

Modelación computacional apoyada en el uso del diagrama V de Gowin para el aprendizaje de conceptos de dinámica newtoniana

Sonia López Ríos¹, Eliane Angela Veit² e Ives Solano Araujo²

¹Facultad de Educación, Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia. E-mail: slopez@fisica.udea.edu.co. ²Instituto de Física – UFRGS – Porto Alegre, RS – Brasil. E-mails: eav@if.ufrgs.br, ives@if.ufrgs.br

Resumen: El propósito de este trabajo fue realizar un estudio exploratorio sobre el proceso de aprendizaje de algunos conceptos básicos de dinámica newtoniana, a través de la implementación de actividades de modelación computacional haciendo uso del diagrama AVM (Adaptación del diagrama V de Gowin a la Modelación Computacional). La fundamentación teórica está soportada en la Teoría del aprendizaje significativo de Ausubel, en la modelación esquemática de Halloun y en la modelación computacional con diagrama AVM. Los resultados de esta investigación indican un desempeño satisfactorio de los estudiantes en la realización de estas actividades que se traduce no solo en la gran contribución de éstas para el aprendizaje de conceptos de dinámica newtoniana, sino también en su influencia positiva en la predisposición de los estudiantes para aprender conceptos físicos. Tales actividades fueron implementadas en un curso inicial de física con 23 estudiantes de Licenciatura en Ciencias Naturales y Educación Ambiental de la Universidad de Antioquia, Colombia.

Palabras clave: aprendizaje significativo, enseñanza de la física, modelación computacional, diagrama AVM, dinámica newtoniana.

Title: Computer modeling based on the use of AVM diagram for learning concepts of Newtonian dynamics.

Abstract: The purpose of this work was to conduct an exploratory study on the learning process of some basic concepts of Newtonian dynamics, through computational modeling activities using the AVM diagram (Adaptation of the Gowin's V diagram to Computational Modeling). The theoretical framework is based on Ausubel's meaningful learning theory, on Halloun's schematic modeling and on the computational modeling with AVM diagram. The results of this research indicate a satisfactory performance of students in conducting these activities, which is translated not only into a great contribution for learning concepts of Newtonian dynamics, but also in the positive influence of the computational modeling on the students' predisposition to learn physical concepts. Such activities were implemented in an initial course of physics enrolled by 23 students (prospective teachers) of the Natural Sciences and Environmental Education of the University of Antioquia, Colombia.

Keywords: meaningful learning, physics teaching, computational modeling, AVM diagram, Newtonian dynamics.

Introducción

Es innegable la amplia relevancia que ha tenido en las últimas décadas el uso de las tecnologías computacionales en el campo científico y específicamente en la Educación en Ciencias, en donde ha aportado un enorme beneficio a partir de las diferentes modalidades de su uso, ya sea en recolección y análisis de datos, en graficación, comunicación, simulación de fenómenos un tanto abstractos, entre otras. Sin embargo, el proceso de incorporación de las tecnologías computacionales en el aula de clase requiere de un enfoque didáctico que permita a los docentes tener una visión acerca de cómo los estudiantes aprenden conceptos científicos mediante el uso de estas potenciales herramientas. Particularmente para la enseñanza de la física, se han incorporado diferentes usos de las tecnologías computacionales, resaltándose en este trabajo la modelación y simulación computacional como una herramienta cognitiva en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la física, que posibilita el diseño e interacción con modelos conceptuales que, por lo menos en principio, puedan ser implementados en el computador y tengan fines didácticos.

Los modelos a los que nos referimos en este trabajo son modelos conceptuales, vistos como representaciones simplificadas e idealizadas de un sistema o fenómeno físico. Desde la perspectiva de Norman (1983), estos modelos conceptuales son inventados por profesores, investigadores, científicos e ingenieros y son proyectados como herramientas para el entendimiento o para la enseñanza de sistemas físicos. Y en el ámbito de este estudio, se pretende justamente que mediante el proceso de modelación, los modelos idiosincrásicos y tácitos (representaciones internas) que poseen los estudiantes, se conviertan en modelos explícitos (representaciones externas) que se aproximen cada vez más a los modelos científicamente aceptados. Asimismo, en el marco de este estudio nos referimos a la modelación desde la perspectiva de Hestenes (1995), quien la considera como un proceso cognitivo que tiene como propósito fundamental la construcción y uso de modelos conceptuales.

A pesar de las múltiples estrategias implementadas en el aula de clase para abordar la enseñanza de conceptos de dinámica newtoniana, son pocos los trabajos de investigación que se encuentran en relación con el uso de la modelación computacional como estrategia de enseñanza para abordar este campo de conocimiento; y en éstos, difícilmente la modelación computacional es acompañada por una herramienta que oriente al alumno en el proceso de exploración y construcción de modelos; y mucho menos de un referente teórico que le aporte al profesor evidencias del aprendizaje del alumno a partir de la utilización de dicha estrategia.

Con el propósito de subsanar algunas de estas dificultades y de aportar una visión más amplia en relación con el uso de herramientas computacionales en el aula de clase desde un enfoque teórico y metodológico que guíe dicho proceso, se presenta una propuesta didáctica que consta de una serie de actividades de modelación computacional construidas con el software Modellus 2.5 (Teodoro, 1998, 2010). Estas actividades fueron presentadas en forma de situaciones-problema, abordando superficialmente el campo de la cinemática y profundizando más en el campo de la dinámica newtoniana. Se introduce también el uso del

diagrama AVM (Adaptación de la V de Gowin a la Modelación Computacional) como una herramienta que apoya y orienta a los estudiantes en el proceso de exploración e interacción con los modelos computacionales. Dicha propuesta está fundamentada en las siguientes preguntas orientadoras de la investigación: ¿Cuál es la contribución de la modelación computacional mediante el uso de diagramas AVM?: (a) al aprendizaje de conceptos de dinámica newtoniana, y (b) a la predisposición del estudiante para el aprendizaje de conceptos físicos.

En lo que sigue se presenta la fundamentación teórica de este trabajo, sustentada principalmente en la Teoría del Aprendizaje Significativo de David Ausubel, el referente de Halloun sobre Modelación Esquemática y la Modelación Computacional con diagrama AVM como eje fundamental del estudio. Asimismo se presentan la metodología y los principales resultados obtenidos.

Fundamentación teórica

El enfoque teórico que orienta este trabajo está fundamentado en la Teoría del Aprendizaje Significativo de David Ausubel, como una teoría psicológica cognitivista con un enfoque constructivista que considera el aprendizaje como un proceso en el que una nueva información (estructura de conocimiento organizada, clara y diferenciada) interactúa con aspectos relevantes (subsunoers) de la estructura cognitiva del individuo que aprende, caracterizados por su grado de claridad, estabilidad y diferenciación (Ausubel, 2002). De acuerdo con este autor, para que el aprendizaje sea significativo, se requiere de un material potencialmente significativo y la disposición del alumno para relacionarlo sustancial y no arbitrariamente con su estructura cognitiva preexistente. Desde esta perspectiva teórica es diseñado el material potencialmente significativo, constituido por los modelos computacionales y los diagramas AVM; y atendiendo a los principios de diferenciación progresiva y reconciliación integradora, así como al significado lógico y psicológico que debe tener un material de enseñanza con estas características.

Otro fundamento teórico de este trabajo es la modelación esquemática de Halloun, "una teoría epistemológica enmarcada en una investigación cognitiva; epistemológica en el sentido de que hace uso de un proceso de modelación para construir el conocimiento científico" (Halloun, 2004). Este autor considera los modelos como los mayores componentes del conocimiento de una persona y la modelación como un proceso cognitivo para la construcción y empleo del conocimiento; centrándose en el principio de que, en física, el aprendizaje del alumno será tanto más significativo cuanto mayor sea su capacidad de modelar. Este referencial teórico es abordado por su pertinencia para trabajar en el campo de la mecánica; por ser una estrategia instruccional que brinda herramientas para externalizar los modelos conceptuales; pero sobre todo, por su conveniencia para el diseño de las actividades de modelación a partir de los cinco estadios: selección, construcción, validación, análisis y expansión de un modelo (Halloun, 2004).

La figura 1 muestra el proceso de modelación esquemática que puede ser sistemáticamente aplicado en el contexto de una teoría conveniente para la

construcción de nuevos modelos, refinándolos y empleándolos en situaciones específicas (situaciones del mundo real, experimentos de laboratorio o problemas de libros de texto) (Hestenes apud Halloun, 1996).

