

REPRESENTACIONES DE ALUMNOS UNIVERSITARIOS SOBRE PROPAGACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS

BRAVO, SILVIA¹; PESA, MARTA¹ y CABALLERO SAHELICES, CONCESA²

¹ Departamento de Física. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Universidad Nacional de Tucumán, Argentina

² Departamento de Física. Facultad de Ciencias. Universidad de Burgos, España

sbravo@herrera.unt.edu.ar

mpesa@herrera.unt.edu.ar

concesa@ubu.es

Resumen. En este trabajo se presentan resultados de una investigación sobre concepciones de estudiantes universitarios acerca del mecanismo de propagación de una onda y el rol del medio de propagación en la misma. Se analizan razonamientos que emplean estudiantes universitarios al abordar situaciones problemáticas concretas, en función de un marco teórico que articula los esquemas de la teoría de campos conceptuales de Vergnaud con los modelos mentales de la teoría de Johnson-Laird. Se identifican algunos elementos de los esquemas y las características principales de los modelos mentales que usarían los alumnos para resolver la tarea. Las conclusiones muestran la potencialidad del marco teórico para entender los procesos de construcción de las representaciones de los estudiantes, y para guiar la elaboración de propuestas instruccionales tendientes a un aprendizaje significativo más efectivo.

Palabras clave. Representaciones, esquemas de Vergnaud, modelos mentales, propagación de ondas, medio de propagación.

Representations of mechanical waves propagation formed by university students

Summary. Research results on university students conceptions about the mechanism of wave propagation and the role of propagation medium, are presented. Based on a theoretical framework that articulates the schemes of theory of conceptual fields Vergnaud's theory with the mental models of Johnson-Laird's theory, students reasonings used when approaching a concrete problematic situation are analyzed. The analysis of results allows for the identification of some schemes and the basic characteristics of the mental models that students use to solve the task. The conclusions show the potential of this theoretical framework in understanding the process of representations construction, and for the development of future instructional proposals, that can be used to promote meaningful learning.

Keywords. Representation, schemes of Vergnaud, mental models, wave propagation, propagation medium.

INTRODUCCIÓN

Esta investigación se origina en el reconocimiento, a partir de la práctica docente, del grado de dificultad que implica para los alumnos la comprensión del modelo ondulatorio científico y representa un intento de explicar las principales dificultades en su aprendizaje en función de los procesos asociados a la construcción de conceptos.

En la literatura existente se encuentran numerosas investigaciones que analizan desde diferentes marcos teóricos el aprendizaje del movimiento ondulatorio:

– Maurines (1992) analiza las respuestas de los estudiantes en base a la idea de un «capital dinámico» (fuerza, energía, impulso, etc.), para explicar por qué la mayoría de los estudiantes concibe la propagación de un pulso en términos de la fuerza que entrega la mano al crear el pulso en la cuerda.

– Linder (1993) estudia las dificultades de alumnos universitarios para conceptualizar los factores que afectan a la velocidad de propagación del sonido y Perales Palacios

(1997) analiza conocimientos previos en acústica en alumnos de diferentes edades y niveles. Los resultados evidencian, entre otras, la dificultad de los alumnos para explicar la propagación del sonido en el aire y en medios sólidos.

– Utges y Pacca (1998) han sistematizado las principales representaciones de onda de estudiantes secundarios y otras investigaciones. Bravo y Pesa (2002) han ampliado la validez de estas representaciones al ámbito universitario.

– Wittmann (1998, 2002) describe el razonamiento de los estudiantes en función de «patrones de asociación» o modelos simples y posteriormente toma un marco teórico más general para interpretar las respuestas de los estudiantes.

– Utges et al. (2002), tomando como referencia el concepto de onda, interpretan las dificultades de los estudiantes en la comprensión de conceptos complejos usando las nociones de conceptos emergentes, causalidad compleja, cambio epistémico, y multiplicidad de representaciones y modelos.

– Welte (2002) investiga algunas dificultades de estudiantes y profesores para interpretar y describir los mecanismos físicos asociados con la generación y propagación de una onda y la energía involucrada en estos procesos.

– Bravo y Pesa (2002) investigan los modos de razonamiento que activan estudiantes universitarios del ciclo básico de carreras de ingeniería al enfrentarse a situaciones problemáticas que involucran la velocidad de propagación de una onda.

– Wittmann, Steinberg y Redish (2003) abordan el razonamiento de los estudiantes sobre propagación del sonido en términos de conjuntos de recursos o bloques de pensamientos que se usan comúnmente en diferentes marcos, con el objetivo de diseñar materiales curriculares.

Los resultados de las investigaciones mencionadas son convergentes en señalar la dificultad de los alumnos para comprender el mecanismo de propagación y el rol del medio de propagación en el movimiento ondulatorio. Esta dificultad es reconocida en uno de los textos de uso corriente por parte del alumno (Eisberg y Lerner, 1983). En el mismo, se presenta un análisis cualitativo interesante acerca de los factores que determinan la velocidad de propagación, pero se reconoce a la vez que este análisis no es intuitivo y, en consecuencia, para el alumno es un aspecto difícil de profundizar.

El presente trabajo centra su interés en esta problemática a través del estudio de representaciones y razonamientos asociados con el rol del medio de propagación de ondas mecánicas que emplean alumnos del ciclo básico universitario.

MARCO TEÓRICO

Para el desarrollo de esta investigación se adopta como marco teórico una propuesta de Greca y Moreira (2002)

que integra los *modelos mentales* de Johnson-Laird (1983) con la teoría de *campos conceptuales* de Vergnaud (1983).

Los modelos mentales de Johnson-Laird son análogos estructurales de la realidad a la que se refieren (Moreira, 1996): su estructura es análoga a la que tienen los estados de cosas del mundo, tal como se perciben o como se conciben. Esta teoría considera que construimos modelos de eventos y aspectos del mundo usando procesos cognitivos tácitos y razonamos con esos modelos, poniendo a prueba las conclusiones a las que se llega con el uso de ellos. La comprensión de un aspecto de la realidad ocurre entonces cuando se verifica acuerdo entre el modelo construido para explicarlo y el aspecto modelado.

Los *modelos mentales* son entonces representaciones internas cuyo principal compromiso es la funcionalidad: el modelo debe permitirle al sujeto explicar y predecir aunque no necesariamente desde el punto de vista científico. Esta funcionalidad es la que los hace desechables: se generan en el momento y se desechan cuando ya no son necesarios. A pesar de esto, algunos de ellos pueden ser re-utilizados y más aún, si han sido útiles en varias ocasiones es posible que sean guardados en la memoria de largo plazo, en forma total o parcial, aunque en este caso ya dejarían de ser modelos mentales para ser otro tipo de representación en la memoria de largo plazo.

La fuente primaria de los *modelos mentales* es la percepción, aunque también se pueden construir a partir del discurso o provenir de nuestra imaginación. Hay una relación recíproca entre los modelos mentales y el discurso o la percepción, ya que, si bien los modelos mentales se construyen a partir del discurso o la percepción, la interpretación de ese discurso o de los estímulos externos recibidos va a depender de los modelos mentales que seamos capaces de construir. Entonces, las limitaciones en la construcción de los modelos mentales van a estar dadas por la estructura del mundo que se percibe o se concibe, por el conocimiento y experiencia previa del individuo, así como por la propia estructura del sistema de procesamiento de información del ser humano.

La teoría de *campos conceptuales* (TCC) de Vergnaud (1983) es una teoría psicológica cognitivista que se ocupa del desarrollo y aprendizaje de competencias complejas, como los aprendizajes científicos y técnicos. Toma como referencia el propio contenido del conocimiento y el análisis conceptual del dominio de ese conocimiento para explicar el funcionamiento cognitivo de los sujetos en una determinada *situación*. El término *situación* se refiere a eventos y ocasiones de la realidad, a situaciones cognitivas producidas en la enseñanza formal o en la vida diaria que implican acción, ya sea procedimental, declarativa o ambas (Rodríguez Palmero y Moreira, 2004).

