacional, Av. Almafuerte 1033, Paraná (CP 3100), Entre Ríos, Argentina.

³Instituto de Física del Litoral, CONICET-Universidad Nacional del Litoral, Güemes 3450, Santa Fe (CP 3000), Argentina.

E-mail: nicolas.budini@ifis.santafe-conicet.gov.ar

Resumen

En este trabajo se describe la experiencia realizada en el curso de ingreso (Seminario Universitario, SU) de la Facultad Regional Paraná, Universidad Tecnológica Nacional, a través de la implementación de tutoriales de física basados en la metodología de aprendizaje activo y sustentados por la categoría teórica de cambio conceptual. Estos apuntan a complementar las clases convencionales (exposición de conceptos teóricos y resolución de problemas modelo) haciendo participar al alumno activamente para adquirir nuevo conocimiento y reemplazar o corregir conceptos previos erróneos. La eficacia de esta metodología ha sido probada, mejorada y evaluada durante décadas. El diseño cuasi-experimental utilizado consistió en aplicar los tutoriales en una de las comisiones del SU (grupo experimental), con pre-test y post-test, y comparar los resultados con otra de las comisiones del SU (grupo control). Se observó una leve ganancia en el grupo experimental, lo cual es motivador para implementar esta metodología en las carreras de ingeniería.

Palabras clave: Aprendizaje activo, Cambio conceptual, Universidad, Física general, Tutoriales de física.

Abstract

In this work we describe the experience carried out in the admission course (University Seminar, US), of the Regional Faculty of Paraná, National Technological University, through the implementation of tutorials for physics learning based on the active learning methodology and supported by the theoretical category of conceptual change. These tutorials aim to complement conventional lectures (exposition of theoretical concepts and resolution of model problems) making students participate actively to acquire new knowledge and replace or modify erroneous previous concepts. The efficacy of this methodology has been tested, improved and evaluated during decades. We used a quasi-experimental design that consisted on applying the tutorials in one of the US courses (experimental group), with pre- and post-test, and comparing the results with another US course (control group). A slightly higher gain was observed in the experimental group, which motivates the implementation of this methodology in the engineering careers.

Keywords: Active learning, Conceptual change, University, General physics, Physics tutorials.

I. INTRODUCCIÓN

La realidad socioeducativa en muchos sistemas educativos, incluyendo el argentino y los de diversos países latinoamericanos, indica que existe un muy bajo nivel de conocimientos en ciencias de los estudiantes que ingresan en la universidad, en particular en matemáticas y física. Las dificultades en la enseñanza y aprendizaje de las ciencias que atraviesa nuestro sistema educativo se ven reflejadas en los últimos datos conocidos de la evaluación PISA, un estudio internacional de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) que evalúa a más de 510.000 alumnos de 15 años de edad en matemáticas, lengua y ciencias. Argentina obtuvo pobres resultados en el ranking global: quedó en el puesto 59 sobre 65 países (PISA, 2013). Por las características de la prueba, ningún país ha superado en las distintas ediciones los 600 puntos (de un máximo posible de 1000), siendo el promedio de 500 puntos. La Argentina obtuvo 398 puntos en comprensión lectora, 388 en matemáticas y 406 en ciencias. Esto

muestra que la calidad de nuestro sistema educativo está por debajo de los estándares mínimos aceptables. Estos datos dan un panorama claro de las dificultades con que arriban a nuestras universidades los futuros estudiantes universitarios. Es por esto que pretendemos aportar una propuesta que apunte a mejorar el dictado de las clases del área Física del curso de ingreso, llamado Seminario Universitario (SU), llevadas a cabo en la Facultad Regional Paraná (FRP) de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN). Cabe destacar que la física general es uno de los pilares fundamentales de las carreras de ingeniería.

