

Modelo de niveles de pensamiento y recursos cognitivos de aprendizaje para la enseñanza de la física

Thinking levels model and cognitive learning resources for physics teaching

Alejandro Pérez Rangel^{1,2}

¹Institución Educativa Oficial Fagua, Secretaría de Educación Municipal, Vereda Fagua, Chía. Colombia.

²Departamento de Física, Licenciatura en Física, Universidad Pedagógica Nacional, Cl. 72 #11-86, Bogotá. Colombia.

E-mail: alejandroperez.co@gmail.com

Recibido el 19 de julio de 2021 | Aceptado el 15 de noviembre de 2021

Resumen

El presente trabajo propone un *modelo de niveles de pensamiento para la enseñanza de la física* (MNP+Física) que define los conocimientos previos como *recursos de aprendizaje*, clasificados en *recursos epistemológicos* (como las creencias populares fuertemente arraigadas) y *recursos conceptuales* (como los conceptos propios de las teorías de la física). El MNP+Física define los niveles como *nocional, conceptual y formal*, en términos de los tipos de recursos de aprendizaje que el estudiante usa y la prioridad con que los usa. Para ilustrar el modelo se hace un estudio de caso con estudiantes de último año de educación media indagando algunas ideas sobre lo que saben del concepto de fuerza. Los resultados muestran que los estudiantes están en un nivel nocional, es decir, usan sus recursos epistemológicos de manera prioritaria sobre los recursos conceptuales (concepto de fuerza de la mecánica Newtoniana). El modelo define los niveles de pensamiento de manera general, lo que le da versatilidad en la medida que puede ser aplicado en enseñanza de la física en educación media o educación superior e incluso puede extenderse al campo de la enseñanza de las ciencias naturales en general (MNP+Física, MNP+Química y MNP+Biología) o la enseñanza de las matemáticas (MNP+Matemáticas).

Palabras clave: Enseñanza de la física; Recursos de aprendizaje; Niveles de pensamiento; Educación media.

Abstract

The present work proposes a *thinking level model for teaching physics* (TLM+Physics) that defines prior knowledge as *learning resources*, classified as *epistemological resources* (such as strongly rooted popular beliefs) and *conceptual resources* (such as the concepts of the theories of physics). *The TLM+Physics defines the levels as notional, conceptual and formal*, in terms of the type of resources the student uses and the priority with which he uses them. To illustrate the model, a case study is made with final year high school students, inquiring some ideas about what they know about force concept. The results show that the students are at a notional level, that is, they use their epistemological resources as a priority over their conceptual resources (force concept from Newtonian mechanics). The model defines the thinking levels in a general way, which gives it versatility, since it can be applied in physics teaching in secondary or higher education and can even be extended to the field teaching natural sciences in general (TLM+Physics, TLM+Chemistry and TLM+Biology) or math teaching (TLM+Math).

Keywords: Physics teaching; Learning resources; Thinking levels; High school education.

I. INTRODUCCIÓN

La enseñanza de la física es un campo de investigación activo que aborda aspectos como metodologías de enseñanza, evaluación de aprendizajes, ideas o aprendizajes previos y su rol en el proceso de aprendizaje de la física. Las posturas filosóficas y ontológicas son diversas; los enfoques particulares cualitativos y estudios de caso son tan valiosos como los instrumentos de evaluación estandarizados. No obstante, es posible reconocer un rasgo común: la necesidad de caracterizar procesos de aprendizaje de manera cualitativa a partir de descripciones detalladas de las dinámicas de aula.