En este referencial, el comportamiento ante una *situación* dada está dirigido por *esquemas*, los cuales generan una secuencia de acciones que dependen de los parámetros de la situación. Vergnaud (1990, 1996) define un *esquema* como la «totalidad organizada que permite generar una clase de comportamientos diferentes en función de

las características particulares de cada situación». En general contienen:

- *metas y anticipaciones, que permiten identificar situaciones,*
- *invariantes operatorios (conceptos-en-acción y teoremas-en-acción)* mediante los cuales se pueden reconocer los elementos pertinentes de la situación y la información relevante de la misma,
- *reglas-de-acción* del tipo «si...entonces» que permiten generar un secuencia de acciones,
- *inferencias* o razonamientos que se efectúan durante la actividad frente a la situación.

Los *invariantes operatorios* (o *conocimiento-en-acción*) son los conocimientos contenidos en los *esquemas*, es decir, los elementos cognitivos que determinan la activación de los *esquemas*. Este *conocimiento-en-acción* puede ser explícito o implícito, y está constituido por los *conceptos-en-acción* y los *teoremas-en-acción*, los cuales tienen un estatus diferente a los conceptos y teoremas científicos. Los *conceptos-en-acción* son categorías para obtener información relevante, son los que llevan a buscar la información necesaria para resolver la situación, y los *teoremas-en-acción* son proposiciones a partir de las cuales se hacen *inferencias*. Las *reglas-de-acción* son también proposiciones, pero no expresan algo acerca del mundo de objetos o de la realidad, sino acerca de la conveniencia de las acciones que pueda tomar el sujeto (Vergnaud, 1996).

El concepto de *esquema* es así el eje de toda la teoría, considera rasgos propios de la conducta y rasgos propios

de las representaciones internas permitiendo articular aspectos observables de la actividad con elementos mentales de sus representaciones.

En este marco teórico un *concepto* (S, I, R) se define a partir de tres conjuntos:

– las *situaciones*, S, que dan sentido al concepto. Se las considera el *referente* del concepto, ya que a partir de ellas el concepto resulta útil y significativo.

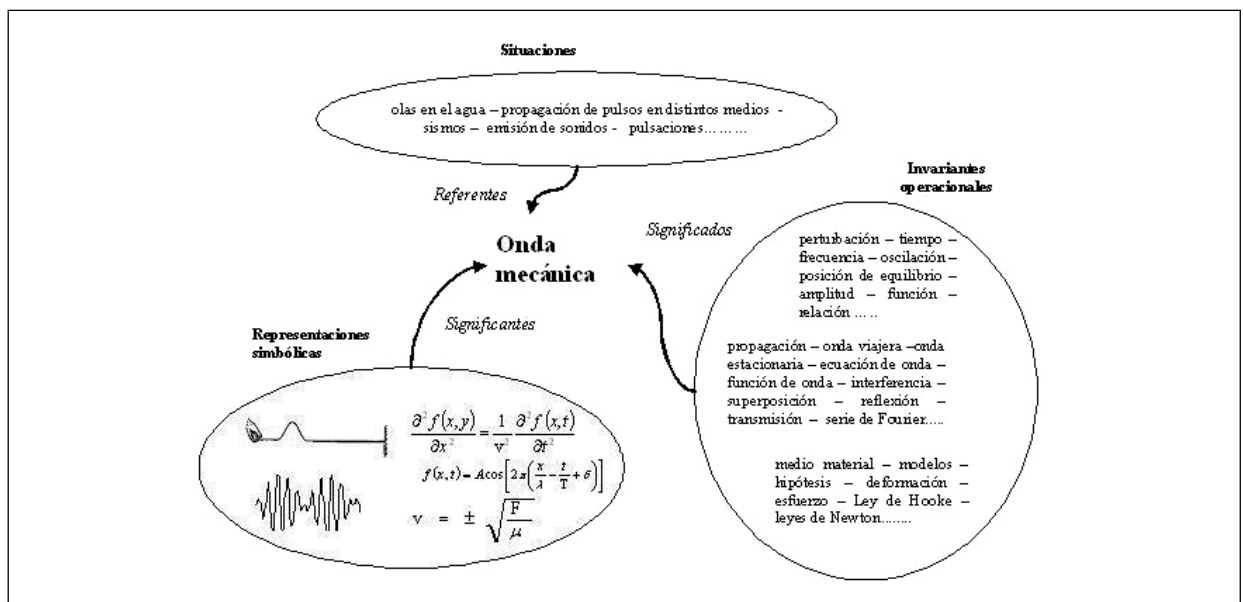
– los *invariantes*, I, son las propiedades específicas del concepto, que permiten analizar las diferentes clases de *situaciones* y actuar frente a las mismas. Le dan *significado* al concepto frente a la situación y son las responsables de la operacionalidad de los conceptos.

– las *representaciones simbólicas* (lingüísticas, gráficas o gestuales), R, que se emplean para hacer explícitos los *invariantes operatorios*. Representan las propiedades, funciones y procedimientos asociados al concepto en tales *situaciones* y constituyen así el *significante* del concepto (Vergnaud, 1994; Rodríguez y Moreira, 2004).

Así, un concepto dado no se refiere a un solo tipo de situaciones y una situación dada no se puede analizar con un solo concepto. Esta idea es la que lleva a la definición de *campo conceptual*, expresión que le da nombre a la teoría. Según Vergnaud, los *campos conceptuales* (CC) son «grandes conjuntos de situaciones y problemas, cuyo análisis y tamizado requiere diversas clases de conceptos, procedimientos y representaciones simbólicas que están interconectados entre sí y probablemente entrelazados durante el proceso de adquisición de conocimiento».

Figura 1

Interpretación del concepto científico de onda mecánica desde la teoría de campos conceptuales.



A modo de ejemplo, se presentan algunas situaciones, invariantes operatorios y representaciones simbólicas del concepto científico de onda mecánica.

Según la operatividad que tenga el sujeto frente a las *situaciones*, Vergnaud (1990) las clasifica en *conocidas* y *novedosas*. En las *situaciones conocidas* el sujeto encuentra de manera casi inmediata en su repertorio de conocimientos un *esquema* que le resulta eficiente para abordarlas, como los algoritmos que emplean en *situaciones* que ya han resuelto con anterioridad y les resultan conocidas. En las *situaciones novedosas* el sujeto no dispone de una estructura que le permita abordarlas de inmediato recurriendo así a otros *esquemas* cercanos que va descomponiendo y modificando y acomodando hasta construir un nuevo *esquema* que le parece apropiado.

Greca y Moreira (2002) proponen la articulación de los *esquemas* de Vergnaud con los *modelos mentales* de Johnson-Laird para explicar el comportamiento del sujeto frente a una situación que no le resulta conocida. Estos autores plantean que frente a una situación novedosa se construyen representaciones del tipo de *modelos mentales* (en el sentido de Johnson-Laird) que operan en la memoria a corto plazo y sirven para el reconocimiento de la tarea. Los *conceptos-en-acción* y los *teoremas-en-acción* disponibles en su estructura cognitiva determinan qué elementos de la situación le parecen relevantes, guiando así la construcción de una representación en la memoria a corto plazo: los *modelos mentales* o *modelos de trabajo* para resolver la tarea. Serían representaciones mediadoras entre la situación y el conocimiento que posee el sujeto.

Se consideran los *esquemas*, junto con los *teoremas-en-acción* y los *conceptos-en-acción*, como estructuras en la memoria a largo plazo. Las *inferencias*, en cambio, se realizan durante el trabajo con los *modelos mentales* y estarían situadas, por lo tanto, en la memoria a corto plazo.