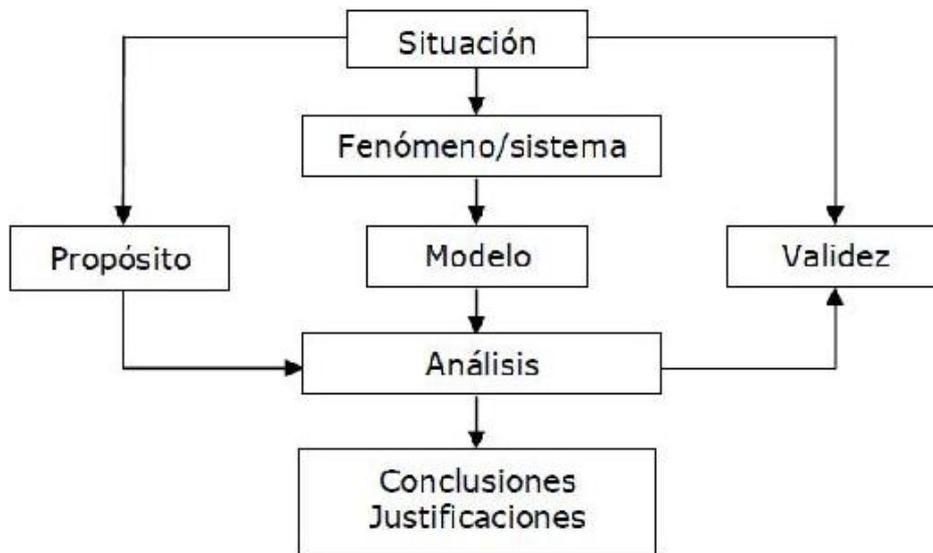


Figura 1.- Representación esquemática del proceso de Modelación. (Hestenes apud Halloun, 1996).

Modelación computacional con diagrama AVM

Antes de hacer referencia al diagrama AVM como una estrategia que puede ser utilizada por los docentes e investigadores de la Enseñanza de la Física para orientar los procesos de modelación y simulación computacional al interior del aula de clase, es necesario establecer una diferenciación entre lo que se entiende por modelación y simulación computacional, expresiones utilizadas en muchas ocasiones de manera indiscriminada. En este sentido, Araujo, Veit y Moreira (2007) afirman que “estos dos tipos de actividades se distinguen por el acceso que el alumno tiene al modelo matemático o icónico subyacente a la implementación de la actividad”. Es decir, desde la visión de estos autores, en una simulación computacional que representa un modelo físico, el alumno puede insertar valores iniciales para variables, alterar parámetros y, de forma limitada, modificar las relaciones entre las variables; pero no tiene autonomía para modificar la estructura de la simulación (modelo matemático o icónico pre-especificado); o sea, acceso a los elementos más básicos que la constituyen. La interacción del estudiante con la simulación tiene un carácter eminentemente exploratorio; mientras que en la modelación computacional el estudiante tiene acceso a los primitivos que constituyen el modelo computacional, pudiendo construirlos desde el principio y reconstruirlos conforme desee.

Araujo, Veit y Moreira (2007), siguiendo la propuesta de Bliss y Ogborn (1989), hacen alusión a dos modos básicos de usar las actividades de modelación computacional: el modo exploratorio y el modo expresivo. Las actividades exploratorias son caracterizadas por la observación, análisis e interacción del sujeto con modelos computacionales ya construidos, en el intento de permitir al alumno la percepción y la comprensión de las eventuales relaciones entre la matemática subyacente al modelo y el

fenómeno físico en cuestión. En este tipo de actividad, el alumno tiene acceso a la estructura básica del modelo implementado, pudiendo modificarlo si desea. Las actividades de modelación computacional de tipo expresivo se caracterizan por el proceso de construcción del modelo desde su estructura matemática hasta el análisis de los resultados generados por él. El alumno puede interactuar totalmente con su modelo, pudiendo reconstruirlo tantas veces como le parezca necesario para la producción de resultados que le sean satisfactorios.

Sin duda alguna la modelación computacional se ha convertido en una gran herramienta para la enseñanza de las ciencias, ya que permite dar cuenta de un fenómeno estudiado desde distintos puntos de vista, de modo más simple y directo que la experimentación convencional en un laboratorio; y además nos permite construir una idea, representación, imagen o modelo mental a partir de imágenes externas; necesarias para la comprensión del mundo físico. Sin embargo, la inclusión de la modelación computacional en el aula de clase requiere de referentes teóricos y metodológicos que orienten el proceso de construcción y análisis de los modelos; y que permitan visualizarlo como un proceso de construcción de conocimiento. Por esta razón, se propone el diagrama AVM desde sus dominios conceptual y metodológico, como una herramienta que permite explorar y/o construir modelos computacionales, abordando todos y cada uno de los componentes necesarios para su comprensión; y que de acuerdo con Araujo, Veit y Moreira (2007), tiene como objetivo primordial fomentar la reflexión crítica por parte de los alumnos sobre los modelos físicos abordados, contribuyendo así a un aprendizaje significativo y facilitando el proceso de metacognición.

El diagrama AVM es una estrategia de enseñanza-aprendizaje que pretende apoyar a los estudiantes en el proceso de interacción con actividades de modelación computacional y permitir al profesor o investigador valorar la contribución de dichas actividades al aprendizaje significativo de la física. Así, Araujo (2005) presenta el diagrama AVM como un instrumento heurístico elaborado a partir de la adaptación de la V de Gowin para actividades que involucran el uso de modelación computacional.

El formato V es adoptado por evidenciar la interacción entre los dos dominios indispensables para la construcción de un modelo computacional dirigido al proceso de enseñanza-aprendizaje de la Física: el dominio teórico relacionado con la concepción del modelo computacional y el dominio metodológico asociado a la implementación y/o exploración de este modelo. La figura 2 muestra cada uno de los componentes del diagrama AVM. Es importante resaltar que hay una permanente interacción entre los dos lados del diagrama, de modo que todo lo que es hecho en el lado metodológico está guiado por los componentes del lado teórico o conceptual, con el objetivo de construir/analizar el modelo y responder las preguntas foco.

Metodología

El propósito fundamental de este estudio fue posibilitar en los estudiantes la comprensión de los principales conceptos relativos a la dinámica newtoniana y el establecimiento de relaciones entre éstos; así como valorar la actitud asumida por los estudiantes frente a las actividades de

modelación computacional como estrategia de enseñanza-aprendizaje. El estudio se llevó a cabo durante el primer semestre lectivo de 2008 con un grupo de 23 estudiantes que cursaban la asignatura Física I del programa de Licenciatura en Ciencias Naturales y Educación Ambiental de la Universidad de Antioquia, Colombia.

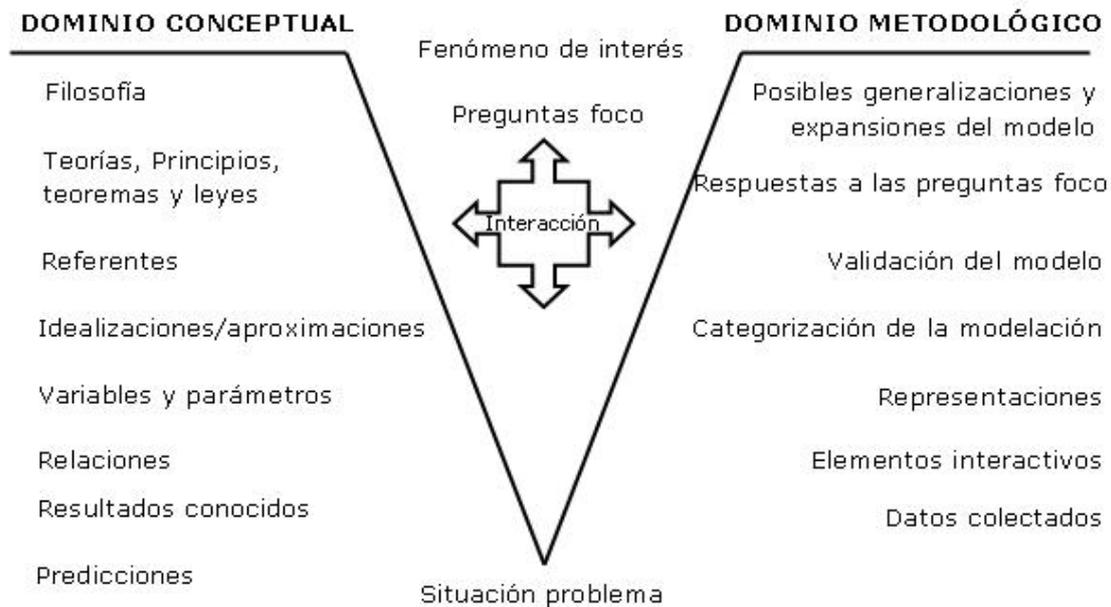


Figura 2.- Diagrama AVM: Adaptación de la V de Gowin para la modelación computacional (Araujo, 2005).