El objetivo general que se planteó en esta propuesta apuntó a validar el dispositivo de *Tutoriales para la Física Introductoria* (McDermott, 2001) mediante su implementación en el grupo SU UTN-FRP 2015 y comprobar su eficacia. La metodología elegida fue a través de un diseño cuasi-experimental basado en pre- y post-test con grupo experimental (comisión de Ing. Electrónica) y grupo de control (comisión de Ing. Civil) (ver Sección III), a los efectos de extender la implementación de este dispositivo de aprendizaje al bloque curricular de Física de las carreras. Como es inherente a este tipo de métodos cuasi-experimentales con grupo de control no equivalente, una ganancia pretest-postest propia del grupo experimental debe contemplar la interacción entre variables como historia, maduración o aplicación de tests y las diferencias específicas de selección que se den entre el grupo experimental y el de control. Aunque tales interacciones son en general poco probables, hay un cierto número de situaciones en las que tal interacción entre selección y maduración (o selección-historia, o selección-test) podría confundirse con el efecto de aplicación del instrumento, constituyendo por tanto la principal amenaza a la validez interna del experimento (Campbell, 1995). Este proyecto constituyó una prueba piloto de una metodología, para validarla en sí misma, pero a su vez tuvo dos efectos colaterales: (i) brindar un mejor nivel de posicionamiento inicial de los estudiantes para el aprendizaje posterior y (ii) sentar evidencia para buscar un cambio en las prácticas docentes del bloque Física, pasible de ser extendido a otros bloques curriculares de la carrera donde sea aplicable esta modalidad. Los objetivos de impacto de la presente propuesta son: (i) mejorar el aprendizaje de los conceptos de física desarrollados durante el SU de la UTN-FRP, (ii) aplicar metodologías de enseñanza innovadoras en el aprendizaje de la física y (iii) afianzar los conceptos físicos necesarios para el avance de los alumnos durante el primer año de carrera (principalmente en la cátedra de Física I).

II. PROPUESTA

A. Aprendizaje activo de la física

En las últimas décadas se ha demostrado que las metodologías que fomentan el aprendizaje activo (AA) mejoran el aprendizaje de la física (Redish, 2004). Estas estrategias guían a los estudiantes en la construcción de su conocimiento, a través de la observación directa del mundo real. Se utiliza el ciclo de aprendizaje que consta de: (i) predicción, (ii) discusión entre pares en pequeños grupos, (iii) observación de la experiencia y (iv) comparación entre el resultado experimental y las predicciones. De esta manera se favorece que el estudiante coteje las diferencias entre las creencias con que llega a la clase de física y las leyes físicas que gobiernan el mundo real. Estas metodologías de AA, basadas en los resultados de la investigación educativa en física, producen una mejora mensurable en la comprensión conceptual de la física (Sokoloff, 1997; Thornton, 1998), reproducen el proceso científico en el aula y ayudan al desarrollo de la capacidad de razonar. La metodología de AA ha sido descrita en trabajos de Camilloni (2005, 2012) y se enmarca dentro del concepto de *cambio conceptual* (Ausubel, 1963). Ausubel sostenía que “el conocimiento previo es el factor aislado que más influye en el aprendizaje” y sus trabajos dieron lugar a una enorme cantidad de investigaciones sobre concepciones alternativas, para responder a preguntas del tipo ¿cómo es la interacción entre el conocimiento previo y un nuevo conocimiento aparentemente incompatible? ¿Por qué persiste el conocimiento previo? ¿A través de qué proceso(s) las personas cambian sus concepciones alternativas por concepciones aceptadas en el contexto científico? ¿Cómo ocurre el cambio conceptual? (Moreira, 2003). En el modelo de Ausubel y Novak (1978) una nueva idea, significado o concepto es asimilado a través de la relación y asimilación de una idea nueva (a), potencialmente significativa, con una idea ya establecida (A), generando un producto interaccional ($a'A$) disociable ($a' + A'$) y reductible a una idea más estable (A').