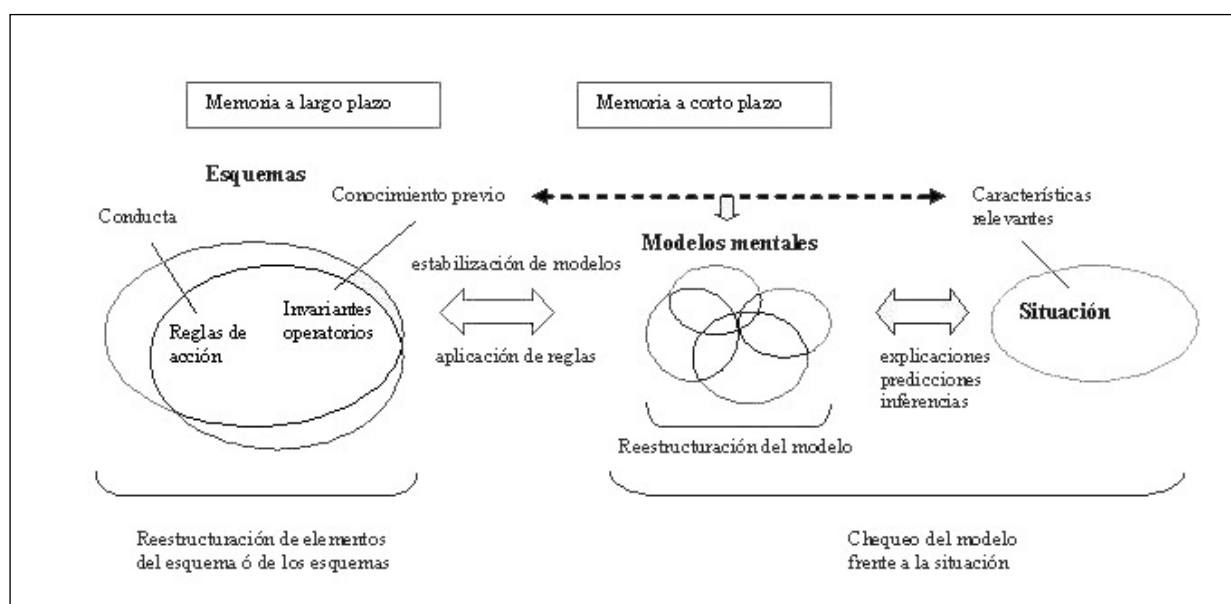
Se propone así la existencia de dos grandes tipos de representaciones: los *esquemas*, con cierto grado de estabilidad en la memoria a largo plazo; y los *modelos mentales*, inestables y funcionales.

En esta propuesta integradora la lectura de la realidad a partir del *conocimiento-en-acción* del sujeto determina la construcción de los *modelos mentales*, pero la búsqueda de coherencia de las predicciones, *inferencias* o explicaciones que resultan de la aplicación de esos *modelos mentales* con los datos del mundo exterior pueden llevar a modificar los *modelos mentales*, y eventualmente, a una reestructuración de los *esquemas* en la medida en que los sucesivos *modelos mentales* generados resulten insatisfactorios.

En este marco, las *reglas-de-acción* y *control* que determinan la secuencia de acciones del sujeto también surgen de la manipulación de los *modelos mentales* para resolver la *situación*, pero estas reglas serían características de conductas total o parcialmente automatizadas, por lo cual se las considera muy estables (Greca y Moreira, 2002) representando así estructuras en la memoria a largo plazo.

En la figura 2 se presenta un diagrama de los procesos cognitivos durante la tarea del sujeto frente a la situación problemática desde esta propuesta integradora.

Figura 2
Interpretación de los procesos cognitivos en la propuesta de Greca y Moreira.



METODOLOGÍA

Se consideró adecuada una aproximación de naturaleza psicológica a través de cuestionarios que plantean distintas situaciones problemáticas para dar cuenta de los procesos cognitivos que activa el alumno al afrontar una tarea, utilizando para ello lo que expresa y lo que hace en el intento de dar una respuesta a la misma.

La investigación se realizó a lo largo de tres semestres sucesivos, con tres cohortes de alumnos del ciclo básico de carreras de ingeniería de una universidad de Argentina, durante el cursado de la asignatura semestral Física II, que habían participado de clases teóricas y de resolución de problemas sobre ondas mecánicas.

Para la elaboración de los cuestionarios se realizó un ensayo piloto con un grupo de 80 alumnos (1.^a cohorte), teniendo en cuenta una variedad de *situaciones* físicas distintas, como ser crestas de agua en un estanque, pulsos en cuerdas y resortes, la «ola» en el estadio, propagación del sonido, etc. Este procedimiento permitió precisar las preguntas realizadas, mejorar la presentación y redacción de los cuestionarios y seleccionar aquellas *situaciones* problemáticas que admiten un análisis cualitativo más accesible para el alumno en esa etapa de la instrucción y que tienen más potencialidad que otras para lograr que el alumno manifieste mediante su lenguaje escrito o simbólico los *invariantes operatorios* que utiliza. Así, se descartaron algunos enunciados que no estaban bien formulados y algunas *situaciones* como la cresta de agua y la propagación del sonido, los cuales implican un análisis físico de mayor complejidad que la propagación en un medio sólido en una sola dirección. Se seleccionaron finalmente tres situaciones físicas para la elaboración de los cuestionarios definitivos, que se presentan en el Anexo.

La situación que se presenta en el cuestionario N.º 1 (Anexo) no corresponde a una onda mecánica; sin embargo, presenta rasgos que pueden considerarse análogos. Se trata de una simulación, a escala macroscópica, del comportamiento microscópico de un medio físico cuando avanza una onda transversal y tiene, en este sentido, potencialidad para generar representaciones referidas a las propiedades del medio de propagación. Los enunciados de los cuestionarios N.º 2 y N.º 3 (Anexo) se refieren a la propagación de pulsos en una cuerda tensa y en un resorte, respectivamente. La serie de preguntas en cada uno de ellos tiene por objetivo que el estudiante construya un *modelo de trabajo* y además explicita su razonamiento sobre el mecanismo de propagación, sobre el rol que desempeña el medio físico y sobre las propiedades elásticas del mismo.

Los cuestionarios elaborados se aplicaron en el semestre siguiente (2.^a cohorte) a una muestra de 120 alumnos. A cada alumno se le asignó en forma aleatoria uno de los tres enunciados, obteniendo con este procedimiento 40 respuestas para cada cuestionario. En el momento de aplicar los cuestionarios, estos alumnos se encontraban en idénticas condiciones de instrucción que los alumnos que participaron en el ensayo piloto.

Las categorías para la clasificación de las respuestas surgieron del análisis interpretativo de las mismas, que fue realizado por dos investigadores en forma conjunta hasta llegar a un consenso en la interpretación de las distintas respuestas individuales y su agrupamiento en clases que presentaban características similares. Estas clases o categorías tienen en cuenta las características de los *modelos mentales* que construyen frente a las distintas *situaciones* problemáticas, los *invariantes operatorios* que ponían en juego y las *reglas-de-acción* que usan en su desempeño.

Una vez determinadas las categorías de respuestas con la muestra de 120 alumnos, en el siguiente semestre (3.^a cohorte) se trabajó con un grupo de seis alumnos voluntarios, de manera que cada uno de ellos respondió a los tres cuestionarios en distintas secuencias. Estos alumnos se encontraban en las mismas condiciones de instrucción que el grupo de 120 alumnos del semestre anterior.

El análisis, interpretación y clasificación de las respuestas de un mismo alumno frente a *situaciones* distintas aportó información acerca de la dinámica de construcción del concepto a partir de la posibilidad de reestructurar las distintas representaciones.

Se realizaron, además, entrevistas individuales a todos los alumnos que respondieron a los tres cuestionarios en forma secuencial, las cuales fueron grabadas en audio y posteriormente transcritas. Mediante esta técnica se logró que los alumnos precisaran sus respuestas escritas y que explicitaran cuál era el razonamiento utilizado, obteniendo una mayor confiabilidad en la interpretación de las respuestas al cuestionario.

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Categorías de respuestas

A continuación se presentan y se describen las tres categorías de respuestas que resultaron de este trabajo, explicando los *conceptos-en-acción*, los *teoremas-en-acción* y *reglas-de-acción* que subyacen a la construcción de un *modelo de trabajo* con determinadas características. Se denomina *esquema* a cada una de estas categorías, al considerar que se han identificado los principales elementos de esa estructura.

Los *esquemas* A (A_1 y A_2) son perceptuales, el significante fuerte sería la imagen visual de una figura senoide en movimiento, con el agregado de algunos conceptos adquiridos durante la instrucción con los cuales intentan dar una explicación del mecanismo de propagación. El *esquema* B muestra una cantidad importante de *conceptos-en-acción* sin ningún tipo de jerarquía o relación entre ellos. Los *esquemas* C (C_1 y C_2) reconocen como significativo fuerte un aspecto importante del modelo ondulatorio científico: el medio de propagación.

A fin de consignar ejemplos, al analizar las respuestas a cada situación problemática planteada se identifica a cada estudiante con un número que va desde 1 hasta 40 en cada una de las situaciones.