En coherencia con el referente teórico abordado, en la primera fase de la investigación se buscó identificar los conceptos previos -acerca de la dinámica newtoniana- pertinentes y disponibles en la estructura de conocimiento de los estudiantes, el grado de apropiación de estos conceptos y las relaciones establecidas entre ellos. Se indagó por conceptos como: fuerza, movimiento, aceleración, entre otros; cuya enseñanza ha sido abordada desde diferentes estrategias metodológicas, pero siguen siendo conceptos de difícil comprensión por parte de los estudiantes, quienes llevan al aula de clase un conjunto diverso de ideas fuertemente arraigadas, que bien pueden ser producto de sus propias experiencias o de la instrucción escolar; pero de cualquier forma difieren enormemente de la interpretación newtoniana (Sebastia, 1984; Terry, Jones y Hurford, 1985; Halloun y Hestenes, 1985a; Halloun y Hestenes, 1985b; Hewson, 1990; Hestenes, Wells y Swackhamer, 1992a; Valente y Neto, 1992; Hennessy et al., 1995; Li, Borne y O'shea, 1996; Talim, 1999; Tao y Gunstone, 1999; Veit, Mors y Teodoro, 2002; Hülsendeger, 2004; Espinoza, 2005; Poon, 2006; Sánchez, 2007; Covián y Celemín, 2008).

Para tal fin se aplicó el test americano Force Concept Inventory (test FCI) como pretest. Este es un reconocido test de escogencia múltiple diseñado por Hestenes, Wells y Swackhamer (1992a, 1992b), que consta de 30 preguntas conceptuales con cinco alternativas de respuesta cada una, donde sólo una de ellas corresponde a la visión newtoniana. Este test que traducido al castellano denominamos "cuestionario sobre el concepto de

fuerza", permite hacer un completo y sistemático análisis del concepto de fuerza desde la perspectiva newtoniana.

Posteriormente se da inicio a la implementación de la propuesta didáctica concreta, la cual contempló varias actividades de modelación computacional de tipo exploratorio haciendo uso del diagrama AVM; en cada una de ellas fue presentado un modelo computacional ya construido y previamente definidos los campos del diagrama AVM: fenómeno de interés, situación problema y preguntas foco. En la interacción con los modelos computacionales, los alumnos tuvieron acceso inclusive a la ventana del modelo donde la estructura matemática de éste podía ser observada, pero no se realizó ninguna modificación en ella. La elaboración reflexiva del diagrama AVM sirvió como una guía para la exploración del modelo de manera que se respondieran las preguntas foco. Estas actividades constituyeron el material potencialmente significativo y fueron implementadas partiendo de la idea de que pueden ser una estrategia particularmente útil para lograr una motivación del estudiante hacia el aprendizaje, condición necesaria para que se logre un aprendizaje significativo desde la perspectiva ausubeliana.

Las actividades de modelación computacional hicieron parte de la programación del curso, siendo complementarias a las actividades de aula y sin pretender reemplazar la actividad experimental; y la implementación de cada actividad fue posterior al estudio de los respectivos contenidos. Esta intervención fue desarrollada durante 20 horas, en las que se realizaron diez encuentros de dos horas cada uno; donde el primero de ellos fue una sesión expositiva por parte del profesor investigador quien dio a conocer la metodología de trabajo que sería implementada e hizo entrega a los estudiantes del diagrama AVM con una breve descripción de cada uno de sus elementos -Anexo 1-. Las reacciones de los estudiantes no se hicieron esperar; atribuyéndole a este diagrama una gran complejidad; tanto por su forma, la cual sugería una interacción entre dominio conceptual y metodológico, como por la comprensión del significado de la gran mayoría de sus componentes.

En las nueve sesiones restantes, la intervención se realizó en la sala de informática donde los estudiantes trabajaron en grupo formando diez duplas y un trío -un grupo por computador-; y fueron expuestos a un conjunto de actividades de modelación computacional de tipo exploratorio, donde tenían como tarea describir los diferentes componentes del dominio conceptual y metodológico del diagrama AVM a partir de la exploración de cada modelo. Durante el desarrollo de estas actividades tuvieron un permanente acompañamiento del profesor investigador para atender inquietudes relacionadas tanto con el manejo del software como con aspectos físicos y matemáticos involucrados en la ejecución de los modelos. Además, se permitió a los estudiantes la consulta libre a textos de apoyo y a las notas de clase.

Aunque el interés principal de este estudio se centra en el aprendizaje de conceptos de dinámica newtoniana, en las cuatro primeras sesiones (de las nueve contempladas en la intervención con actividades computacionales), se utilizaron modelos de cinemática que tenían como objetivo familiarizar a los estudiantes tanto con la operación del software utilizado como con el

uso del diagrama AVM para actividades de modelación computacional. En las cinco sesiones restantes se presentaron a los estudiantes las actividades de modelación computacional de tipo exploratorio que abordaban concretamente el estudio de conceptos de dinámica newtoniana, tales como: sistemas de referencia, movimiento, posición, velocidad, aceleración, fuerza y masa.

Finalizado el proceso de intervención con el material potencialmente significativo, se aplicó el test FCI como postest, con el objetivo de hacer una valoración de la comprensión lograda por los estudiantes de los conceptos de dinámica newtoniana abordados en las actividades de modelación computacional. Posteriormente se realizó una entrevista en la que se pretendía indagar a diez de los estudiantes del curso –elegidos aleatoriamente- sobre su experiencia con la modelación computacional y el diagrama AVM para el aprendizaje de conceptos de dinámica newtoniana.

Como otra fuente de información, un cuaderno de notas fue llevado por el profesor investigador, quien realizó una observación, registro y descripción permanente de todas las actividades desarrolladas en el aula de clase; haciendo referencia principalmente a las actitudes (positivas y negativas) de los estudiantes; y en general, haciendo una valoración del ambiente de interacción que logra propiciarse a partir de esta intervención. Las fuentes de información utilizadas en este estudio -observación, entrevista, registros de pretest y postest, cuaderno de notas y documentos (diagramas AVM) realizados por los estudiantes- fueron trianguladas; y su análisis fue realizado desde una perspectiva cualitativa que permite determinar las categorías conceptuales que surgen de la interpretación de los datos.

Para el campo de la cinemática, fueron diseñados cuatro modelos computacionales para abordar tópicos como: Movimiento Rectilíneo Uniforme (MUR), Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado (MRUA), Caída libre y tiro parabólico; y para el campo de la dinámica newtoniana, se diseñaron cinco modelos para abordar fenómenos físicos tales como: la relación fuerza-aceleración, la fuerza de fricción, física en el ascensor, el problema del paracaídas y la máquina de Atwood. Estas actividades comprendieron los principales conceptos de interés para este estudio. Se presentan aquí dos ejemplos de las actividades de modelación de tipo exploratorio; uno de ellos para cinemática y el otro para dinámica.

El primer ejemplo muestra una actividad exploratoria de cinemática cuya ilustración es presentada en la figura 3. En el modelo diseñado para ilustrar el Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado, los estudiantes tenían como tarea analizar el movimiento de dos carros que se desplazaban en línea recta con diferentes aceleraciones; para lo cual se brindaba la opción de modificar valores como posición inicial y velocidad inicial para cada carro. Para cada carro son aportadas las gráficas de posición, velocidad y aceleración contra tiempo, así como los vectores velocidad y aceleración.

El segundo ejemplo se refiere a una actividad de dinámica y su ilustración es presentada en la figura 4. Este modelo pretende estudiar la cinemática y dinámica del movimiento de objetos sólidos en presencia de fricción; proponiéndose el movimiento de un bloque que se desliza sobre una superficie con fricción. En la interacción con el modelo los estudiantes

podían modificar los valores de los coeficientes de fricción estático y cinético. Además, eran aportadas las gráficas de la fuerza aplicada, la fuerza de fricción y el coeficiente de fricción en función del tiempo.

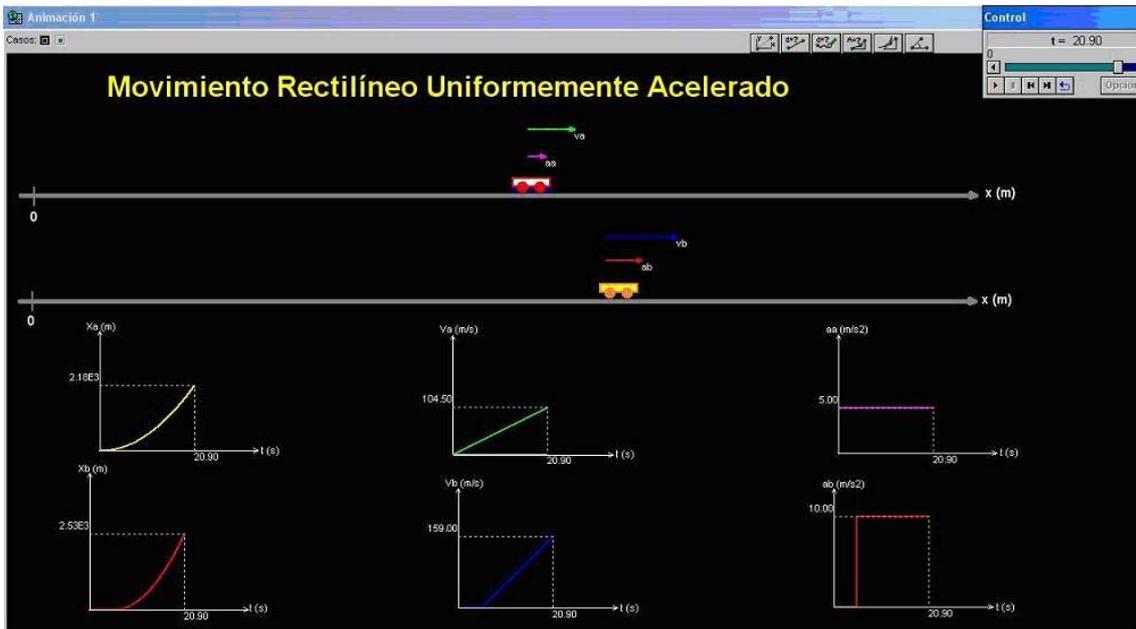


Figura 3.- Vista de la pantalla del modelo computacional para el Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado.

