

INFLUENCIA DEL RAZONAMIENTO CIENTÍFICO EN EL APRENDIZAJE DE CONCEPTOS EN FÍSICA UNIVERSITARIA: COMPARACIÓN ENTRE INSTRUCCIÓN TRADICIONAL E INSTRUCCIÓN POR MODELACIÓN

HUGO RAÚL ALARCÓN OPAZO / JORGE EUGENIO DE LA GARZA BECERRA

RESUMEN:

La metodología de instrucción por modelación ha sido utilizada con éxito en universidades y preparatorias en los Estados Unidos. El aprendizaje logrado por estudiantes que trabajan con la metodología es superior a aquellos que trabajan con metodología tradicional basada en clase-demostración. En este trabajo se implementa la metodología de modelación en estudiantes de un primer curso de física para ingeniería y se contrastan con estudiantes que trabajaron con metodología tradicional. El objetivo de esta investigación era conocer la dependencia que tiene el conocimiento conceptual previo de los estudiantes y su razonamiento científico sobre el aprendizaje conceptual logrado en el semestre. Los estudiantes que llevaron el curso con metodología de modelación aprendieron más del doble que los estudiantes que trabajaron con metodología tradicional. Se observó también que el razonamiento científico fue un factor más importante en el aprendizaje de los estudiantes que los conocimientos previos del mismo, y que la metodología de modelación aprovechó mejor el razonamiento del estudiante que la metodología tradicional, lo que puede ser una razón de la mayor efectividad de la metodología de modelación.

PALABRAS CLAVE: investigación educativa, modelación, instrucción, razonamiento científico, física.

INTRODUCCIÓN

Los métodos de instrucción convencionales, basados en transmisión y recepción, han demostrado ser poco efectivos en el aprendizaje de la física, incluso en universidades de gran prestigio (Powell, 2003) que reciben muy buenos estudiantes. En particular la mecánica introductoria, que es la temática que se estudia en un primer curso de física en la mayoría de las universidades, presenta esta problemática.

En las últimas dos décadas se han desarrollado metodologías basadas en aprendizaje activo (Redish, 2003) que han logrado incrementar el aprendizaje de manera importante en comparación con el alcanzado a través de metodologías convencionales (Hake, 1998). Una de estas metodologías es la de instrucción por modelación (Hestenes, 1987) que presenta evidencia empírica de efectividad en el aprendizaje de la mecánica introductoria a nivel universitario (Halloun y Hestenes, 1987) y preuniversitario (Wells y Hestenes, 1995) en instituciones en Estados Unidos.

En investigaciones recientes (Coletta y Phillips, 2005) se ha observado que el aprendizaje de la mecánica en el nivel universitario no depende solamente de los conocimientos previos del estudiante sobre los temas a tratar en el curso, sino también del razonamiento científico del estudiante.

Dado que existe evidencia empírica de que la metodología basada en modelación es muy efectiva en el aprendizaje de la física, es de gran interés responder a la siguiente pregunta de investigación:

- *¿Cómo depende el aprendizaje de la mecánica en el nivel universitario de los conocimientos previos del estudiante y de su grado de razonamiento científico en un curso impartido bajo una metodología basada en modelación?*

En esta investigación cuantitativa se compara el aprendizaje conceptual obtenido en los dos tipos de instrucción y se estudian las relaciones entre el estado inicial del estudiante y su aprendizaje con la finalidad de dar respuesta a la pregunta de investigación.

MARCO TEÓRICO

Instrucción por modelación (Halloun y Hestenes, 1987) es una metodología para enseñar física basada en la teoría de modelación de Hestenes (1987). Esta metodología se caracteriza por la incorporación de discusión sistemática y en la selección de problemas paradigma para ser trabajados en sesiones de trabajo grupal. La instrucción por modelación corrige algunas debilidades del método tradicional basado en clase-demostración como: la fragmentación del

conocimiento, la pasividad del estudiante y la persistencia de creencias ingenuas adquiridas en la interacción del estudiante con su entorno (Jackson, Dukerich y Hestenes, 2008).

Uno de los instrumentos más utilizados para medir el aprendizaje de conceptos en mecánica introductoria es el inventario sobre el concepto de fuerza FCI (Hestenes, Weiss y Swackhamer, 1992). Este *test* consiste de 30 preguntas de selección múltiple que evalúan el concepto de fuerza a través de 6 dimensiones: cinemática, primera, segunda y tercera Leyes de Newton, tipos de fuerzas y principio de superposición. Las opciones incorrectas de este test corresponden a preconcepciones comunes de los estudiantes, por lo que el test no solamente permite establecer cuánto sabe el estudiante, sino también cuáles son sus concepciones alternativas.