Esquema A₁

Modelo mental o modelo de trabajo: arreglo de partículas que suben y bajan en forma sincronizada de tal manera que en su movimiento forman una figura senoide



Conceptos-en-acción: forma sinusoidal, desplazamiento, partículas, «efecto de onda», oscilación, coordinación.

Teoremas-en-acción: «la onda tiene forma sinusoidal», «en una onda transversal las partículas tienen movimiento oscilatorio», «el movimiento de las partículas en una cuerda es una ilustración del movimiento ondulatorio»,

El *modelo de trabajo* está centrado en la imagen visual de una figura senoide en movimiento. Esta figura sería un *significante* fuerte en la construcción de su concepto de onda, pero el agregado de algunos conceptos nuevos adquiridos durante la instrucción (partículas, oscilación) aportaría elementos para centrar la atención en las oscilaciones particulares. A pesar de ello, la ausencia en este *esquema* de los conceptos de propagación, medio físico de propagación, y propiedades del mismo les impide centrar la atención en la «discontinuidad» que se presenta en la situación problemática del cuestionario N.º 1, manifestando dificultades para explicar el mecanismo de propagación. Desde su *modelo de trabajo*, consideran que este mecanismo está basado en la coordinación de los movimientos particulares y que el medio de propagación es el conjunto de entes individuales (personas, partículas), o algún otro elemento de la situación (como el aire o la tribuna) que «contiene» a estos entes individuales.

El *modelo de trabajo* asociado a este *esquema* determina algunas *reglas-de-acción* tales como:

- mecanismos de comparación: si la «forma» o el aspecto del movimiento en la situación presentada es similar a la de su *modelo mental*, entonces es una onda.
- búsqueda de analogías: cada persona que forma la ola en el estadio se comporta como una partícula de una cuerda

Ejemplo: Alumno 1 (Cuestionario N.º 1):

- I. «Sí, cada persona es una partícula, se levantan y bajan formando algo así (dibujo de una senoide)»
- II. a) «Se traslada porque el movimiento se va repitiendo en cadena, sucede uno a continuación del otro»
 - b) «El medio de propagación serían las personas en el estadio»
 - c) «Sí se propaga energía porque el desplazamiento tiene cierta velocidad»
 - d) «El tiempo que demora la perturbación en llegar al otro extremo depende de la velocidad con que se desplace».

Esquema A₂

Modelo mental o modelo de trabajo: figura o forma de aspecto senoide de que se desplaza (se traslada). A medida que la figura avanza, las partículas de la cuerda vibran con un movimiento armónico simple.



Conceptos-en-acción: forma sinusoidal, desplazamiento, partículas, propagación, oscilación.

Teoremas-en-acción: «la onda tiene forma sinusoidal», «en una onda transversal las partículas tienen movimiento oscilatorio», «el movimiento de las partículas en una cuerda es una ilustración del movimiento ondulatorio»,

El *modelo de trabajo* asociado a este *esquema* también está centrado en la imagen de una forma senoide que avanza, pero tiene una visión más general ya que considera los movimientos globales del medio físico visualizando así un desplazamiento de la «forma de onda», una especie de propagación. En este *esquema* el *significante* fuerte sería la «forma» que se desplaza, y tiene características similares a las del *esquema* A₂.

Ejemplo: Alumno 40 (Cuestionario N.º 2):

- I. a) «Sí, porque se desplaza una onda a lo largo de la cuerda»
 - b) «Con un movimiento armónico simple»
 - c) «No sé por qué se traslada esa perturbación»
 - d) «No, la energía se propaga sólo en la partícula que vibra»
 - e) «De la frecuencia de la onda»

Esquema B

Modelo mental: hibridación de conocimiento intuitivo y conocimiento formal, sin jerarquía de conceptos.



Conceptos-en-acción: amplitud, periodo, frecuencia, ángulo de fase, longitud de onda, velocidad de propagación, gráfica sinusoidal

Teoremas-en-acción: «la expresión $y = A \sin(\omega t - kx + \delta)$ representa una onda», «la gráfica de $y = A \sin(\omega t - kx + \delta)$ tiene la forma de una onda», «la velocidad depende de la longitud de onda y frecuencia según $v = \lambda \cdot f$ », «una onda tiene movimiento periódico».

En general, en este *modelo de trabajo* predomina la idea de repetición o ciclo, y el aspecto visual aparece ahora como un aspecto secundario, más abstracto, a través de las representaciones gráficas y de las ecuaciones que describen el movimiento. Desde la perspectiva de Johnson-Laird serían *modelos mentales* parcialmente analógicos y parcialmente proposicionales.

A pesar de que manejan, en general, más cantidad de *invariantes operatorios* que en los *esquemas* A₁ o A₂, no parecen asignarle jerarquía a los mismos: basta la presencia o ausencia de algunos de estos *conceptos-en-acción* para caracterizarla o no como una onda.

Una *regla de acción* generada por este modelo de trabajo sería la búsqueda e identificación en la situación problemática de alguna/s variable/s relacionada/s con la descripción de las ondas desde el modelo conceptual de la física para decidir si es o no un movimiento ondulatorio.

Ejemplos:

Alumno 23 (Cuestionario N.º 1):

- I. «Se puede considerar el movimiento como ondulatorio si es periódico, es decir, a un mismo intervalo de tiempo repite su movimiento, y donde la posición en función del tiempo describe una onda sinusoidal»
- II. a) «La perturbación se traslada porque existe un medio de propagación»
 b) «El medio de propagación serían las manos de la gente»
 c) «Sí, tanto cinética como potencial»
 d) «Depende del medio de propagación y de su frecuencia»

Alumno 28 (Cuestionario N.º 3):

- I. a) «Sí, porque es un movimiento periódico»
 b) «Se puede producir una perturbación longitudinal estirando el resorte y dejando en movimiento de manera que la onda se desplace a través del resorte»
 c) «El mecanismo que hace posible que el pulso se traslade es que se le aplica una fuerza que cambia su estado natural»
 d) «Sí, de un punto a otro hay una transformación constante de energía, ya que pasa de energía puramente cinética o energía potencial elástica, mientras que se mantiene constante la energía mecánica»
 e) «De la velocidad con que se propaga el pulso, a su vez la velocidad dependerá de la fuerza con la que se produzca el pulso»

Esquema C₁

Modelo mental: partículas que se mueven coordinadamente hacia arriba y hacia abajo a medida que avanza la propagación.



Conceptos-en-acción: propagación, transmisión, medio material, forma, ondulación, movimiento, partículas de una cuerda, movimiento oscilatorio de cada partícula, coordinación.

Teoremas-en-acción: onda implica propagación. El medio físico permite la transmisión.

Aunque el *modelo de trabajo* que generalmente activan también está centrado en un aspecto perceptual, en este *esquema* se manifiestan en forma explícita la transmisión o propagación como un aspecto importante del movimiento ondulatorio y el concepto de medio físico de propagación. Al igual que en los modelos A₁ y A₂, a partir de otros *conceptos-en-acción* disponibles en el *esquema*, tales como partículas u oscilación, pueden realizar un análisis microscópico de la situación.

Una *regla de acción* generada por este modelo sería verificar la existencia de un medio de propagación, o la

existencia de una transmisión a través del medio físico en la situación presentada para considerarla una onda. Asignan así una especie de jerarquía a sus *conceptos-en-acción*: no basta identificar la existencia de movimiento de partículas o la existencia de un periodo, debe existir una propagación (no siempre se explicita de qué) por algún medio físico aunque no consideren la continuidad del mismo.

Ejemplo: Alumno 26 (Cuestionario N.º 1):

- I. «Sí se puede considerar que es un movimiento ondulatorio porque una onda necesita un medio para propagarse, y el medio en el que se propaga esta onda es la gente»
- II. a) «La perturbación se traslada porque la gente se comporta como un medio en el cual viaja la onda»
 b) «Para mí, el medio de propagación en el cual se traslada la onda es la gente»
 c) «Sí hay propagación de energía»
 d) «El tiempo que demora la perturbación al llegar al otro extremo depende de la velocidad de ésta»

Esquema C₂

Modelo mental: medio material continuo, cuyas partes se mueven coordinadamente hacia arriba y hacia abajo a medida que avanza la propagación.