La comunidad científica que estudia la enseñanza de la física, tiene propósitos como la caracterización de la manera como los estudiantes usan sus conocimientos (formales o informales) en diferentes contextos de aprendizaje o los criterios para usarlos (Bao y Redish, 2006; Guisasola, Hartlapp, Hazelton, Heron, Lawrence, Michelini y Zuza, 2016); se identifican iniciativas que buscan mayor participación de los estudiantes reforzando del trabajo colaborativo y el debate con sus pares (Mazur, 1997); se desarrollan modelos teóricos que buscan develar los mecanismos cognitivos que influyen en el aprendizaje de la física (Vosniadou, 1994); surgen metodologías denominadas activas, que promueven un rol protagónico del estudiante y no del maestro y que incluyen actividades en las que el estudiante interactúa de forma directa con los fenómenos y que han mostrado buenos resultados (Barbosa, 2008, Freeman, Eddy, McDonough, Smith, Okoroafor, Jordt y Wenderoth, 2014); otros estudios buscan identificar la dinámica (en función del tiempo) de los aprendizajes que logran los estudiantes y que están determinados por los métodos de enseñanza, aprendizajes previos fuertemente arraigados (no necesariamente correctos) o simplemente por aprendizajes memorísticos que no perduran en el tiempo (Heckler y Sayre 2010; Talero, Mora, Organista y Barbosa, 2013). De manera general, las iniciativas se diseñan (y re diseñan) al tiempo que se van implementando, es decir, se desarrollan secuencias basadas en resultados de investigación (Guisasola, Zuza y Sagastibeltza, 2019; Guisasola, Furió y Ceberio, 2008).

En el contexto anterior, la enseñanza de la física se puede identificar como como una ciencia experimental, en el sentido que usa la observación, la recolección de información y el análisis de los procesos de aprendizaje y busca establecer el éxito o fracaso de los métodos de enseñanza utilizados (McDermott y Redish, 1999). Dichos rasgos diferencian las nuevas dinámicas de enseñanza de la física de las denominadas tradicionales, cuyos fundamentos teóricos y metodológicos eran tomados principalmente de la psicología y ciencias del comportamiento (Skinner, 1965; Piaget y Inhelder, 1948; Pozo, 1989; Vygotsky, 1980).

Uno de los elementos más relevantes en las nuevas dinámicas de enseñanza es la evaluación de los aprendizajes y tiene un doble propósito: identificar qué sabe un estudiante sobre el tema de estudio y cómo lo sabe¹; el segundo propósito es valorar el éxito o fracaso de las metodologías de enseñanza (Bao *et al.* 2009, Caballero *et al.* 2012). Surgen instrumentos estandarizados que permitan recolectar información cualitativa y reportar resultados de manera confiable y objetiva. Algunos de los instrumentos más populares son el Force Concept Inventory (FCI por sus siglas en inglés) que permite evaluar el nivel de conocimientos de los estudiantes en torno a los conceptos de fuerza y movimiento (Hestenes, Wells y Swackhamer, 1992); instrumentos similares son el Electromagnetism Concept Inventory (EMCI) (Notaros 2002) y el Brief Electricity and Magnetism Assessment (BEMA) (Ding, Chabay, Sherwood y Beichner, 2006) que pretenden evaluar la comprensión de los estudiantes de conceptos fundamentales del electromagnetismo.

Una característica de interés es que los instrumentos de evaluación tienen en cuenta ideas previas y del sentido común de los estudiantes, que generalmente son contradictorias con los conceptos físicos; en lugar de descartarlos como errores, se usan como insumos del proceso evaluativo.

En esta propuesta, las ideas y aprendizajes previos de los estudiantes se redefinen como *recursos de aprendizaje* y, de manera preliminar, se pueden categorizar en dos tipos: ideas formales como los conocimientos adquiridos, por ejemplo, sobre mecánica Newtoniana; e ideas informales (o errores conceptuales), como las aprendidas por la experiencia cotidiana, las creencias populares o imaginarios, en torno a conceptos físicos (Hammer y Elby, 2002). En ese marco conceptual, se asume que el aprendizaje no consiste en implantar conocimientos en una región vacía del cerebro, en su lugar, es concebido como un cambio conceptual² (Strike y Posner, 1982), cuya dinámica está dada por la manera como los estudiantes administran sus recursos de aprendizaje, es decir, en qué momentos o con qué criterios acuden a dichos recursos de aprendizaje (Hammer y Elby, 2002; Hammer, 2000; Zembylas, 2005; Clement, Brown y Zietsman, 1989; Hammer, 1996; Hogan, 1999; Hammer, Elby, Scherr y Redish, 2005).