Hake (1998) utilizó el FCI en una gran población de estudiantes de nivel preuniversitario y universitario en Estados Unidos para medir el aprendizaje en cursos similares de mecánica introductoria. La aplicación del instrumento se hizo al inicio y al final del semestre con el propósito de cuantificar el aprendizaje conceptual a través de la *ganancia normalizada* $g = (FCI_{post} - FCI_{pre}) / (100 - FCI_{pre})$.

Este factor puede tomar valores entre 0 y 1, donde 0 representa que no hay aprendizaje, mientras que 1 corresponde al máximo aprendizaje posible. La normalización que presenta este factor permite comparar el desempeño de cursos con poblaciones diferentes, como es el caso de cursos de mecánica en diferentes universidades, e incluso diferentes niveles educativos.

Cada uno de los cursos evaluados por Hake fueron preclasificados de acuerdo a su metodología de instrucción, demostrando que aquellos cursos que utilizaban elementos de aprendizaje activo lograban un mayor factor de ganancia normalizada.

Recientemente Jackson, Dukerich y Hestenes (2008) han repetido el experimento de Hake en cursos enseñados con la metodología de instrucción por modelación reportando ganancias superiores en cursos con modelación que en cursos con metodologías convencionales. Se observa que profesores experimentados en la metodología de modelación obtienen mejores

resultados que profesores novicios, sin embargo las ganancias de estos últimos todavía duplican a las obtenidas con métodos convencionales.

Con el propósito de comprender por qué la instrucción basada en aprendizaje activo es más efectiva, es conveniente considerar cómo el estudiante piensa cuando llega a su primer curso de física en la universidad. En un trabajo clásico de educación en la física, Renner y Lawson (1973a) hacen una revisión de la teoría Piaget que puede ayudar a entender cómo el razonamiento científico se relaciona con la instrucción.

De acuerdo a los estudios de Piaget, se pueden observar cuatro estados de pensamiento que se van alcanzando progresivamente desde el nacimiento del niño hasta que éste alcanza la edad adulta. Cerca de los siete años de edad, el niño entra en el tercer estado de razonamiento llamado *operacional concreto*. En este estado el niño puede llevar a cabo experimentos mentales. Las operaciones que puede realizar son concretas en el sentido de que se relacionan directamente a objetos y no aún con hipótesis verbalizadas. El cuarto y último estado de Piaget se conoce como *operacional formal* y ocurre aproximadamente entre los 11 y 15 años. En este estado el individuo es capaz de razonar con proposiciones sin la necesidad de objetos. Para desarrollar este estado de pensamiento es necesario haber desarrollado previamente el pensamiento concreto. Un pensador formal puede formular hipótesis y probarlas. Para lograr esto debe aislar y controlar variables, así como excluir las variables irrelevantes.

Renner y Lawson (1973b) plantean que las abstracciones en física realmente son modelos creados por científicos para explicar datos de mediciones. Estos modelos no aparecen directamente de observaciones, sino que son intentos para construir una explicación o modelo del fenómeno observado. Un pensador formal podrá manejar estas abstracciones, pero no un pensador concreto.

Con el propósito de medir el estado de pensamiento del estudiante diseñaron un instrumento consistente de dos tipos de tareas. La primera es sobre la *conservación del volumen*, que da evidencia de un pensamiento formal de un principiante. La segunda tarea es sobre la *exclusión de variables irrelevantes*, que permite observar el uso de lógica proposicional, que es un prerrequisito para el entendimiento de abstracciones. Renner y Lawson llevaron a cabo un

experimento con estudiantes, de niveles preuniversitario y universitario, a quienes se les aplicó el instrumento, evidenciando las diferencias en el razonamiento científico de los estudiantes de diferentes niveles educativos.

Coletta y Phillips (2005) investigaron sobre el aprendizaje de la mecánica introductoria de estudiantes de nivel universitario. El instrumento utilizado para medir el aprendizaje fue el diagnóstico FCI y la ganancia normalizada de Hake. El elemento nuevo que consideraron en este estudio fue la medición del razonamiento científico a través del diagnóstico de Lawson. Ellos observaron que, si bien hay una correlación débil entre el conocimiento previo del estudiante y el aprendizaje logrado, el razonamiento científico presenta una correlación mayor con el aprendizaje en cursos basados en metodologías de aprendizaje activo. Basados en esos resultados, Coletta, Phillips y Steinert (2007) proponen considerar el razonamiento científico en todo estudio que pretenda comparar el aprendizaje entre poblaciones diferentes con la finalidad de tener un cuadro más completo de lo que sucede.