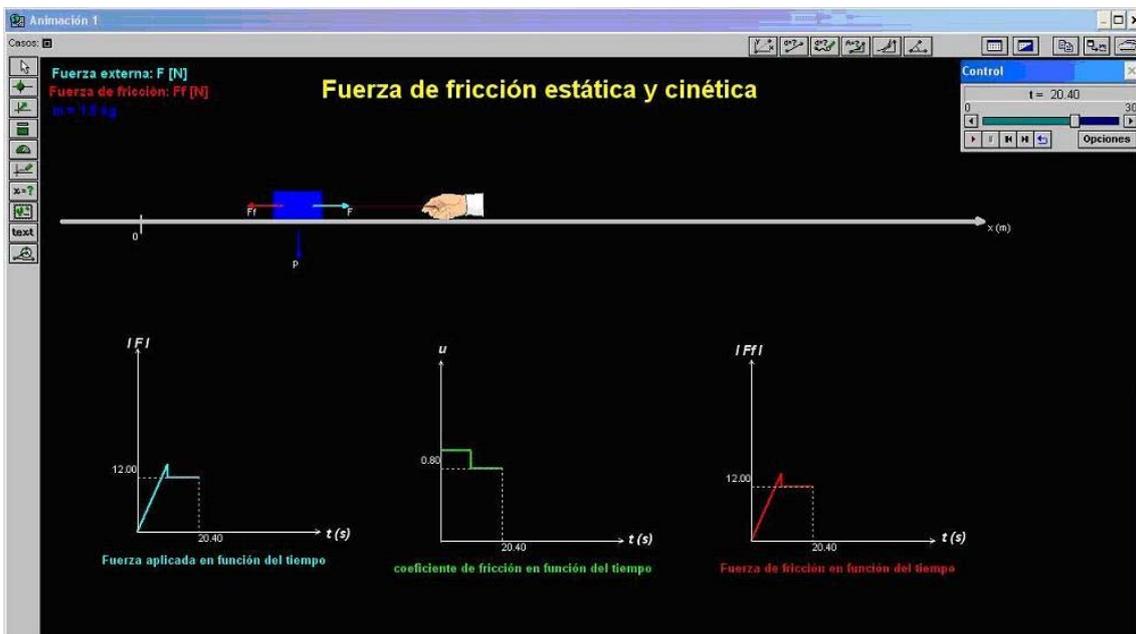


Figura 4.- Vista de la pantalla del modelo computacional para el estudio de la fuerza de fricción.

A continuación se presenta una síntesis de los principales resultados obtenidos en este estudio.

Resultados y discusión

Se inicia con el análisis del test FCI, cuyos ítems están clasificados por Hestenes, Wells y Swackhamer (1992a), en seis categorías que comprenden el concepto de fuerza desde una perspectiva newtoniana. Estas categorías y sus respectivos ítems se muestran en la tabla 1 y son adoptadas para el análisis del pretest y postest aplicados en este estudio. Pues de acuerdo con Hestenes y Halloun (1995), "éstas permiten realizar el análisis conceptual y la interpretación de los resultados del test".

Al respecto es importante resaltar que somos conocedores del debate entre Huffman-Heller y Hestenes-Halloun en torno a la definición de las categorías del test FCI (Hestenes y Halloun, 1995a, 1995b; Huffman y Heller, 1995a, 1995b); por lo que en el ámbito de este estudio el test FCI es esencialmente utilizado como pretest para diagnosticar las ideas previas de los estudiantes en relación con el concepto de fuerza. Del mismo modo, el test FCI fue aplicado al final de la intervención como postest; sin embargo, los resultados obtenidos no fueron utilizados para tomar decisiones sobre los estudiantes a nivel individual; y el progreso de los estudiantes en el campo de la dinámica newtoniana fue esencialmente valorado a partir de los diferentes instrumentos de recolección de datos implementados en este estudio.

Categorías conceptuales del concepto de fuerza	Conceptos newtonianos abordados en cada categoría	Ítems Relacionados
1. Cinemática	Velocidad discriminada de la posición Aceleración discriminada de la velocidad Aceleración constante implica: órbita parabólica, cambio de velocidad Vector adición de velocidades	7, 20, 21, 23, 24, 25
2. Primera ley	Sin fuerza: velocidad constante Con fuerzas que se cancelan	4, 6, 8, 10, 18, 26, 27, 28
3. Segunda ley	Fuerza impulsiva Fuerza constante implica aceleración constante.	6, 7, 24, 25
4. Tercera ley	Para fuerzas impulsivas Para fuerzas continuas	2, 11, 13, 14
5. Superposición	Vector suma Cancelación de fuerzas.	9, 18, 19, 28
6. Clases de fuerza	Contacto entre sólidos: pasivo, impulsivo, fricción opuesta al movimiento. Contacto con fluidos: resistencia del aire, presión del aire. Gravitación: aceleración independiente del peso. Trayectoria parabólica.	1, 3, 5, 9, 12, 15, 16, 17, 18, 22, 23, 29, 30

Tabla 1.- Categorías de conceptos newtonianos en el test FCI.

El análisis y discusión de los resultados del test FCI es realizado a partir de la valoración de las respuestas de los estudiantes para cada una de las

seis categorías previamente establecidas. El desempeño de los estudiantes en el pretest y postest en las diferentes categorías del test FCI es mostrado en la tabla 2; donde el puntaje total para determinada categoría se obtiene al sumar el puntaje de cada estudiante para cada uno de los ítems que componen esa categoría.

Categorías de análisis del test	Puntaje máximo posible	Puntaje total test inicial	Puntaje total test final	N	T	Nivel de significancia (Wilcoxon) α
1. Cinemática	138	41	98	22	0	0.01
2. Primera ley	184	59	114	19	2	0.01
3. Segunda ley	92	41	69	19	13	0.01
4. Tercera ley	92	16	48	16	8	0.01
5. Superposición	92	21	47	17	16.5	0.01
6. Clases de fuerza	299	93	167	21	6	0.01

Tabla 2.- Desempeño de los estudiantes en las categorías de análisis del pretest y postest.

En las tres últimas columnas de la tabla 2 se muestran los resultados de la aplicación de la prueba no paramétrica de Wilcoxon (Siegel, 1972), que aporta los valores de N, T y su respectivo nivel de significancia, permitiendo detectar una diferencia estadísticamente significativa entre pretest y postest para las seis categorías del test. El análisis fue realizado con el paquete estadístico SPSS, versión 16.0. La tabla de valores críticos de T en la prueba de los rangos señalados de pares igualados de Wilcoxon (ibid., p. 288), sugiere que puede rechazarse H_0 (el desempeño de los estudiantes en el pretest no difiere de su desempeño en el postest) a un nivel de significancia 0.01; lo que implica que se acepta H_1 : el puntaje de los estudiantes en el pretest es diferente de su puntaje en el postest.

En relación con la primera categoría denominada cinemática (tabla 1); la aplicación del test FCI como pretest pone de manifiesto dificultades de los estudiantes en relación con los conceptos "intervalo de tiempo" e "instante de tiempo"; conceptos entre los cuales no se establece una clara diferenciación, considerándolos como equivalentes. Estas mismas dificultades son encontradas por Henderson (2002); y Covián y Celemín (2008). Dentro de esta misma categoría, se encuentra que dieciséis de los veintitrés estudiantes no tienen claro los conceptos de movimiento, posición, velocidad y aceleración, por lo que no establecen diferencias entre ellos. Por ejemplo, no conciben la aceleración como un cambio de velocidad en el tiempo; y de hecho, no consideran relación alguna entre estas dos variables.

En relación con la categoría 2 referente a la primera ley de Newton, puede decirse que quince estudiantes no poseen una clara comprensión de esta primera ley, mostrando una fuerte tendencia a una visión aristotélica del movimiento. Estos mismos estudiantes consideran que no es posible que un objeto pueda estar en movimiento sin que exista una fuerza neta

aplicada sobre él; es decir, no establecen relación entre la velocidad constante y la ausencia de una fuerza neta. De igual manera, no hay evidencia en los estudiantes de un reconocimiento del efecto de la fuerza de fricción sobre un objeto en movimiento.