En una primera aproximación, no se buscará explicar la dinámica de aprendizaje en detalle, en su lugar, se busca establecer etapas que permitirían describir y caracterizar el conocimiento de los estudiantes, lo que a su vez permitirá

¹ Y, sobre todo en el contexto de la investigación se busca conocer, describir, interpretar cómo lo sabe.

² Las condiciones para el cambio conceptual que enuncian (Strike y Posner, 1982), se sintetizan en Moreira y Greca (2003): “...hay condiciones para el cambio conceptual cuando existe insatisfacción con la concepción que uno tiene y cuando el individuo se encuentra con una nueva concepción (científicamente aceptada) que es inteligible y le parece plausible y fructífera”

dar cuenta del avance (o no) de un estudiante en su proceso de aprendizaje. Para ello, se presentará un modelo denominado *niveles de pensamiento* fundamentado en el concepto de *recursos de aprendizaje*.

Este documento está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se describe la idea de *recursos de aprendizaje* como base teórica para el modelo de *niveles de pensamiento*. En la sección 3 se da un panorama investigativo sobre los denominados recursos de aprendizaje. En la sección 4 se describen los elementos claves del modelo de niveles de pensamiento y en la sección 5 se muestra un estudio de caso con estudiantes de educación media en el contexto de la enseñanza de la Física. Al final, se presentan, a manera de conclusiones, lo que se consideran los hallazgos más relevantes.

II. RECURSOS DE APRENDIZAJE

Los recursos de aprendizaje se pueden entender como *estructuras cognitivas básicas*. Según Hammer (2000) se clasifican en:

1. Recursos epistemológicos³: aprendizajes determinados por el contexto social o cultural. El rasgo fundamental de estos recursos es que son adquiridos de manera informal, es decir, no se aprendieron en una clase con un propósito de enseñanza. Las creencias populares son un buen ejemplo de este tipo de recursos.

2. Recursos conceptuales: aprendizajes adquiridos en escenarios académicos formales. Los conceptos aprendidos en clase son un ejemplo de este tipo de recursos.

Para el presente trabajo, solo se considerarán como recursos conceptuales las ideas aprendidas que hacen parte del cuerpo de conocimientos de la física. Por ejemplo, la idea de que la masa es una medida de la inercia o resistencia al cambio de movimiento, es un recurso conceptual. En cambio, la idea que la fuerza causa movimiento, se puede denominar como idea no científica que está relacionada con experiencia cotidiana, por lo que se podría considerar un recurso epistemológico.

Vale aclarar que no se debe generalizar suponiendo que los recursos epistemológicos siempre promueven razonamientos incorrectos, o que los recursos conceptuales siempre promueven los razonamientos correctos. Por ejemplo, un recurso conceptual puede establecer que la fuerza es la causa del movimiento, lo cual es falso, en virtud de la primera ley de Newton; o que la tierra ejerce más fuerza a la luna de lo que la luna ejerce sobre la tierra, desconociendo la tercera ley de Newton; o que una batería descargada es análoga a un tanque de agua descargado: vaciar el tanque de agua sería análogo a vaciar la batería de cargas. En todos los casos subyacen ideas correctas: 1) la fuerza está relacionada con el cambio de movimiento; 2) la inercia o resistencia al cambio de movimiento está relacionada con la masa; 3) una pila cargada produce un voltaje que hace funcionar un circuito, una pila descargada produce voltaje cero (o muy bajo), lo que evita que el circuito funcione.