Ates y Cataloglu (2007) han realizado un experimento fuera de Estados Unidos con la finalidad de conocer si hay correlaciones estadísticas entre el razonamiento científico, el conocimiento conceptual y las habilidades en la solución de problemas en un curso de mecánica introductoria. En particular se consideraron cursos con instrucción tradicional, no observándose correlación significativa entre el razonamiento científico, medido con el instrumento de Lawson, y el conocimiento conceptual, evaluado con el test FCI al final del curso.

MARCO CONTEXTUAL

El experimento fue realizado con estudiantes de ingeniería que cursaban su primera materia de física en el Tecnológico de Monterrey. Los grupos utilizados en el estudio fueron seleccionados libremente por los estudiantes. Todos los grupos fueron dictados por profesores con grado mínimo de maestría y con una experiencia en docencia superior a 10 años. Estos profesores han tenido contacto con metodologías de aprendizaje activo por

diversas capacitaciones previas, pero solo dos de seis grupos fueron impartidos con la metodología de modelación.

Los cuatro grupos restantes se dictaron de manera tradicional; el profesor presentaba la teoría, resolvía problemas frente a los estudiantes y aclaraba las dudas que los hacían los estudiantes. Estos cursos utilizaron el mismo libro de texto y cubrieron los mismos capítulos en el semestre.

Los dos grupos de modelación fueron impartidos por el mismo profesor, quien se capacitó previamente para dirigir un curso con esas características. Esta fue la primera vez que este profesor dictaba un curso de este tipo, por lo que cae en la categoría de novicio. En su curso no se utilizó un libro de texto, sino que todos los conceptos fueron construidos por los estudiantes dentro del salón de clases a través de trabajo colaborativo. Los equipos de trabajo fueron creados de manera aleatoria y cambiados cada mes para dar mayor dinamismo y evitar conflictos. En estos cursos se redujo la exposición por parte del profesor a menos de 10 minutos por sesión de 50 minutos.

Uno de los autores de este trabajo fue el encargado de observar las clases para asegurarse que las etiquetas tradicional y modelación correspondían a los grupos que entrarían en esta investigación.

METODOLOGÍA

En esta investigación se aplicaron los tests FCI al inicio y al final del curso con la finalidad de medir el aprendizaje conceptual por parte de los estudiantes y el conocimiento inicial con el que llegaron al curso. Este test puede tomar valores de 0 a 100 puntos, representando el porcentaje de aciertos del estudiante. Para establecer los conceptos que traen los estudiantes al curso se utiliza la primera de estas dos aplicaciones, FCIpre, mientras que para establecer el aprendizaje de conceptos se define el *coeficiente normalizado de aprendizaje personal* del estudiante como

$$G = \begin{cases} \frac{FCI_{post} - FCI_{pre}}{100 - FCI_{pre}} & \text{si } FCI_{pre} \leq FCI_{post} \\ \frac{FCI_{post} - FCI_{pre}}{FCI_{pre}} & \text{si } FCI_{pre} > FCI_{post} \end{cases}$$

Este coeficiente es definido de manera similar al coeficiente normalizado de Hake, sin embargo se ha hecho una extensión para tomar en cuenta aquellos casos en los que se presente un puntaje de FCI_{post} menor al inicial. Con ello se tiene un coeficiente para cada estudiante que puede tomar valores entre -1 y 1. Si se alcanza el valor 1 indica que el estudiante alcanzó el máximo aprendizaje posible, mientras que la obtención de un -1 indica que el estudiante ha fallado en la totalidad de las preguntas del test en la segunda aplicación; un coeficiente 0 en un estudiante indicaría que obtiene el mismo puntaje al inicio y al final del curso.