De suma importancia es el cambio en el rol del docente que se produce cuando se utiliza material didáctico para el AA. Abandonar el rol tradicional de explicar todo con autoridad para asumir el rol de sólo “facilitador” del material didáctico es un enorme desafío para los docentes de cualquier sistema educativo. Que esta transición sea exitosa requiere la aceptación de la evidencia referida a que los alumnos no aprenden eficientemente ni siquiera ante las más lúcidas explicaciones del docente y que, además, el docente compruebe y comprenda la efectividad del material didáctico de AA que está usando.

La facilidad con que esta transición se produce depende no sólo de la actitud de dejar el rol de autoridad del conocimiento, sino también de un número de factores culturales que difieren de país a país.

¿Por qué deberíamos preocuparnos por que los estudiantes comprendan conceptualmente y puedan transferir estos aprendizajes de física? Creemos que esto es fundamental para una comprensión real de la disciplina, que permita desarrollar sus aplicaciones y contribuir a su valoración social, tanto dentro como fuera de los sistemas educativos. Si no se producen estos cambios, seguiremos como hasta ahora, con estudiantes que no adquieren una sólida comprensión de los conceptos fundamentales y sólo son capaces de resolver algunos ejercicios de manera algorítmica e irreflexiva, olvidando rápidamente lo expuesto en el aula. Esta es la realidad que muestran los recientes relevamientos de PISA (2013) en la escuela secundaria de todos los países latinoamericanos relevados, como así también el reciente estudio de los estudiantes ingresantes a universidades de distintos países iberoamericanos (Benegas, 2009), que da cuenta del manifiesto fracaso de la instrucción tradicional en generar conocimientos significativos, y seguramente también en despertar vocaciones por las ciencias y la tecnología.

B. Implementación de la propuesta

Esta propuesta se basa en el aprendizaje conceptual en el aula, guiado por los “Tutoriales para Física Introductoria” (tutoriales, de aquí en más) de (McDermott, 2001). Éstos representan una estrategia de enseñanza cuyo principal objetivo es desarrollar el aprendizaje conceptual y las habilidades de razonamiento. Los mismos se adaptan a diversas implementaciones didácticas, complementando la clase expositiva tradicional o directamente suplantándola. En este último caso el docente no realiza clases expositivas y deja que la construcción de conocimientos se logre sólo con la tarea estudiantil sobre el tutorial. Así, el docente debe fomentar la discusión entre alumnos acerca de dificultades, resultados y conclusiones, ya sea de las tareas colaborativas realizadas en clase o de los ejercicios realizados individualmente fuera de ella.

Durante la aplicación de un tutorial el docente supervisa la tarea de los grupos, observando la discusión, el razonamiento y las conclusiones de cada tarea e interviniendo en aquellos casos en que el tutorial los demande. Estos puntos de control tienen por objetivo que los alumnos no avancen sobre el siguiente material/concepto sin entender los conceptos que les servirán de base para comprender los siguientes, asegurando la continuidad del aprendizaje. El docente debe controlar el tiempo para que la labor estudiantil sea efectiva. Los alumnos deben realizar en forma individual y fuera del horario de clase los ejercicios complementarios del tutorial, cuya resolución será analizada junto al docente en la clase siguiente, atendiendo a dudas remanentes y afirmando y controlando los conceptos adquiridos. Esto ha sido descrito cuidadosamente en trabajos de (McDermott, 2001) sobre mecánica, electricidad, óptica geométrica, movimiento relativo y termodinámica. El tutorial (el centro de la metodología) es una guía de actividades que los alumnos deben desarrollar en grupos de cuatro o, a lo sumo, cinco estudiantes. En algunos casos el trabajo de lápiz y papel se puede complementar con dispositivos experimentales simples (focos, cables, baterías) o más complejos (como detectores de movimiento) con los cuales cada grupo realiza actividades, controla resultados y obtiene, por inducción y generalización, la ley física estudiada. Es importante destacar que el trabajo de tutorial puede realizarse en un aula normal siendo deseable que los integrantes del grupo trabajen mirándose.