Conceptos-en-acción: propagación, transmisión, energía, medio material continuo, estímulo, movimiento, coordinación, partículas de una cuerda, movimiento oscilatorio de cada partícula.

Teoremas-en-acción: onda implica propagación. La discontinuidad entre las partículas impide la propagación de algún estímulo. La onda se propaga por choque (o contacto) entre las partículas.

En este *esquema* aparece como aspecto central de su *modelo de trabajo* el concepto de transmisión o propagación (de energía o de una perturbación) y, además, el concepto de medio de propagación. En efecto, si bien no mencionan propiedades de elasticidad, aparece la idea de que la propagación de la energía depende de una «conexión» o «contacto» entre las partículas. La propagación estaría relacionada de alguna manera con el medio de propagación y sus propiedades de elasticidad. Este *esquema* es el que presenta la mayor complejidad cognitiva.

El uso de este *modelo* permite encontrar una *regla de acción* eficaz para resolver la tarea: verificar la existencia de una continuidad en la situación presentada para aceptarla o no como movimiento ondulatorio en el caso del cuestionario N.º 1 y verificar la existencia de una transmisión o propagación en la situación presentada para considerarla una onda en el caso de los cuestionarios N.º 1 y N.º 2. Este hecho sugiere que están asignando una especie de jerarquía a sus *conceptos-en-acción*. No basta identificar en la situación problemática la oscilación de las partículas, sino que la exigencia es mayor: debe haber una propagación de energía por algún medio físico.

Ejemplos:

Alumno 18 (Cuestionario N.º 1):

I. «No es una onda, debido a que, aunque describe un movimiento de este tipo, este medio no responde a ningún estímulo físico que produzca dicha reacción»

II. a) «La analogía que existe es debida al movimiento descripto»

b) «Se podría decir que el movimiento se traslada por una decisión de las personas que están en el estadio y que de alguna manera describen un medio»

c) «No existe otra transferencia, más allá de la emoción»

d) «El tiempo en llegar al otro extremo depende de la reacción y de la disposición de las personas para realizarlo»

Alumno 36 (Cuestionario N.º 3):

I. a) «Sí, se trata de un movimiento ondulatorio porque hay una onda que se está propagando por el resorte en forma de energía»

b) «Se puede hacer una perturbación longitudinal que se traslade por el resorte, moviendo la mano»

c) «Porque hay variación de energía a lo largo del resorte»

d) «No hay transporte de energía porque no hay transporte de materia»

e) «Depende del medio en el que se esté transportando y de la velocidad inicial del pulso»

Resultados generales de los cuestionarios

Para cada cuestionario, se agruparon las respuestas de la muestra correspondiente en las distintas categorías detectadas a fin de analizar la efectividad de cada esquema para dar respuesta a esa situación problemática. Los resultados se han esquematizado en los cuadros que se presentan a continuación, en los cuales se consignan la cantidad de respuestas clasificadas en cada una de las categorías encontradas y las ideas principales que se detectan en cada categoría.

Cuadro 1
Resultados generales del cuestionario N.º 1 (ola en el estadio).

¿ES MOV. ONDUL...?	¿POR QUÉ?	¿POR QUÉ SE TRASLADA...?	¿CUÁL ES EL MEDIO DE PROPAGACIÓN?	¿SE PROPAGA ENERGÍA?	¿DE QUÉ DEPENDE EL TIEMPO...?
SÍ (24)	(6) A ₁ - Porque cada persona se comporta como una partícula, y al levantarse y sentarse producen la forma de una onda.	Mecanismo de propagación basado en la coordinación de las personas.	Son las personas, o el aire, o la tribuna.	Dificultades generales en la conceptualización de la propagación de la energía. Muchos no responden. ↓ Idea principal: «hay propagación de energía porque las personas tienen energía cinética al moverse».	Idea principal: de la velocidad con que se propaga la onda.
	(9) B- Porque reconocen en la situación presentada algunos parámetros característicos de la descripción del movimiento ondulatorio científico (amplitud, frecuencia, ángulo, velocidad, etc.).	Por coordinación de las personas o a través de las personas.	Son las personas, o el aire, o la tribuna.		
	(9) C ₁ - Para que sea onda mecánica debe existir propagación de «algo» («energía, perturbación, interacción») y se percibe esta propagación en la situación presentada. Porque debe existir un medio que permita la transmisión.	Porque existe un medio de propagación. A través del medio de propagación.	Son las personas, o el aire, o la tribuna.		
NO (16)	(4) B - Porque no reconocen en la situación presentada algunos parámetros característicos de la descripción del movimiento ondulatorio científico (amplitud, frecuencia, ángulo, velocidad, etc.).	Hay una analogía de movimiento. Se ve como si se estuviera trasladando.		Reconocen que no hay propagación de energía porque el medio es discontinuo.	Idea principal: del tiempo de reacción de las personas.
	(12) C ₂ - Para que sea onda mecánica debe existir propagación (de energía, perturbación, interacción) y en esta situación no puede haber propagación porque se trata de partículas aisladas. Para que sea onda debe existir un medio continuo que permita la transmisión y no hay interacción entre las personas.	Todos reconocen que existe una analogía entre esta situación y la propagación de una onda transversal en una cuerda tensa. No hay medio de propagación, el movimiento se traslada por voluntad y coordinación de las personas.		Marcada influencia del aspecto perceptual y subjetivo de la situación presentada. ↓ Se propaga «algarabía», «emoción», «ruido».	

Los alumnos que usan el *esquema A* consideran una analogía entre las personas y las partículas de una cuerda y la existencia de esa analogía parece suficiente para que sea un movimiento ondulatorio. Esta *regla de acción* los lleva así a una respuesta errónea.

Los alumnos que usan el *esquema B* consideran la misma regla de acción para responder por SÍ o por No; identificar en la situación problemática alguna variable relacionada con la descripción de las ondas en el modelo ondulatorio científico. En algunos casos encuentran esa/s variable/s que les resulta/n significativa/s y en otros casos no la reconocen, por lo que su respuesta depende del resultado de la aplicación de esa regla de acción. Desde el punto de vista del modelo conceptual del movimiento ondulatorio, las respuestas son erróneas.

Los alumnos que usan un *esquema C₁* identifican una característica fundamental del movimiento ondulatorio científico: la propagación de un estímulo o la propagación de energía, pero no se cuestionan acerca de cómo se produce esa propagación y no reparan en la discontinuidad de la situación física presentada. No tienen incorporado en su *esquema* el concepto de medio continuo de propagación por lo que su regla de acción no resulta eficaz en este caso.

Los alumnos que usan el *esquema C₂* identifican una condición necesaria para que se produzca la propagación de un estímulo, y encuentran una *regla de acción* eficaz para resolver la tarea: verificar la existencia de una continuidad en la situación presentada para aceptarla o no como movimiento ondulatorio.

Cuadro 2
Resultados generales del cuestionario N.º 2 (pulso en una cuerda).