Para medir el razonamiento científico del estudiante se utiliza el test de Lawson, aplicado al inicio del semestre, que puede tomar valores entre 0 y 100, que representa el porcentaje de aciertos del estudiante a las 24 preguntas pareadas que tiene el instrumento. Dependiendo de lo que obtenga el estudiante en este test, el estudiante puede clasificarse de acuerdo al tipo de razonamiento, que puede ser: (1) concreto, si obtiene un puntaje igual o inferior a 33.34, (2) formal, si el puntaje es mayor a 33.4 y menor a 75.00, y (3) postformal, si obtiene un puntaje superior a 75.00. Un estudiante está en el nivel más alto de la escala ordinal de razonamiento cuando consistentemente demuestra tener un razonamiento formal (Ates y Cataloglu, 2007).

Con apoyo de métodos estadísticos básicos se analizarán los resultados de estos tests y cómo los factores iniciales afectarán al aprendizaje conceptual de los estudiantes.

RESULTADOS

Al inicio del semestre los grupos estudiados presentaron los tests FCI y de Lawson con la finalidad de conocer su estado conceptual inicial y su razonamiento científico respectivamente. En la tabla 1 se presentan los resultados para estos tests que no presentaron diferencias estadísticas significativas en sus medias, por cuando la prueba no paramétrica de

Kruskal-Wallis no las evidenció; $H(5, N=151) = 1.237, p = 0.941$ para el FCI inicial y $H(5, N=151) = 2.419, p = 0.789$ para el test de Lawson.

Tabla 1

Conocimiento conceptual y razonamiento científico de los grupos al iniciar el semestre

Grupo	n	Conocimiento conceptual		Razonamiento científico	
		media FCIpre	DE	media Lawson	DE
1 ^a	26	37.35	15.27	43.59	22.89
2 ^a	22	36.50	11.64	46.97	17.36
3 ^a	21	35.52	13.57	44.84	20.15
4 ^a	25	36.72	15.54	51.67	19.98
5 ^b	31	33.52	13.40	46.24	17.98
6 ^b	26	38.15	18.02	45.19	23.82

^a Grupos impartidos con metodología tradicional.

^b Grupos impartidos con metodología de modelación.

Con la nueva aplicación del FCI al final del curso, se calcula el coeficiente normalizado de aprendizaje personal G. Las medias de este coeficiente para todos los grupos del estudio están presentadas en la tabla 2. La prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis sí muestra diferencias significativas entre los grupos, $H(5, N=151) = 15.505, p < 0.01$. Repitiendo el análisis por tipo de instrucción se observa que no hay diferencias entre los grupos de un mismo tipo de instrucción. Por ejemplo, para los grupos con metodología tradicional, $H(3, N=94) = 0.498, p > 0.9$; mientras que en los grupos con metodología de modelación se aplicó la prueba no paramétrica de Kolmogorov-Smirnov Z obteniéndose $D = 0.485, p > 0.97$, lo que establece que las distribuciones de ambos grupos de modelación son muy similares.

Tabla 2

Ganancias en el aprendizaje conceptual para los diferentes grupos

Grupo	n	Aprendizaje conceptual	
		media G	DE
1 ^a	26	.149	.240
2 ^a	22	.094	.267
3 ^a	21	.118	.336
4 ^a	25	.096	.238
5 ^b	31	.257	.297
6 ^b	26	.332	.264

^a Grupos impartidos con metodología tradicional.

^b Grupos impartidos con metodología de modelación.

De esta manera las medias para las ganancias de aprendizaje conceptual son mayores para los estudiantes que cursaron la materia con la metodología activa, 0.291 (DE = 0.285), que los que estuvieron inscritos en los cursos con metodología tradicional, 0.115 (DE = 0.266).

Finalmente, para buscar una respuesta a la pregunta de investigación propuesta, interesa conocer la relación entre las características iniciales de los estudiantes y su aprendizaje conceptual. Para ello se calcularon los coeficientes de correlación no paramétrica de Spearman. Para los estudiantes en los grupos tradicionales no se pudo evidenciar una relación significativa entre el FCI inicial y el coeficiente G, sin embargo para los estudiantes en grupos de modelación si se pudo establecer un coeficiente de correlación 0.401 ($p < 0.002$).

Para estudiar la relación entre el razonamiento científico y el coeficiente G se utilizó la recodificación del test de Lawson en términos de los estados de razonamiento concreto, formal y postformal. Este factor de razonamiento si presentó correlación significativa en ambos tipos de instrucción; para los estudiantes de grupos tradicionales se obtuvo un

coeficiente de correlación 0.349 ($p < 0.001$), mientras que para los estudiantes en los grupos con modelación se encontró 0.526 ($p < 0.001$).