En este trabajo, el ambiente para la aplicación de los tutoriales fue el aula, el personal necesario fueron dos docentes (uno por comisión) y la población estudiantil fueron los alumnos del módulo de Física del SU (comisiones de Ing. Civil y Electrónica). El material didáctico utilizado fueron libros de tutoriales y ejercicios complementarios (en español) (McDermott, 2001). El docente a cargo aplicó tutoriales seleccionados para abordar los principales conceptos físicos que se trabajaron durante el curso, referentes a las leyes de Newton: fuerzas, diagrama de cuerpo libre, fuerzas de contacto, de acción a distancia y tensión.

C. Instrumentos de evaluación

El *Inventario del Concepto de Fuerza (Force Concept Inventory, FCI)* es un test de respuestas de opción múltiple destinado a medir el aprendizaje conceptual de diversos aspectos de mecánica (Hestenes, 1992). El mismo fue desarrollado a partir de la extensa investigación educativa sobre modelos alternativos y dificultades de aprendizaje características en esta área de la física y contiene, entre sus distractores, una verdadera taxonomía de las dificultades de aprendizaje más comunes. Por ello es una herramienta útil tanto para monitorear la evolución del aprendizaje como para llevar a cabo una investigación educativa.

En el trabajo aquí descrito se suministró a los alumnos un test (pre-test) al inicio del curso, con una serie de preguntas seleccionadas del FCI (en base a los contenidos del SU). El pre-test sirvió para tener una idea clara de la existencia (o no) de dificultades conceptuales. Luego de la aplicación de los tutoriales

(estrategia de enseñanza), al final del curso, se suministró nuevamente el mismo test (post-test). La comparación entre ambos resultados de este mismo test pre- y post-aplicación de la estrategia de enseñanza, permitió determinar el coeficiente de *ganancia normalizada*, definido como

$$g = \left(\frac{\text{prom.post - test} - \text{prom.pre - test}}{100 - \text{prom.pre - test}} \right) \times 100\%. \quad (1)$$

Así, g representa el porcentaje de mejora posible que ha obtenido, en promedio, toda la clase.

Estos resultados nos permiten tener una idea de la ganancia en el aprendizaje del curso en el cual se aplicó la estrategia de enseñanza de AA. En nuestro caso, como se mencionó anteriormente, también se suministró el pre-test y el post-test a un grupo control en el que no se utilizó la estrategia de AA. De esta manera fue posible comparar la ganancia obtenida en un curso donde se desarrolló el aprendizaje tradicional o pasivo con la ganancia del curso sometido al AA.

III. RESULTADOS

Durante los primeros 45 minutos de la primera clase se tomó el pre-test. Se eligieron 20 preguntas del FCI en relación a los contenidos del SU. Dada la experiencia previa en el dictado del SU, la mayor parte de las clases se destina al tema de Estática. Por lo tanto se decidió elegir las preguntas 4, 8–11, 13, 15–18 y 21–30, que evalúan el nivel conceptual en cuanto a: discriminación entre velocidad y aceleración, 1° ley de Newton en ausencia de fuerzas y con fuerza neta igual a cero, 2° ley de Newton (relación entre fuerza y aceleración), 3° ley de Newton para fuerzas impulsivas y continuas, principio de superposición de fuerzas, fuerza de fricción, resistencia del aire, gravedad y trayectoria parabólica. El post-test se tomó en los primeros 45 minutos del último día de clases. Durante el cursado se aplicaron los siguientes tutoriales: (i) *Diagrama de cuerpo libre*, (ii) *Fuerzas* y (iii) *Objetos en interacción: velocidad constante*. Además se implementó, como primera actividad, un tutorial de vectores extraído de la Escuela Annville-Cleona (Pennsylvania, Estados Unidos). Hubiera sido deseable aplicar más tutoriales, en particular los de fuerzas de tensión, pero el tiempo resultó escaso para esto. En total se dispuso de alrededor de 28 h netas de dictado de clases, ocupando cada uno de los tutoriales alrededor de 2 h 30 min (4 tutoriales \times 2 h 30 min = 10 h). Las 18 h restantes de clase se destinaron a introducir los diferentes temas, a resolver problemas, a proponer problemas para que resuelvan los alumnos durante la clase, a discutir los resultados y a ofrecer consultas previas a los exámenes parciales y final.