¿ES MOV. ONDULAT.?	¿POR QUÉ?	¿POR QUÉ SE TRASLADA LA PERTURBACIÓN?	¿SE PROPAGA ENERGÍA? ¿POR QUÉ?	¿DE QUÉ DEPENDE EL TIEMPO NECESARIO PARA LLEGAR AL EXTREMO?
SÍ (33)	(2) A ₁ - Porque las partículas se mueven verticalmente.	No responden.	No responden.	No responden o lo hacen en función de un algoritmo.
	(10) A ₂ - Porque es una perturbación que viaja a lo largo de la cuerda.	Por la fuerza que recibe de la mano. Las partículas de la cuerda van trasladando la energía. No responden.	Porque existe un trabajo. La mayoría no responde.	Del largo de la cuerda. De la velocidad de la onda. Del impulso aplicado a la cuerda. De la velocidad con que mueve la mano.
	(9) B - Porque el movimiento de la mano es armónico simple. Porque tiene amplitud y frecuencia. Porque se transmite energía. Porque perturbo la cuerda con $y(x,t) = \text{sen}(xt \pm \omega t)$.	Porque se propaga energía, por el movimiento de la mano, por las partículas del medio.	Sí se propaga, sin justificar. Se propaga porque existe un trabajo. No, porque la energía de cada partícula se conserva.	De la velocidad, de la frecuencia angular. De la amplitud de la onda. De la energía que se aplique.
	(8) C ₁ - Porque se propaga energía a través del medio por una perturbación. Porque por la cuerda atraviesa una onda transversal. Porque describe un movimiento ondulatorio. Porque transporta energía y no materia.	El movimiento se traslada a lo largo de la cuerda haciendo que las partes de la cuerda cambien de posición. Por el choque constante entre las moléculas, producido por una fuerza.	Sí, por el choque entre las partículas. Sí, porque existe un medio que en este caso es la cuerda.	Del tipo de cuerda. De la fuerza del movimiento. Del largo de la cuerda, De la frecuencia.
	(4) C ₂ - Porque hace cambiar las posiciones transversalmente de la cuerda a lo largo de toda la onda. Se produce una perturbación en el medio que transporta energía y no materia. Por la cuerda atraviesa una onda transversal producida por algún agente.	La vibración de una partícula perturba a la de al lado, haciéndola vibrar de igual modo. Porque el medio lo permite, las partículas de la cuerda están unidas y al mover una, arrastra a la otra. Por la elasticidad del material.	No responden o repiten la explicación del ítem anterior. Porque la mano transmite una fuerza que la cuerda propaga.	De la velocidad de propagación. De la tensión. De la densidad y longitud de la cuerda y de la tensión.
NO (2)	(2) B - Porque no se repite constantemente. Porque es un pulso.	La perturbación se traslada a lo largo de la cuerda haciendo que todas las partes de la cuerda cambien de posición. Por el movimiento de la mano.	Igual al ítem anterior. Se propaga energía cinética.	Del tipo de cuerda, de la fuerza del movimiento y del largo de la cuerda. Del medio.
(4)	Las respuestas no tienen información suficiente.			
(1)	No responden.			

Los alumnos que usan un *esquema* A_1 tienen una imagen que corresponde a las partículas de la cuerda moviéndose verticalmente. Desde este *esquema* no pueden dar cuenta del mecanismo de propagación y, por lo tanto, tampoco pueden pensar en la propagación de energía.

Para los alumnos que usan el *esquema* A_2 , el aspecto importante no está en las partículas, sino en la perturbación que se desplaza o viaja por la cuerda. Pero aún mantienen serias dificultades para dar cuenta del mecanismo de propagación: mencionan la fuerza de la mano o partículas que trasladan la energía, sin explicitar cómo se realiza ese traslado.

Los alumnos que usan un *esquema* B no establecen jerarquía de conceptos y, a veces, mencionan la propagación de la energía como una razón para que sea movimiento ondulatorio, aunque de su discurso posterior se deduce que no es un aspecto fundamental. Tampoco pueden ex-

plicar el mecanismo de propagación y, en general, siguen pensando en términos de partículas cuando mencionan el trabajo que realiza la mano y la conservación de la energía cuando la partícula oscila.

En esta situación problemática es más difícil realizar una distinción entre los *esquemas* C_1 y C_2 , ya que el medio involucrado no evidencia discontinuidad y en consecuencia no se produce como en el caso de la «ola» en el estadio un cuestionamiento que lleve a los alumnos a centrar su atención en este aspecto. La clasificación se realizó en base al discurso que usan para explicar el mecanismo de propagación, ya que de allí se puede inferir cómo están considerando al medio de propagación. Sólo los alumnos que usan estos dos *esquemas* C_1 y C_2 consideran en mayor proporción que la velocidad de propagación está relacionada con las características del medio de propagación, aunque algunos de ellos todavía sostienen que depende de la fuerza de la mano.

Cuadro 3
Resultados generales del cuestionario N.º 3 (pulso en un resorte).

¿ES MOV. ONDUL...?	¿POR QUÉ?	¿POR QUÉ SE TRASLADA LA PERTURBACIÓN?	¿SE PROPAGA ENERGÍA.....? ¿POR QUÉ?	¿DE QUÉ DEPENDE EL TIEMPO NECESARIO PARA LLEGAR AL EXTREMO?
SÍ (24)	(3) A_2 - Porque es una perturbación que viaja a lo largo del resorte.	Por el movimiento de la mano. El impulso que le da la persona que sostiene el resorte.	No justifican o no responden.	De la velocidad de propagación. Otros no responden.
	(11) B - Porque oscila. Porque es un movimiento periódico. Porque existe una velocidad de propagación. Porque es un movimiento producido por un MAS. Porque es una onda estacionaria. Porque tiene una frecuencia y una amplitud.	Mediante fluidos. Porque se transmite una cierta frecuencia. Por la velocidad. La fuerza aplicada al movimiento de la mano. Por el movimiento de las partículas. El resorte.	Sí, porque se realiza un trabajo. Sí, la energía mecánica. No se propaga porque la energía mecánica se conserva. Sí, porque el resorte lleva una velocidad.	De la velocidad de propagación. De la frecuencia. De la amplitud de la onda. De la longitud de onda sobre la velocidad de la onda. De la frecuencia.
	(6) C_1 - Porque las partículas se mueven longitudinalmente y la energía es la que se traslada. Porque el resorte es atravesado por la perturbación. Porque la onda lo atraviesa longitudinalmente.	Porque hay un medio que lo permite. Porque el medio es el resorte. Por la oscilación de las espiras a medida que pasa la onda.	Sí, porque existe un trabajo. No, porque la energía es conservativa.	Depende del medio. De la fuerza con que se produzca el pulso. De la longitud de onda.
	(3) C_2 - Porque la perturbación que se produce en un extremo llega al otro después de un cierto tiempo. Hay una onda que se propaga por el resorte en forma de energía.	El pulso se traslada a través de las partículas de la materia que constituye el resorte. Porque existe un medio material por el cual se puede propagar.	No responden o repiten la explicación del ítem anterior. Porque la mano transmite una fuerza que la cuerda propaga.	No sabe. De las propiedades intrínsecas del material. De la velocidad de propagación.
NO (1)	(1) A_2 - Porque se trata de una oscilación.	La mano realiza un movimiento horizontal de ida y vuelta.	Sí, porque hay una perturbación que viaja a lo largo del resorte.	No sabe.
(6)	Las respuestas no tienen información suficiente.			
(9)	No responden.			

Resulta notable, en esta situación, la cantidad de alumnos que no responden y la cantidad de respuestas que no tienen información suficiente que permitan su clasificación en alguno de los *esquemas*. Parece que en esta situación hay más dificultad que en las otras para encontrar un *esquema* disponible y el *esquema* se va construyendo entonces más lentamente que en otras *situaciones* ante las preguntas sucesivas y con una marcada tendencia hacia el *esquema* B.

En efecto, hay pocos alumnos que recurren a un *modelo de trabajo* centrado solamente en el aspecto perceptual y se destaca la proporción de alumnos que usan un *esquema* B con respecto a la totalidad de las respuestas clasificadas en alguno de los *esquema* detectados. Este hecho podría deberse, por una parte, a que la situación presentada no les ofrece visualmente aspectos que les resulten significativos (como ser la figura de onda), y por otra, a un recurso de accesibilidad por medio del cual identifican al resorte con un movimiento armónico simple y las ecuaciones que describen al mismo.

Al igual que en el caso de la cuerda, el resorte formado por sucesivas espiras de un cierto material no ofrece oportunidad para cuestionar la continuidad y aceptan implícitamente la continuidad del medio. La clasificación de las respuestas en C_1 o C_2 se realizó teniendo en cuenta la explicación del mecanismo de propagación.

Resultados de la secuencia de cuestionarios y entrevistas

El cuadro siguiente muestra la clasificación de los *esquemas* que usan los alumnos frente a las distintas *situaciones* problemáticas que se les presentan.

Los resultados sugieren que un *esquema* cambia hacia otro de mayor complejidad cognitiva en la medida en que aparece un «conflicto». Esta situación se da cuando responden en penúltimo o en último término al cuestionario que presenta la «ola en el estadio»: la nueva situación presentada les obliga, luego de haber usado un *esquema* que no consideraba en forma explícita la continuidad del medio de propagación, a analizar la «discontinuidad» que ahora se presenta. La jerarquía que le asignan a los *invariantes operatorios* cambia en función de la necesidad de explicar la nueva situación presentada y van apareciendo además otros *invariantes operatorios* que se agregan a los anteriores. Se produce así una «acomodación» de sus *esquemas* en el intento de dar cuenta de la nueva situación.