La tercera categoría, denominada segunda ley de Newton tiene como objetivo reconocer las relaciones establecidas por los estudiantes entre los conceptos de fuerza y aceleración. En el pretest se evidencian dificultades en trece de los veintitrés estudiantes para identificar las fuerzas que actúan sobre un objeto en movimiento y determinar la función de éstas. Asimismo, nueve estudiantes tienen problemas para comprender el concepto de aceleración, dificultándoles el establecimiento de una relación entre éste y el concepto de fuerza. En relación con esta misma categoría, diecisiete de los veintitrés estudiantes no logran atribuir una aceleración constante a la aplicación de una fuerza constante; considerando que sólo hay aceleración en el caso en que la fuerza es incrementada.

Para la cuarta categoría denominada tercera ley, en el pretest se encuentra que veintiuno de los veintitrés estudiantes no hacen una adecuada interpretación del término interacción; presentando serias dificultades en comprender el sentido de los pares de fuerza; es decir, el par acción-reacción; pues normalmente al analizar la interacción entre dos objetos, le atribuyen un efecto dominante al objeto de mayor masa, asumiendo que es éste quien ejerce la mayor fuerza y no reconociendo que la fuerza ejercida por éste sobre el objeto de menor masa es exactamente igual en magnitud a la que el objeto de masa menor ejerce sobre el de mayor masa.

La categoría 5 que se designa como superposición hace referencia principalmente al vector suma de fuerzas y a la cancelación de las mismas; y a partir del análisis de esta categoría en el pretest, se encuentra que dieciocho estudiantes presentan dificultades tanto en el reconocimiento de las fuerzas como en la comprensión de las direcciones en que éstas actúan; razón por la cual se torna más complicado para ellos comprender conceptos como fuerza resultante o fuerza neta. Un caso especial en el que se hace evidente esta dificultad, se da cuando en un sistema estudiado se introduce el concepto de fuerza de fricción, el cual es bastante abstracto para los estudiantes.

Por último, en la categoría 6 denominada clases de fuerza, se encuentran varios obstáculos conceptuales de los estudiantes o creencias de sentido común que entorpecen la comprensión del concepto de fuerza en general; y en particular de las diferentes clases de fuerzas. Concretamente, dieciséis de los veintitrés estudiantes tienen una creencia que se remonta a los tiempos de Aristóteles, que es bastante arraigada y que se pone de relieve en el pretest; y es que tienen una fuerte tendencia a considerar que la caída de los objetos tiene una relación directa con su masa; es decir, que los objetos más pesados caen más rápido que los objetos livianos. En esta misma categoría para el análisis del pretest se hace referencia a la dificultad de quince de los estudiantes para comprender el movimiento de objetos en medios resistivos.

Al aplicar el test FCI como postest se encuentra -en términos generales- un progreso significativo de los estudiantes en la comprensión de los

conceptos de dinámica newtoniana, en relación con el pretest (tabla 2); logrando que más de la mitad de los estudiantes del curso adquirieran una comprensión adecuada de los conceptos involucrados en cuatro de las categorías del test FCI. Sin embargo, el postest pone de manifiesto la persistencia de algunas dificultades, describiéndose a continuación las más considerables: en relación con la cuarta categoría del test, denominada tercera ley, trece estudiantes aún no logran una adecuada comprensión del término interacción, atribuyéndole un efecto dominante al objeto de mayor masa. De la misma manera, para la categoría 5, llamada superposición, once estudiantes continúan teniendo dificultades en la comprensión del concepto de fuerza resultante o fuerza neta. Y en cuanto a la categoría 6, designada como clases de fuerza, diez estudiantes aún no han adquirido una buena comprensión del movimiento de objetos en medios resistivos.

El análisis cualitativo de los diagramas AVM diseñados por los estudiantes se realizó a la luz de dos grandes categorías: el dominio conceptual y el dominio metodológico, que corresponden a los campos de dicho diagrama, considerando los principales componentes de estos dominios como las subcategorías de análisis para las actividades de modelación computacional con diagrama AVM. En la tabla 3 se muestran las categorías y sus respectivas subcategorías.

Categorías de análisis del diagrama AVM	Subcategorías de análisis del diagrama AVM
1. Dominio conceptual	1.1 Teorías, principios, teoremas y leyes
	1.2 Idealizaciones
	1.3 Variables y parámetros
	1.4 Relaciones
	1.5 Resultados conocidos
	1.6 Predicciones
2. Dominio metodológico	2.1 Datos colectados
	2.2 Representaciones
	2.3 Validación del modelo
	2.4 Respuesta a las preguntas foco

Tabla 3.- Categorías de análisis para modelos computacionales con diagrama AVM.

Al inicio de la intervención los estudiantes mostraron dificultades para entender la función del diagrama AVM, así como para comprender el significado de componentes como: idealizaciones, resultados conocidos, predicciones, validación del modelo; y el papel desempeñado por éstos en las actividades de modelación computacional.

En el análisis de las actividades de cinemática, la primera categoría relacionada con el dominio conceptual, permite evidenciar el desconocimiento de los estudiantes acerca de las teorías y leyes que rigen el estudio de los fenómenos físicos; de la misma manera, se encuentran dificultades en la formulación de las idealizaciones, pasando por alto la descripción de este componente; y cuando esta descripción se realiza, no se

establecen relaciones con los referentes del sistema físico modelado. En cuanto a las variables y parámetros, no se logró una clara identificación de estos elementos, de sus representaciones simbólicas y la manera de expresarlas, visualizándose algunas inconsistencias en la determinación de las unidades; lo cual genera dificultades al pretender expresar en forma de ecuaciones las relaciones que regían el fenómeno físico que estaba siendo estudiado. Los resultados conocidos que permiten una validación inicial del modelo computacional, fue otro de los componentes más difíciles de comprender en el diseño del diagrama AVM; pues su formulación requería de una buena comprensión por parte de los estudiantes acerca del fenómeno físico estudiado; y aunque los contenidos conceptuales habían sido abordados previamente en el curso teórico, posiblemente no habían sido aún bien asimilados por ellos. Y en relación con las predicciones, la mayor dificultad que se detectó es que los estudiantes no conseguían formularlas en un momento previo a la interacción con el modelo computacional.

Para las mismas actividades de cinemática, en lo concerniente al dominio metodológico como segunda categoría de análisis, se encuentra que los estudiantes lograban identificar acertadamente los datos colectados, sobre todo cuando éstos aparecían de manera explícita en el modelo computacional. En cuanto a las representaciones, referentes a los gráficos, animaciones, tablas u otras formas de transformaciones de los datos; los estudiantes mostraron al inicio de las actividades, dificultades para identificar los diferentes vectores, haciendo un buen reconocimiento de las animaciones y las gráficas que establecían relaciones entre variables. En relación con la validación del modelo, todos los estudiantes tuvieron dificultades en comprender la manera en que ésta debía ser realizada; y además, la inadecuada formulación de los resultados conocidos entorpeció este proceso. Y por último, en las respuestas a las preguntas foco, considerado como uno de los principales componentes del diagrama AVM - debido a que permiten valorar la comprensión del modelo en su totalidad a partir de la interpretación de los registros, de las representaciones aportadas por el modelo y la valoración de las predicciones-, se manifiesta una enorme pobreza conceptual que se limita a expresiones sin ninguna profundidad o reflexión; y para las que en ocasiones se describe una ecuación como respuesta a una pregunta que indaga por la comprensión integral de una situación-problema abordada.

Para el análisis de las actividades de dinámica newtoniana en las que se centra la atención de este estudio, se presenta a continuación un breve resumen de las principales observaciones a cada una de las categorías - dominio conceptual y dominio metodológico- y sus respectivas subcategorías -componentes del diagrama AVM-. Estas observaciones son formuladas en términos de los logros obtenidos por los estudiantes al interactuar con los modelos de dinámica newtoniana haciendo uso del diagrama AVM, en comparación con las actividades de cinemática previamente exploradas.

En relación con el dominio conceptual

En la subcategoría 1.1 referente a las teorías, principios, teoremas y leyes; que fue uno de los componentes del diagrama AVM que más

dificultad generó en los estudiantes al desarrollar las actividades de cinemática, se observó un significativo progreso en las actividades de dinámica; de manera que diecinueve de los veintitrés estudiantes reconocieron la mecánica newtoniana como la teoría que subyace a estos modelos y describieron las leyes de Newton como fundamentales para el análisis de los mismos. Sólo un pequeño número de estudiantes (cuatro) persistió en nombrar como teoría el mismo fenómeno físico que estaba siendo estudiado. Sin embargo, ninguno de los grupos hizo alusión a la dinámica de cuerpo rígido en los modelos computacionales correspondientes a la "relación fuerza-aceleración" y a la "fricción", teniendo en cuenta que los bloques en dichos modelos, son considerados como cuerpos rígidos. Algo similar ocurre con el modelo que estudia el fenómeno físico del paracaídas; al interactuar con este modelo, los estudiantes no reconocen la hidrostática e hidrodinámica como referentes teóricos que permiten la comprensión de este fenómeno. A diferencia de lo ocurrido con los modelos de cinemática, en esta ocasión ninguno de los estudiantes recurrió a ecuaciones para hacer referencia a las teorías, principios, teoremas y leyes.