Para la aplicación se conformaron grupos de cuatro o cinco alumnos y se observó lo desarrollado grupo por grupo. Durante la resolución se entablaron discusiones interesantes entre integrantes de un mismo grupo, en las cuales se buscó aportar ideas para guiar la discusión. En la mayoría de los grupos saltaron a la luz importantes problemas conceptuales y, particularmente, se percibió una notable dificultad para representar espacialmente la acción de las fuerzas sobre los cuerpos. La noción de par de fuerzas de acción-reacción resultó ser la menos comprendida, dado que en general las fuerzas normales de contacto que actúan sobre los cuerpos se entendían como reacciones a la fuerza peso de los mismos. Una observación importante es que los alumnos no se preocupaban por, o no lograban darse cuenta de la importancia que tiene, seguir las indicaciones de los enunciados. Por citar un ejemplo, en ciertos tutoriales se pide a los alumnos utilizar una notación determinada para las fuerzas, con el fin de que sea fácil comprender cuál es el tipo de fuerza en juego, qué fuerza actúa como acción y cuál como reacción, etc.; aunque esto está claramente expresado en los tutoriales como consigna, los alumnos no seguían esta indicación. A pesar de la insistencia del docente, la mayoría de los grupos terminaron el tutorial sin respetar esta (simple) consigna acerca de la notación. Vale la pena destacar aquí que en los tutoriales es sumamente importante seguir al pie de la letra las consignas. De esto depende que los alumnos puedan ir corrigiendo sus preconcepciones a medida que avanzan en los tutoriales; de hecho este es el objetivo central de los mismos y fueron preparados especialmente para ir haciendo notar, consigna tras consigna, cuáles preconcepciones son erróneas y por qué, permitiendo al alumno reformular su conocimiento.

En la Fig. 1 se muestran los resultados obtenidos del pre-test, que se tomó el primer día de clases, y del post-test, que se tomó el último día de clases. Se comparan los resultados de la comisión de control (gráfico superior) con la comisión experimental (gráfico inferior). La escala vertical en ambos gráficos va de 0% a 70% y las barras del extremo derecho indican los valores promedio, teniendo en cuenta las 20 preguntas evaluadas. El pre-test no evidenció claramente un mejor nivel inicial en ninguno de los grupos en particular; de esta manera puede decirse que los dos grupos en su estado previo al cursado eran, en términos estadísticos, equivalentes entre sí.

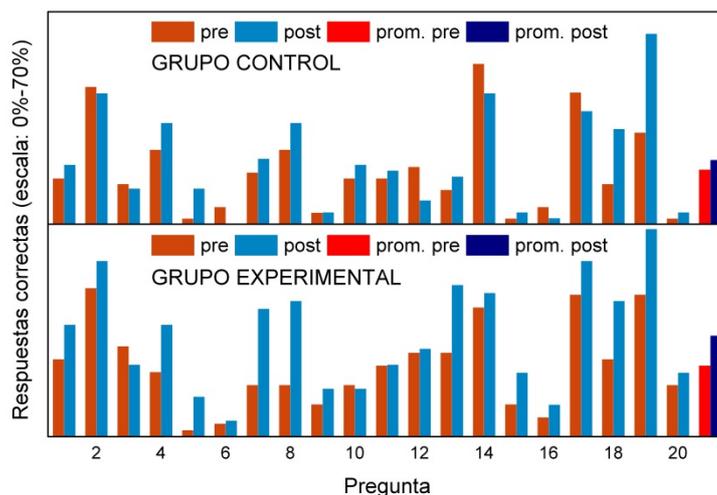


FIGURA 1. Comparación entre los resultados del pre-test y post-test para la comisión de control (superior) y para la comisión experimental (inferior). Las barras del extremo derecho indican los valores promedio del total de preguntas.