En cambio, los alumnos que abordan en primera instancia la «ola en el estadio» con un *esquema* de tipo A o B, que no considera la necesidad de un medio continuo con propiedades elásticas, no se cuestionan al respecto y no ven ninguna inconsistencia en sus razonamientos. Por lo tanto, no tienen inconveniente en usar el mismo *esquema* para las demás *situaciones*.

CONCLUSIONES

Se han detectado tres categorías de *esquemas* con distinto grado de comprensión conceptual:

– Los *esquemas* A_1 y A_2 son perceptuales, el significativo fuerte sería la imagen visual de una figura senoide en movimiento, con el agregado de algunos conceptos adquiridos durante la instrucción con los cuales intentan dar una explicación del mecanismo de propagación.

Cuadro 4
Evolución de los esquemas en la secuencia de cuestionarios.

ALUMNO	ESQUEMA USADO EN EL PRIMER CUESTIONARIO	ESQUEMA USADO EN EL SEGUNDO CUESTIONARIO	ESQUEMA USADO EN EL TERCER CUESTIONARIO
1	«ola en el estadio» A_2	«pulso en un resorte» A_2	«pulso en una cuerda» A_2
2	«pulso en una cuerda» C_1	«pulso en un resorte» C_1	«ola en el estadio» C_2
3	«pulso en un resorte» C_1	«pulso en una cuerda» C_1	«ola en el estadio» C_2
4	«ola en el estadio» C_1	«pulso en una cuerda» C_1	«pulso en un resorte» C_1
5	«pulso en una cuerda» B	«ola en el estadio» B	«pulso en un resorte» B
6	«pulso en un resorte» C_1	«ola en el estadio» C_2	«pulso en una cuerda» C_2

– El *esquema B* muestra una cantidad importante de *conceptos-en-acción* sin ningún tipo de jerarquía o relación entre ellos. No discriminan en este caso qué conceptos describen movimientos localizados ni qué describen movimientos globales del medio de propagación, y se detecta la ausencia de conceptos relacionados con las propiedades de elasticidad del medio de propagación. Permanece como un aspecto importante la figura sinusoide, pero de modo más abstracto, a través de las ecuaciones que describen el movimiento.

– El *esquema C* (C_1 y C_2) reconoce como significativo fuerte un aspecto importante del modelo ondulatorio científico: el medio de propagación. Pero en C_1 este concepto no está aún muy elaborado, ya que no exige la continuidad del medio para que se produzca la propagación. El *esquema C₂* se podría considerar el de mayor comprensión conceptual, el concepto de medio físico de propagación incluye la exigencia de continuidad, lo que sugiere que está implícita la idea de elasticidad como propiedad del mismo.

De acuerdo a los resultados generales de los tres cuestionarios, una misma situación puede generar distintos modelos de trabajo que se construyen por interacción entre la situación presentada y los invariantes operatorios disponibles en sus esquemas. En efecto, en los casos de la ola en el estadio y la propagación de un pulso en una cuerda tensa aparecen tres esquemas con distinto grado de comprensión conceptual; en cambio, un pulso propagándose en un resorte no les brinda como información relevante la figura sinusoide y muy pocos alumnos usan un esquema de tipo A.

La dificultad para reconocer un movimiento ondulatorio y/o explicar por qué se propaga la onda en una situación determinada estaría relacionada con la ausencia en sus *esquemas* de los *conceptos* de propagación, medio de propagación y propiedades elásticas del medio. Justamente, en el modelo científico de onda mecánica (Fig.1), éstos serían los *invariantes operatorios* que explican el mecanismo de propagación. A partir de estos resultados, se considera conveniente contemplar el uso de *situaciones* problemáticas que lleven a los alumnos a reflexionar y cuestionarse sobre la necesidad de la «conexión» entre los elementos del medio de propagación, como punto de partida para la comprensión del mecanismo de propagación en función de las propiedades elásticas del medio físico.

Los resultados obtenidos en la aplicación de la secuencia de cuestionarios muestran que los alumnos parecen lograr una evolución en sus *esquemas* en la medida en que

aparecen inconsistencias en sus razonamientos. Cuando un alumno aborda en primer lugar la situación correspondiente a «ola en el estadio» con un *esquema* que no considera el rol del medio de propagación, es difícil que ese *esquema* evolucione hacia otro de mayor complejidad cognitiva en las restantes *situaciones* si no se ha generado inconsistencia en los razonamientos. Se generan así nuevos interrogantes acerca de la evolución de los *esquemas* y del grado de complejidad de los mismos, en relación con las *situaciones* que va afrontando el alumno en su aprendizaje, que serían de interés para abordar desde este marco teórico.

Se considera que el marco teórico es potencialmente útil para el análisis del desempeño de los alumnos frente a una situación problemática en cuanto:

– Permite describir con un grado mayor de estructuración algunas dificultades que se presentan en el aprendizaje de esta temática, es decir, en términos de representaciones con distinto grado de estabilidad en la estructura cognitiva.

– Permite explicar por qué las respuestas de los alumnos dependen del contexto de la tarea, al considerar que los *modelos mentales* son una representación mediadora entre la situación presentada y el conocimiento que posee, que se construye por interacción entre los aspectos relevantes de la situación y los invariantes operatorios disponibles en su estructura cognitiva.

En cuanto a la tarea docente, la tesis subyacente a la teoría de campos conceptuales es que un buen desempeño didáctico se basa necesariamente en el conocimiento de las dificultades de las tareas cognitivas, de los obstáculos habitualmente enfrentados, del repertorio de procedimientos disponibles y de las representaciones posibles (Rodríguez y Moreira, 2004). En este sentido, consideramos que los resultados aportan información acerca de las características de las distintas representaciones sobre propagación de ondas mecánicas que construyen los alumnos y de la evolución de las mismas que permiten al docente:

– Ayudar a los alumnos a explicitar sus invariantes operatorios a través del lenguaje y de la multiplicidad de representaciones simbólicas.

– Evaluar la potencialidad de las *situaciones* que se presentan a los estudiantes para dar sentido a los conceptos abordados como así también de las distintas secuencias de situaciones que faciliten la construcción progresiva de los conceptos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRAVO, S. y PESA, M. (2002). Fenómenos ondulatorios: Modelos y razonamientos de estudiantes universitarios. *Memorias del VI Simposio de Investigadores en Enseñanza de la Física*. Corrientes. Argentina.
- EISBERG, R. y LERNER, L. (1983). *Física: Fundamentos y Aplicaciones*, Vol I, México: Mc Graw Hill.
- GRECA, I. y MOREIRA, M. (2002). Além da detecção de modelos mentais dos estudantes. Uma proposta representacional integradora. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, 7(1) <<http://www.if.ufrg.br/public/ensino/revista.htm>>.
- JOHNSON-LAIRD P. (1983). *Mental Models*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- LINDER, C. (1993). University physics student's conceptualizations of factors affecting the speed of sound propagation. *International Journal of Science Education*. 15(6), pp. 655-662.
- MAURINES L. (1992). Los estudiantes y la propagación de las señales mecánicas: dificultades de una situación de varias variables y procedimientos de simplificación, *Enseñanza de las Ciencias*, 10(1), pp. 49-57.
- MOREIRA M.A. (1996). Modelos mentais, *Investigações em Ensino de Ciências*, 4(3), Porto Alegre, pp. 193-232.
- PERALES PALACIOS, F.J. (1997). Escuchando el sonido: concepciones sobre acústica en alumnos de distintos niveles educativos. *Enseñanza de las Ciencias*, 15(2), pp. 233-247.
- RODRIGUEZ PALMERO, M. y MOREIRA, M. (2004). La Teoría de los Campos Conceptuales de Gérard Vergnaud. *La Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud, la Enseñanza de las Ciencias y la Investigación en el Área*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, pp. 7-39.
- UTGES, G. y PACCA, J. (1998). O que é uma onda. Un estudo sistemático do conceito procurando subsidios para o ensino, *Memorias del V Encontro de Pesquisa em Ensino da Física*, Florianópolis.
- UTGES, G. et al. (2002). La enseñanza y aprendizaje de conceptos complejos. En busca de referentes teóricos para comprender las dificultades de los estudiantes en la comprensión del concepto de onda. *Memorias del VI Simposio de Investigadores en Enseñanza de la Física*. Corrientes. Argentina.
- VERGNAUD, G. (1983). Multiplicative structures. *Acquisition of Mathematics Concepts and Processes*. Nueva York: Academic Press Inc.
- VERGNAUD, G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*. 10 (23), pp. 123-170.
- VERGNAUD, G. (1994). Multiplicative Conceptual Field: What and why? In Gherston, H. and Confrey J (Eds.). *The development of multiplicative reasoning in the learning of mathematics*. Albany, N. Y. State University of New York Press, pp. 41-59
- VERGNAUD, G. (1996). A trama dos campos conceituais na construção dos conhecimentos. *Revista do GEMPA* N.º 4, pp. 9-19, Porto Alegre.
- WELTI, R. (2002). Concepciones de estudiantes y profesores acerca de la energía de las ondas. *Enseñanza de las Ciencias*, 20(2), pp. 261-270.
- WITTMANN, M. (1998). Making sense of How Student Come to an Understanding of Physics. An example from mechanical waves. Tesis doctoral. University of Maryland, EEUU.
- WITTMANN, M. (2002). The objetc coordination class applied to wave pulses: analysing student reasoning in wave physics. *International Journal of Science Education*, 24(1), pp. 97-118.
- WITTMANN, M., STEINBERG, R. y REDISH, E. (2003). Understanding and affecting student reasoning about sound waves, *International Journal of Science Education*, 25(8), pp. 991-1013.