En la subcategoría 1.2 relacionada con las idealizaciones, doce de los veintitrés estudiantes siguen mostrando dificultades en la formulación de éstas. Reiteradamente se refieren sólo a aquellas idealizaciones que hacen los libros de texto y poca relación establecen entre éstas y los referentes del sistema que está siendo modelado. Además, en su mayoría se limitan a formular las mismas idealizaciones que utilizaron en los modelos de cinemática; lo que sin lugar a dudas sugiere la falta de comprensión de este componente del diagrama AVM.

En la subcategoría 1.3 relativa a las variables, parámetros y sus representaciones, podría decirse que diecinueve de los veintitrés estudiantes lograron un mejor reconocimiento de estos elementos en los diferentes modelos explorados, estableciendo clara diferencia entre ellos y expresando de manera adecuada tanto las representaciones simbólicas de las variables y parámetros como sus respectivas unidades.

En la subcategoría 1.4 referente a las relaciones, su establecimiento fue mucho más claro en las actividades de dinámica que en las de cinemática. Al expresar estas relaciones de tipo matemático, los estudiantes no se remitieron más al libro de texto y más bien se valieron del contenido conceptual abordado previamente en la clase y de la interacción con el modelo y la visualización del comportamiento de sus variables para establecer las relaciones matemáticas que involucraban los parámetros y variables contenidos en el modelo computacional que representaba el fenómeno físico estudiado. En este momento de la intervención, veintiuno de los veintitrés estudiantes expresa las relaciones matemáticas del modelo como razones de cambio, mostrando tener mucha más claridad sobre este concepto, de la que se tenía al realizar la intervención con los modelos correspondientes a cinemática.

En la subcategoría 1.5 relacionada con los resultados conocidos, se logró –para las actividades de modelación computacional de dinámica newtoniana- una comprensión más clara acerca de este componente del diagrama AVM; donde quince de los estudiantes mostraron mayor propiedad en el dominio del tema a la hora de expresar tales resultados,

para lo cual se apoyaban tanto en los contenidos abordados en el curso teórico como en los modelos computacionales previamente explorados; además, se logró percibir una mayor reflexión en torno al papel que juega la formulación de estos resultados conocidos en el proceso de validación del modelo, componente perteneciente al dominio metodológico.

En la subcategoría 1.6 concerniente a las predicciones como tentativas de respuesta a las preguntas foco; durante las actividades de dinámica newtoniana se logró que todos los estudiantes las formularan en un momento previo a la interacción con el modelo computacional; comprendiendo que estas predicciones no necesariamente tenían que ser la respuesta correcta a cada pregunta foco planteada, pero que sí debía reflejar el conocimiento previo que se tenía acerca del fenómeno de interés a ser abordado por medio del modelo computacional. Algunos de los estudiantes (once) no consiguieron formular un número de predicciones igual al número de preguntas foco planteadas para la exploración de cada modelo, dificultad que se puso de manifiesto en las actividades de cinemática y que de alguna manera se mantiene en la exploración de los modelos de dinámica.

En relación con el dominio metodológico

En la subcategoría 2.1 relativa a los datos colectados, incluso desde la intervención con las actividades de cinemática se logró una buena comprensión y clara identificación de los datos o registros de los modelos computacionales; lo que facilitó en buena medida la posterior transformación e interpretación de los mismos con el objetivo de dar respuesta acertada a las preguntas foco planteadas. Solamente cuatro estudiantes persistieron en la dificultad de visualizar algunos datos, que no aparecían lo suficientemente explícitos en el modelo computacional.

En la subcategoría 2.2 referente a las representaciones, que es uno de los más importantes elementos en el análisis metodológico del modelo computacional, fue de los que menos dificultad generó en los estudiantes. Las pocas dificultades presentadas en los modelos de cinemática fueron completamente superadas por todos los estudiantes, logrando hacer una clara descripción de las animaciones visualizadas, una adecuada interpretación de las gráficas y una identificación de los vectores como una de las representaciones más utilizadas en el diseño de los modelos computacionales de dinámica newtoniana.

En la subcategoría 2.3 relacionada con la validación del modelo, fueron ampliamente superadas las dificultades halladas en la implementación de las actividades de cinemática. Pues, quince de los veintitrés estudiantes lograron hacer una acertada validación de los modelos computacionales de dinámica newtoniana; lo que seguramente se debió al avance significativo que mostraron en la descripción de los resultados conocidos del modelo; pues este componente del Dominio Conceptual juega un papel fundamental en el proceso de validación del modelo computacional.

En la subcategoría 2.4 referente a las respuestas a las preguntas foco como uno de los componentes fundamentales del diagrama AVM, es importante resaltar que en las actividades computacionales referentes a la dinámica newtoniana se logró una mejor conceptualización acerca de los

fenómenos físicos abordados. En estas actividades, quince estudiantes mostraron un mayor dominio de las situaciones-problema propuestas, profundizando un poco más en sus respuestas y realizando una evidente reflexión que se veía plasmada en sus expresiones conceptuales; en las que a diferencia de las utilizadas en las actividades de cinemática, ya no hacían uso de expresiones matemáticas aisladas para dar respuesta a una pregunta planteada. Obviamente y como era de esperarse, no todos los estudiantes logran una buena apropiación del fenómeno físico y de los conceptos involucrados en él; por lo que en ocho de los estudiantes persisten algunas respuestas conceptualmente pobres.

En los anexos 2 y 3 se muestran dos de los diagramas AVM realizados por un grupo de estudiantes para una actividad de cinemática y una de dinámica, respectivamente.

Finalmente se realizó una entrevista no estructurada en la que participaron diez de los estudiantes del curso, elegidos aleatoriamente. Éstos fueron entrevistados individualmente luego de concluir el proceso de intervención con las actividades de modelación computacional y las preguntas planteadas fueron: 1. ¿Cuál es la pertinencia de las actividades de modelación computacional con diagrama AVM en la clase de física? Y 2. ¿De qué manera estas actividades favorecen la comprensión de los conceptos físicos abordados?

En relación con la primera pregunta, los diez estudiantes entrevistados tienen una visión positiva de la implementación de actividades de modelación computacional y el diagrama AVM en el aula de clase. Estas son las respuestas de algunos de los estudiantes entrevistados en relación con la primera pregunta que indaga por la pertinencia de las actividades de modelación computacional con diagrama AVM en la clase de física:

Es muy bueno que en la clase de física se pueda trabajar con otras cosas diferentes a las que siempre se hacen y que además estas metodologías nos ayuden a entender mucho mejor los conceptos de la física (Estudiante 3).

Estas actividades son muy didácticas, pues en la clase de física nunca habíamos utilizado un computador para representar los fenómenos de la física y darnos cuenta de todo lo que podemos aprender y mucho menos habíamos utilizado la V que fue muy buena porque nos ayudó a comprender no sólo lo procedimental sino lo teórico de un fenómeno físico (Estudiante 11).

Al principio me pareció muy complicado el diagrama de la V y me parecía que era suficiente con observar el modelo del computador para comprender algunos de los conceptos de dinámica, pero luego me di cuenta de lo mucho que nos ponía a pensar este diagrama, en cosas que jamás se nos ocurriría pensar, como la teoría que explica tal fenómeno o como las relaciones y cosas así (Estudiante 14).

Con respecto a la segunda pregunta de la entrevista que pretendía indagar por la manera en que las actividades de modelación computacional con diagrama AVM favorecen la comprensión de los conceptos físicos abordados, nueve de los diez estudiantes entrevistados, coinciden en valorar dichas actividades como una estrategia de enseñanza con un gran

potencial para generar procesos de aprendizaje. Se resaltan algunas de sus respuestas:

Estas actividades me ayudaron a comprender muchos conceptos que aunque ya los había visto nunca los había comprendido tan bien y los modelos en el computador fueron muy interesantes porque se podían modificar valores, incluso como la gravedad que en una actividad normal de laboratorio no podemos hacer (Estudiante 1).

Me gustó mucho que se implementara esta metodología de trabajo con nosotros, pues yo he visto este curso en dos veces y nunca había entendido tan bien muchos conceptos; además cuando trabajábamos algún experimento en el laboratorio, sólo teníamos tiempo para hacerlo una vez y nos demorábamos casi toda la clase haciendo cálculos y respondiendo preguntas que casi no entendíamos, mientras que con esta metodología de los modelos en computador podemos repetir todas las veces que queramos el experimento para poder entenderlo mejor (Estudiante 6).