En promedio se observó una leve ventaja inicial en el grupo experimental, aunque la diferencia (< 5%) entre grupos es insignificante frente a una desviación estándar del 14% (prácticamente igual en ambos grupos). Comparando los resultados del post-test, puede observarse un mayor porcentaje de respuestas correctas en el grupo experimental para todas las preguntas, excepto la pregunta 10. De esta manera, el promedio total de respuestas correctas en el grupo experimental presenta una diferencia más considerable ($\approx 12\%$), respecto del grupo control, que en el pre-test ($\approx 5\%$). Dentro del grupo experimental, a excepción de las preguntas 3 y 10, se observa un claro aumento en el porcentaje de respuestas correctas al comparar pre- y post-test. Por el contrario, en el grupo control esta mejora no es tan evidente, existiendo más “dispersión” en el sentido de cantidad de preguntas en las que hubo y no hubo mejora. Esto puede verse más claramente en los resultados que siguen.

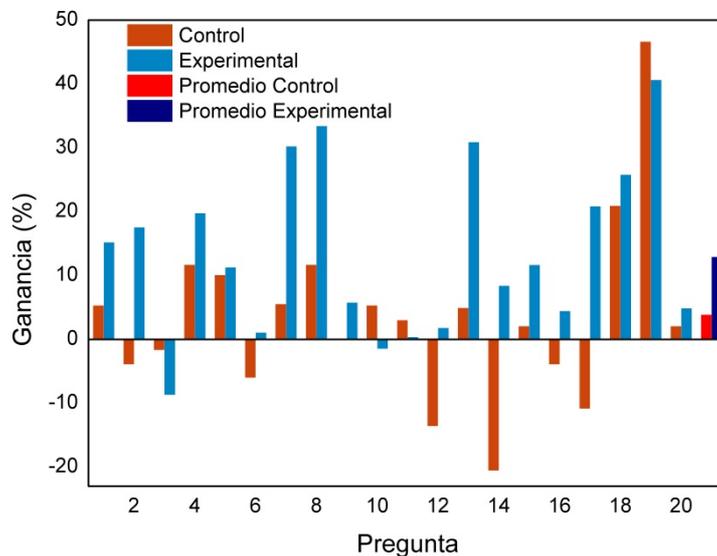


FIGURA 2. Comparación de la ganancia por pregunta entre la comisión de control y la comisión experimental. Las barras del extremo derecho indican los valores promediados entre el total de preguntas.

En la Fig. 2 se muestra un gráfico de la ganancia calculada por pregunta y en promedio (barras del extremo derecho). En el grupo control se observa una mayor cantidad de preguntas en las que la ganancia fue negativa. Una ganancia negativa en este contexto implica, en primer lugar, que el concepto involucrado no está claro en los alumnos y, en segundo lugar, que el mismo no logró ser modificado correctamente durante las clases. En el grupo experimental, sólo las preguntas 3 y 10 mostraron una ganancia negativa. En las preguntas 3, 10, 11 y 19 el grupo control mostró una ganancia mayor que el grupo experimental, pero en las dieciséis preguntas restantes la ganancia fue claramente superior en el

grupo experimental. Considerando el promedio, el grupo experimental obtuvo una ganancia del 13% mientras que la del grupo control fue del 4%.