[Artículo recibido en junio de 2008 y aceptado en diciembre de 2008]

Anexo

Cuestionario 1

I. Analice la siguiente situación física: **se produce una «ola» en un estadio de fútbol.**

¿Puede considerar que se trata de un movimiento ondulatorio? Justifique su respuesta, sea ésta afirmativa o negativa.

II. Seleccione **sólo una** de las dos columnas siguientes, de acuerdo a su respuesta al ítem anterior, y responda a las cuestiones que se plantean:

Si Ud. considera que SÍ es una onda:	Si Ud. considera que NO es una onda:
a) ¿Por qué se traslada la perturbación, es decir, cuál es el mecanismo de esa traslación?	a) ¿Considera que existe alguna analogía entre esta situación física y una onda? ¿Cuál/es?
b) ¿Cuál sería para Ud. el medio de propagación?	b) ¿Por qué el movimiento se «traslada» por el estadio?
c) ¿Se propaga energía en este caso? ¿Por qué?	c) ¿Hay transferencia de energía en esta situación?
d) ¿De qué depende el tiempo que demora la perturbación en llegar al otro extremo del estadio?	d) ¿De qué depende el tiempo que demora la ola en llegar al otro extremo del estadio?

Cuestionario 2

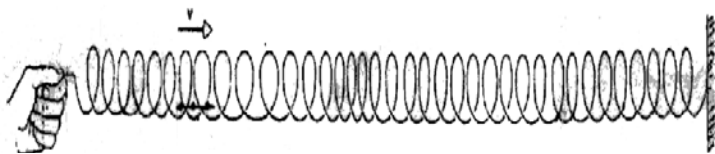
Analice la siguiente situación física: **Un pulso transversal que avanza por una cuerda tensa, sujeta en sus extremos como indica la figura:**



- ¿Puede considerar que se trata de un movimiento ondulatorio? Justifique su respuesta, sea positiva o negativa.
- Describa cómo se puede producir una perturbación o pulso igual al del dibujo. ¿Y una sucesión de pulsos?
- ¿Por qué se traslada la perturbación, es decir, cuál es el mecanismo que permite esa traslación? Explique.
- ¿Se propaga energía desde un punto a otro de la cuerda? ¿Por qué?
- ¿De qué depende el tiempo que demora el pulso en llegar al otro extremo de la cuerda?

Cuestionario 3

Analice la siguiente situación física: **Un pulso longitudinal que avanza en un resorte liviano sostenido en sus extremos como indica la figura:**



- ¿Puede considerar que se trata de un movimiento ondulatorio? Justifique su respuesta, sea ésta afirmativa o negativa.
- Describa de qué manera se puede producir una perturbación longitudinal que se traslade por el resorte. ¿Y una sucesión de pulsos longitudinales?
- ¿Por qué se traslada la perturbación, es decir, cuál es el mecanismo que hace posible que el pulso se traslade?
- ¿Se propaga energía desde un punto a otro del resorte? ¿Por qué?
- ¿De qué depende el tiempo que demora la perturbación en llegar al otro extremo del resorte?

Representations of mechanical waves propagation formed by university students

BRAVO, SILVIA¹; PESA, MARTA¹ y CABALLERO SAHELICES, CONCESA²

¹ Departamento de Física. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Universidad Nacional de Tucumán, Argentina

² Departamento de Física. Facultad de Ciencias. Universidad de Burgos, España

sbravo@herrera.unt.edu.ar

mpesa@herrera.unt.edu.ar

concesa@ubu.es

Summary

This research topic stems from a pedagogic interest in identifying the difficulties students encounter when learning wave motion.

Resorting to pedagogical research contributions in this field, we focus the research topic on the difficulties students experience when trying to conceptualize the mechanism of mechanical wave propagation, and the role of the propagation medium.

The theoretical framework used is based on a proposal which integrates Johnson-Laird's Mental Model Theory and Gérard Vergnaud's Theory of Conceptual Fields. In this context, a schema is a structure in long-term memory which holds elements typical of behavior -such as rules of action-, as well as cognitive elements -such as concepts-in-act and theorems-in-act. Mental models, on the other hand, are cognitive structures which operate in short-term memory. These unstable structures are generated in specific situations and they serve as mediums between the situation presented and long-term memory structures.

Three questionnaires were drawn up in order to make students activate instant representations (mental models), and state, through written or symbolic language, some of the concepts and theorems-in-act available in their schemas. These questionnaires were the result of a pilot trial which permitted us to pin down questions, improve the general layout and select the problems which were potentially richer to help students express themselves. Finally, the questionnaires were revised to ensure their validity.

This research was carried out with second-year Argentinean university students from Tucumán who were attending Physics II classes, a course which is part of the common core curriculum of engineering programs at *Universidad Nacional de Tucumán*. When the data was collected, students were attending lectures and theory-practice classes on mechanical waves, and they were doing practice work based on problem solution. Each questionnaire was handed out to a random sample of 40 students. Each answer was individually analyzed and interpreted, and all of them were carefully grouped into classes or categories which presented similar characteristics as regards the operational invariants that students used when they constructed a pattern of work

and the hierarchy they seem to have established among them. Thus, three categories were distinguished, which were called «schemas». Each schema constitutes a partial description of the structure underlying the construction of mental models based on their main component: operational invariants.

Then, all the answers, main ideas, and their efficiency to solve problems efficiently from the perspective of the scientific discipline's conceptual framework were identified and classified into categories in each questionnaire. Results show that difficulties to recognize wave motion or to explain why a wave propagates in a given situation might be related to the absence of concepts such as propagation, propagation medium, and elastic properties of the medium in their schemas. Moreover, we can see that the same situation can generate different patterns of work, according to the different operational invariants available in their schemas.

In order to validate the cognitive structure stability interpretation of the representations identified, six volunteers were asked to answer the three questionnaires sequentially. Then, these students were interviewed individually in order to clarify the answers provided. Results show students seem to be able to restructure their schemas by increasing the degree of cognitive complexity as long as there appear inconsistencies in their reasoning when they deal with each situation. Although it is not possible to generalize these findings, they provide further experimental evidence of the stability of the representations inferred in the group of 120 students, and they allow us to generate new questions about the potential of the situations to bring about a reorganization of schemas.

Finally, we must add that the theoretical framework has proved useful for analyzing the performance of students when they analyze a problem because it offers tools to explain why students' answers are highly dependent on context when we regard mental models as representations which act as mediums between the situation presented and knowledge stored in the mind. Furthermore, it provides clues as to how to draw up didactic proposals which allow the identification of operational invariants and the subsequent discussion of their validity and suitability, thus guiding their development towards real concepts and theorems of the discipline's conceptual model.