Aprendí mucho con este trabajo, pues se podía observar una y otra vez el fenómeno y las gráficas para poder comprenderlo y lo mejor es que se puede ver que es lo que pasa con las variables a medida que está ocurriendo el fenómeno, lo que no puedes hacer en el libro y en la clase cuando el profesor está explicando (Estudiante 20).

A partir de esta entrevista puede deducirse que los modelos computacionales fueron ampliamente valorados por los estudiantes, quienes en sus testimonios resaltan sus potencialidades en cuanto a la visualización de fenómenos físicos de una forma más amigable y comprensible de como éstos eran vistos en un laboratorio o en una clase de física convencional. Y por supuesto, el hecho de haber incluido el uso del diagrama AVM para interactuar con las actividades de modelación computacional, sin lugar a dudas le dio un valor agregado a esta propuesta didáctica.

Sin embargo, de los veintitrés estudiantes participantes en el estudio, uno de ellos mostró no sólo una gran aversión hacia los computadores sino al trabajo de tipo conceptual, dándole más valor a las actividades en las que se planteaban problemas de lápiz y papel y para las que sólo se requería la memorización de ecuaciones con el objetivo de dar una respuesta numérica. También encontró muchas dificultades al trabajar con el diagrama AVM, manifestando que no le gustaba abordar la física de manera conceptual como lo planteaba el diagrama. Este estudiante tuvo muy bajo desempeño durante todo el curso.

Aunque los estudiantes valoraron considerablemente el uso de los modelos computacionales y del diagrama AVM, fueron conscientes de la dificultad que tuvieron para visualizar la física desde un punto de vista conceptual; pues estaban habituados a las prácticas de laboratorio convencionales y a la resolución de problemas de tipo numérico. Finalmente, consideraron que se requería de más tiempo para poder interactuar con las actividades, pues algunos de ellos tardaron mucho en comprender cada uno de los componentes del diagrama AVM y su función en las actividades de modelación computacional de tipo exploratorio.

En términos generales, a partir de la interpretación de los datos que surgen del pretest y postest, de los diagramas AVM, de la observación, del cuaderno de notas y de la entrevista; se puede indicar que los objetivos planteados en este trabajo de investigación fueron satisfactoriamente alcanzados; ya que, sin lugar a dudas, las actividades de modelación computacional fueron un gran aporte para la comprensión de fenómenos físicos que involucraban el estudio de conceptos propios de la dinámica newtoniana, en términos de las posibilidades que les brindó a los estudiantes de visualizar una situación-problema desde una perspectiva diferente, donde se daba prioridad a la comprensión conceptual de un fenómeno físico.

Consideraciones finales

Uno de los propósitos fundamentales de este estudio consistía en conocer el aporte que podía hacerse al aprendizaje de conceptos físicos a partir de la implementación de actividades de modelación computacional haciendo uso del diagrama AVM. Los resultados obtenidos a partir de la aplicación de este tipo de actividades que constituyen el material potencialmente significativo, revelan que el grupo de estudiantes tuvo un desempeño satisfactorio en relación con las actividades computacionales referentes al campo de la dinámica newtoniana; las cuales posibilitaron un análisis más crítico, reflexivo y contextualizado de conceptos de este campo de la física como: sistemas de referencia, movimiento, posición, velocidad, aceleración, fuerza y masa; permitiendo la clara descripción de estos conceptos, su adecuado uso y representación; y el establecimiento de relaciones importantes entre ellos. Además, consideramos que la comprensión y adecuada descripción de los diferentes componentes del diagrama AVM –cada vez más coherente– para el análisis de una situación-problema específica abordada a partir de un modelo computacional, es una importante evidencia de aprendizaje significativo de conceptos físicos.

Otro de los aspectos que se pretendía indagar en este estudio está relacionado con la contribución de este tipo de actividades a la predisposición de los estudiantes para el aprendizaje de conceptos físicos; condición que fue altamente positiva y que es importante resaltar debido a la gran motivación e interés generado en los estudiantes aduciendo argumentos como: el uso de computadores en la clase de física, la implementación de otras metodologías de enseñanza, la interactividad propiciada por el desarrollo de actividades de modelación computacional, entre otras. Estos resultados hacen alusión a la importancia de implementar estas estrategias en el aula de clase, no sólo para generar espacios de reflexión en cuanto al aprendizaje de un campo de conocimiento, sino por la influencia positiva que ejercen en la predisposición de los estudiantes para el aprendizaje de conceptos físicos; condición necesaria para que se dé el aprendizaje significativo.

En un estudio posterior se espera que los estudiantes realicen actividades de modelación computacional no solo de tipo exploratorio sino también expresivo o de creación; y que como evidencia importante de aprendizaje significativo logren extrapolar modelos al estudio de situaciones nuevas y cada vez más complejas.

Referencias bibliográficas

Araujo, I.S. (2005). Simulação e modelagem computacionais como recursos auxiliares no ensino de Física Geral. *Tese (Doutorado em Ciências)* –Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Araujo, I.S.; Veit, E.A. y M.A. Moreira (2007). Um estudo exploratório sobre as potencialidades do diagrama AVM na aprendizagem significativa de tópicos de Física. *Indivisa, Boletín de Estudios e Investigación, Monografía VIII*, 503-514.

Ausubel, D.P. (2002). *Adquisición y retención del conocimiento: una perspectiva cognitiva*. Barcelona: Paidós Ibérica, S.A.

Bliss, J. y J. Ogborn (1989). Tools for exploratory learning. *Journal of Computer Assisted Learning*, 5, 1, 37–50.

Covián, E. y M. Celemín (2008). Diez años de evaluación de la enseñanza-aprendizaje de la mecánica de Newton en escuelas de ingeniería españolas. Rendimiento académico y presencia de preconceptos. *Enseñanza de las Ciencias*, 26, 1, 23-42.

Espinoza, F. (2005). An analysis of the historical development of ideas about motion and its implications for teaching. *Physics Education*, 40, 2, 139-146.

Halloun, I. (1996). Schematic Modeling for Meaningful Learning of Physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 33, 9, 1019-1041.

Halloun, I. (2004). *Modeling Theory in Science Education*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Halloun, I. y D. Hestenes (1985a). The initial knowledge state of college physics students. *American Journal of Physics*, 53, 11, 1043-1055.

Halloun, I. y D. Hestenes (1985b). Common sense concepts about motion. *American Journal of Physics*, 53, 11, 1056-1065.

Henderson, C. (2002). Common Concerns about the Force Concept Inventory. *Physics Teacher*, 40, 542-547.

Hennessy, S.; Twigger, D.; Driver, R.; O'Malley, C.E.; Byard, M.; Draper, S.; Hartley, R.; Mohamed, R.; O'Shea, T. y E. Scanlon (1995). Design of a computer-augmented curriculum for mechanics. *International Journal of Science Education*, 17, 1, 75-92.

Hestenes, D. (1995). Modeling Software for learning and doing physics. En: C. Bernardini, C. Tarsitani y M. Vincentini (Eds.), *Thinking physics for teaching* (pp. 25-66). New York: Plenum Press.

Hestenes, D.; Wells, M. y G. Swackhamer (1992a). Force Concept Inventory. *Physics Teacher*, 30, 3, 141-158.

Hestenes, D.; Wells, M. y G. Swackhamer (1992b). Force concept inventory (spanish version). En: <http://modeling.asu.edu/R&E/FCI/Spanish.pdf>.

Hestenes, D. e I. Halloun (1995a). Interpreting the Force Concept Inventory. *Physics Teacher*, 33, 8, 502-506.

Hestenes, D. e I. Halloun (1995b). The search for conceptual coherence in FCI data, Working paper.

En: <http://modeling.asu.edu/R&E/CoherFCI.pdf>.

Hewson, P. W. (1990). La enseñanza de "fuerza y movimiento" como cambio conceptual. *Enseñanza de las Ciencias*, 8, 2, 157-172.

Huffman, D. y P. Heller (1995a). What does the Force Concept Inventory actually measure? *The Physics Teacher*, 33, 138-143.

Huffman, D. y P. Heller (1995b). Interpreting the Force Concept Inventory: a reply to Hestenes and Halloun. *The Physics Teacher*, 33, 503-511.

Hülsendeger, M. (2004). Uma análise das concepções dos alunos sobre a queda dos corpos. *Caderno Catarinense do Ensino da Física*, 21, 3, 377-391.

Li, Y.; Borne, I. y T. O'shea (1996). A scenario design tool for helping students learn mechanics. *Computers & Education*, 26, 1, 91-99.

Norman, D.A. (1983). Some observations on mental models. En: D. Gentner y A.L. Stevens (Eds.). *Mental models* (pp. 6-14). New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.

Poon, C.H. (2006). Teaching Newton's Third Law of Motion in the presence of student preconception. *Physics Education*, 41, 3, 223-227.

Sánchez, M.A. (2007). Animaciones *Modellus* y videos de experiencias de laboratorio para dar un nuevo impulso a la enseñanza de la mecánica Newtoniana. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 6, 3, 729-745.