IV. CONCLUSIONES

La aplicación de tutoriales en el SU UTN-FRP 2015 resultó beneficiosa en el sentido más amplio. En primer lugar, se enfrentó a los alumnos a una nueva forma de aprender, lo cual bien encauzado puede resultar en una mayor motivación para asistir a clases y para involucrarse activamente en ellas. En segundo lugar, se logró con los tutoriales que los alumnos hablen y discutan acerca de la física y sus conceptos, a diferencia de las clases convencionales en las que sólo escuchan al profesor. En muchos casos las discusiones fueron interesantes, dado que surgían a partir de incompatibilidades entre ideas y conceptos previos dentro de un mismo grupo. Esto es sumamente aprovechable por el docente. Si bien la ganancia obtenida en el grupo experimental resultó ser solo moderadamente mayor a la del grupo control, hay que tener en cuenta que el tiempo de cursado en el SU es acotado y no es posible investigar cuáles son los mayores problemas conceptuales de los alumnos en general ni tampoco ahondar lo suficiente en ellos en caso de que fueran muy evidentes. Sin embargo, pensando en una proyección de lo hecho hacia las cátedras de Física de las carreras de ingeniería el panorama es alentador, dado que allí hay mucho más tiempo disponible (un año en cada cátedra) para implementar los tutoriales, para evaluar las dificultades generales, para ahondar profundamente en los conceptos más confusos, etc. En este sentido, el presente trabajo buscó desde su génesis comenzar a explorar herramientas con base científica, disponibles para la enseñanza de la física, cuya eficiencia puede, por un lado, evaluarse y, por otro, compararse con resultados de experiencias de otros docentes a nivel mundial. Por lo tanto, el solo hecho de haber implementado sistemáticamente estas herramientas por primera vez en la UTN-FRP (y probablemente en la región) resulta algo realmente motivador.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias a autoridades de la UTN-FRP y proyectos UTN, ANPCyT y CONICET.

REFERENCIAS

Annville-Cleona School District, Pennsylvania, Estados Unidos (<http://www.acschools.org>). El tutorial utilizado se puede descargar desde <http://www.acschools.org/cms/lib07/PA01916405/Centricity/Domain/362/Vectors%20Guided%20Inquiry%20Part%201.pdf>. Último acceso: 19/03/2015.

Ausubel, D. P. (1963). *The psychology of verbal learning*. New York: Grune & Stratton,.

Ausubel, D. P., Novak, J. D. y Hanesian, H. (1978). *Educational psychology: a cognitive view. 2nd. Edition*. New York: Holt, Ronehart and Winston.

Benegas, J., Villegas, M., Pérez de Landazábal, M. y Otero, J. (2009). Conocimiento conceptual de física básica en ingresantes a carreras de ciencias e ingeniería en cinco universidades de España, Argentina y Chile. *Rev. Iberoamericana de Física*, 5(1), pp. 35-43.

Camilloni, A., Celman, S., E. Litwin y Palou de Maté M. del C. (2005). *La evaluación de los aprendizajes en el debate didáctico contemporáneo*. Buenos Aires: Paidós Educador.

Camilloni, A. (2012). La evaluación de trabajos elaborados en grupo. En Camilloni, A. (Ed.). *La Evaluación Significativa*, pp. 151-176. Buenos Aires: Paidós Educador.

Campbell, D. y Stanley, J. (1995). *Diseños experimentales y cuasiexperimentales en la investigación social*. Buenos Aires: Amorrortu editores.

Hestenes, D., Wells, M. y Swackhamer, G. (1992). Force Concept Inventory. *The Physics Teacher*, 30, pp. 141-158.

Informe PISA 2013 (<http://educar2050.org.ar/2013/pisa/>). Último acceso: 11/07/2015.

McDermott, L. C. y Shaffer, P. S. (2001). *Tutoriales para Física Introductoria*. Buenos Aires: Prentice Hall.

Moreira, M. A. y Greca, I. M. (2003). Cambio conceptual: análisis crítico y propuestas a la luz de la teoría del aprendizaje significativo. *Ciência & Educação*, 9(2), pp. 301-315.

Redish, E. F. (2004). *Teaching Physics with the Physics Suite*. NJ: Wiley, Hoboken.

Sokoloff, D. R. y Thornton, R. K. (1997). Using interactive lecture demonstrations to create an active learning environment. *The Physics Teacher*, 35, pp. 340-347.

Thornton, R. K. y Sokoloff, D. R. (1998). Assessing student learning of Newton's laws: The Force and Motion Conceptual Evaluation and the evaluation of active learning laboratory and lecture curricula. *Am. J. Phys.*, 66, pp. 338-352.