CONCLUSIONES

En esta investigación se estuvo interesado en el aprendizaje conceptual de estudiantes que cursaron mecánica en un nivel introductorio en la universidad con una metodología de modelación. Estudios preliminares en universidades y preparatorias en Estados Unidos (Jackson, Dukerich y Hestenes, 2008) mostraban que con esta metodología se lograba un aprendizaje conceptual mayor que en curso con metodología tradicional (Hake, 1998), lo que fue observado en este experimento. Más aún, los grupos con modelación obtuvieron una ganancia por arriba del doble de los grupos tradicionales, como había sido observado para profesores novicios. Aún cuando el objetivo de la normalización del coeficiente de aprendizaje es la posibilidad de comparar grupos inicialmente diferentes, en este experimento se cuidó contar con la similitud inicial de los grupos en los dos factores considerados en el estudio, el estado conceptual inicial y el razonamiento de los estudiantes.

Con relación a la importancia de los factores iniciales en el aprendizaje con esta metodología de modelación, se observó una correlación positiva débil entre el estado conceptual inicial del estudiante y su aprendizaje, y una correlación positiva media entre el razonamiento científico del estudiante y su aprendizaje. Lo que concuerda con Coletta y Phillips (2005), quienes encontraron que el razonamiento es importante en el aprendizaje y por lo tanto debe tomarse en cuenta en todo estudio sobre aprendizaje (Coletta, Phillips y Steinert, 2007).

En este trabajo se muestra que el razonamiento científico juega un papel más importante que el conocimiento previo que pueda tener el estudiante al inicio del curso. En un curso con metodología tradicional se observa una correlación positiva débil entre el razonamiento científico y el aprendizaje de los estudiantes, es decir, con esa metodología de instrucción el razonamiento no fue un factor tan importante (Ates y Cataloglu, 2007) como en el caso de la instrucción por modelación.

Finalmente esta investigación exploratoria muestra evidencia que el mayor aprendizaje observado con la metodología de modelación podría deberse a un mejor aprovechamiento del razonamiento científico que tiene el estudiante por contraste con los estudiantes que aprendieron tradicionalmente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de los profesores que dieron facilidades para que puedan aplicarse los diferentes tests en sus grupos y aceptaron ser observados en su trabajo en el salón. También se agradece al profesor Carlos Muñiz por sus importantes recomendaciones con relación al análisis de los datos.

Este trabajo fue financiado por el Tecnológico de Monterrey a través de la Cátedra de Investigación sobre Enseñanza de la Física CAT150.

REFERENCIAS

- Ates, S. y Cataloglu, E. (2007). "The effects of students' reasoning abilities on conceptual understandings and problem-solving skills in introductory mechanics", *European Journal of Physics*, 28(6), 1161-1171.
- Coletta, V. P. y Phillips, J. A. (2005). "Interpreting FCI scores: Normalized gain, preinstruction scores, and scientific reasoning ability", *American Journal of Physics*, 73(12), 1172-1182.
- Coletta, V. P.; Phillips, J. A. y Steinert, J. J. (2007). "Why you should measure your students' reasoning ability", *The Physics Teacher*, 45(4), 235-238.
- Hake, R. R. (1998). "Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses", *American Journal of Physics*, 66(1), 64-74.
- Halloun, I. A. y Hestenes, D. (1987). "Modeling instruction in mechanics", *American Journal of Physics*, 55(5), 455-462.
- Hestenes, D. (1987). "Toward a modeling theory of physics instruction", *American Journal of Physics*, 55(5), 440-454.
- Hestenes, D.; Wells, M. y Swackhamer, G. (1992). "Force concept inventory", *The Physics Teacher*, 30(3), 141-158.
- Jackson, J.; Dukerich, L. y Hestenes, D. (2008). "Modeling instruction: An effective model for science education", *Science Educator*, 17(1), 10-17.

- Powell, K. (2003). "Spare me the lecture", *Nature*, 425(6955), 234-236.
- Redish, E. F. (2003). *Teaching physics with the physics suite*. Somerset, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- Renner, J. W. y Lawson, A. E. (1973a). "Piagetian theory and instruction in physics", *The Physics Teacher*, 11(3), 165-169.
- Renner, J. W. y Lawson, A. E. (1973b). "Promoting intellectual development through science teaching", *The Physics Teacher*, 11(5), 273-276.
- Wells, M. y Hestenes, D. (1995). "A modeling method for high school physics instruction", *American Journal of Physics*, 63(8), 606-619.