Sebastia, J.M. (1984). Fuerza y movimiento: la interpretación de los estudiantes. *Enseñanza de las Ciencias*, 2, 3, 161-169.

Siegel, S. (1972). *Estadística no paramétrica: aplicada a las ciencias de la conducta*. 1. México: Ed. Trillas.

Talim, S.L. (1999). Dificuldades de aprendizagem na terceira lei de Newton. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 16, 2, 141-153.

Tao, P.K. y R.F. Gunstone (1999). The Process of Conceptual Change in Force and Motion during Computer-Supported Physics Instruction. *Journal of Research in Science Teaching*, 36, 7, 859-882.

Teodoro, V.D. (1998). From formulae to conceptual experiments: interactive modelling in the Physical Sciences and in Mathematics. En: <http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/textos/VDTeodoro1998.pdf>.

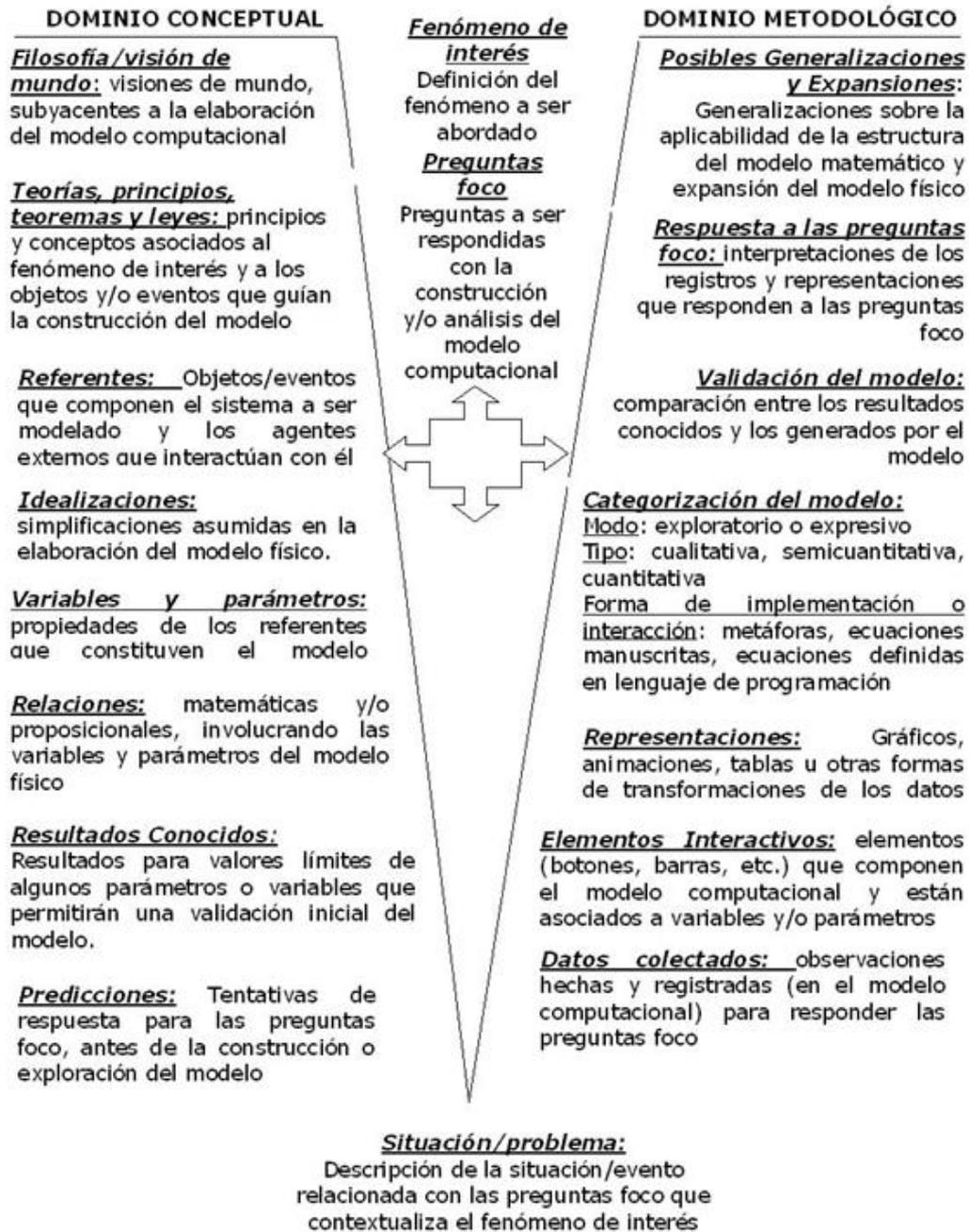
Teodoro, V.D. (2010). *Modellus 2.5*. En: <http://modellus.fct.unl.pt/>.

Terry, C.; Jones, G. y W. Hurford (1985). Children's conceptual understanding of forces and equilibrium. *Physics Education*, 20, 162-165.

Valente, M. y A.J. Neto (1992). El ordenador y su contribución a la superación de las dificultades de aprendizaje en mecánica. *Enseñanza de las Ciencias*, 10, 1, 80-85.

Veit, E.A.; Mors, P.M. y V.D. Teodoro (2002). Ilustrando a segunda lei de Newton no século XXI. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 24, 2, 176-184.

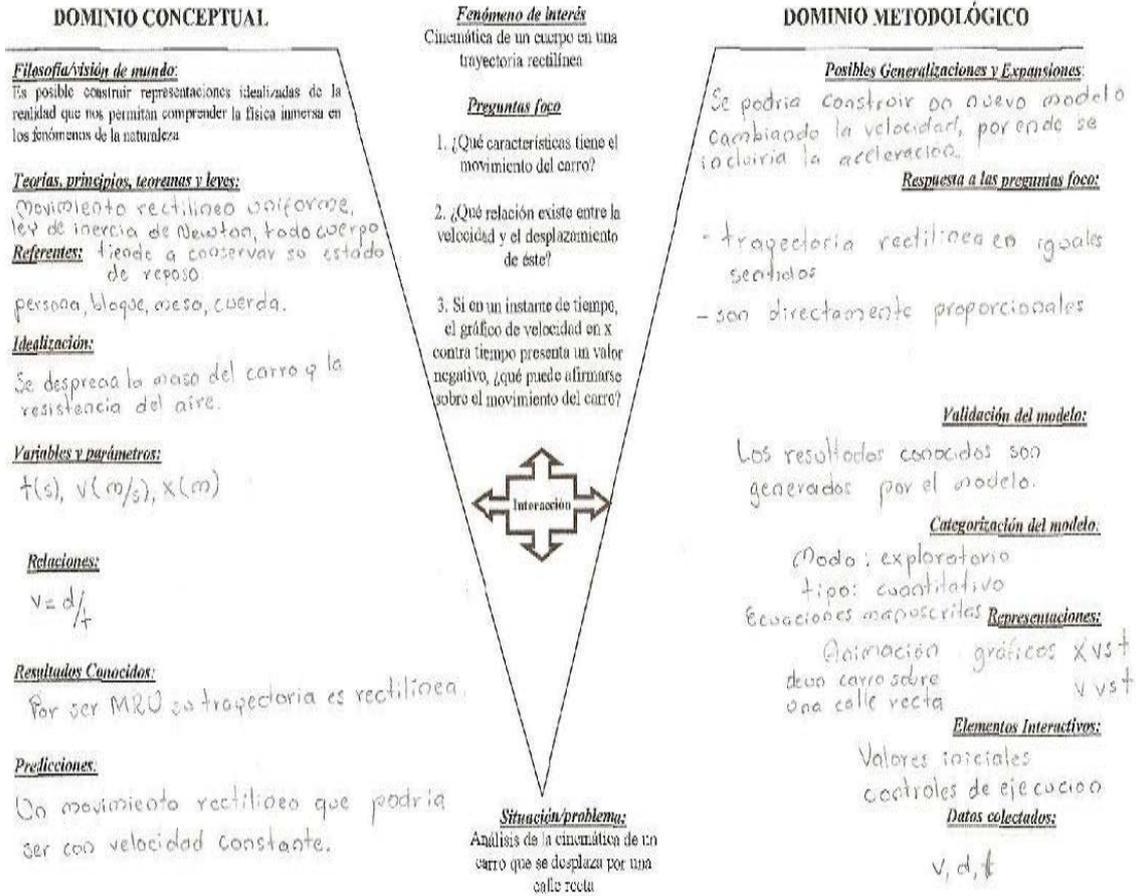
Anexo 1: Componentes del diagrama AVM (Araujo, Veit y Moreira, 2007).



Anexo 2: Diagrama AVM realizado por un grupo de estudiantes a partir de la interacción con uno de los modelos de los modelos de cinemática.

Ano
Julian

Física II



Anexo 3: Diagrama AVM realizado por un grupo de estudiantes a partir de la interacción con uno de los modelos de dinámica.

Ana
Colón

Física I