Por su parte, los recursos epistemológicos pueden promover situaciones favorables para el aprendizaje de la física. Las situaciones, en principio, pueden parecer extrañas, mágicas o contra intuitivas; lo que constituye un elemento motivante para los estudiantes al enfrentar creencias populares o ideas colectivas no científicas que pueden ser desvirtuadas a la luz de los hechos experimentales (Barbosa, 2008). Por ejemplo, explicar por qué se unen dos hojas de papel cercanas al soplar entre ellas si "*deberían*" separarse o, por qué una persona no puede levantarse de su silla sin inclinar primero el cuerpo hacia adelante; o por qué se enciende un bombillo en las manos sin estar conectado a una fuente de voltaje. A dichas situaciones subyacen explicaciones científicas: 1) fluidos en movimiento y diferencias de presión, 2) centro de masa y torque y 3) inducción electromagnética. En cualquier caso, los recursos de aprendizaje pueden ser útiles si se usan de manera intencionada por parte del docente y de manera cada vez más consciente por parte del estudiante.

La siguiente situación ilustra cómo identificar los recursos conceptuales y epistemológicos. En clase de física de secundaria, se estudian diferentes situaciones en las que se describen fuerzas. Como ejercicio, el docente propone a sus estudiantes que analicen la figura 1 y le pide que seleccionen el razonamiento que consideran correcto

- Opción A. Como el hombre tiene más masa, ejerce más fuerza
- Opción B. Como el hombre tiene más masa, entonces, el niño debe ejercer más fuerza.
- Opción C. A pesar de que las masas son diferentes, las fuerzas son iguales en magnitud, en virtud de la tercera ley de Newton

³ Hammer (2000), les confiere un papel igual de importante a los recursos epistemológicos la hora de abordar procesos de aprendizaje, de hecho, los defiende como elementos estructurales en el desarrollo de metodologías de enseñanza y como temas fundamentales en la investigación en enseñanza de la física.



FIGURA 1. Ilustración de una lucha de fuerzas entre dos personas pretende hacer evidente la diferencia de masa entre los objetos en contacto. También el hecho de que se describan los sujetos como adulto y niño incita a usar la idea de que el adulto puede ser más fuerte.

Evidentemente, las opciones A y B son incorrectas y contradictorias entre sí. Sin embargo, pudieron darse a pesar de usar una idea “válida”. Por ejemplo, es correcto relacionar la cantidad de masa con la inercia o resistencia al cambio de movimiento, lo que se asocia a la idea de ejercer “más” o “menos” fuerza. Pero, la idea que permite llegar a un razonamiento correcto es la tercera ley de Newton. La inercia y la tercera ley de Newton son ejemplos de recursos conceptuales utilizados para resolver la situación planteada. Por otro lado, la idea que “el niño es más débil que el hombre”, es un recurso epistemológico y usarlo podría llevar a los razonamientos A y B.

Hammer (2000), usa la metáfora de las rutinas en programación (funciones diseñadas para resolver tareas específicas) para ilustrar la idea de *recurso de aprendizaje*. Argumenta que, cuando el estudiante se enfrenta a responder una pregunta o resolver una situación, simplemente accede a una o varias rutinas que incluyen aprendizajes empíricos previos, que se activan de manera prioritaria, o aprendizajes construidos mediante instrucción, que en general no se activan de manera prioritaria. Puede suceder que se seleccione la rutina incorrecta para resolver determinado problema (lo que llevaría a los razonamientos 1 y 2).

En la enseñanza de la física, la metáfora de las rutinas sugiere dos cosas:

1. Se pueden diseñar escenarios de aprendizaje con la intención de que los estudiantes activen las rutinas de manera más eficiente, es decir, que reconozcan y diferencien entre recursos conceptuales y recursos epistemológicos
2. Surge como propósito clave, lograr que los estudiantes activen las rutinas de manera consciente, es decir, se busca un desarrollo meta cognitivo.

Comprender la forma en que dichos recursos se construyen y cómo es su dinámica, es un reto que implica una aguda observación de las conductas del estudiante y un cuidado especial del contexto en que se abordan (Hammer y Elby, 2002). En efecto, una combinación de elementos cognitivos (los recursos de aprendizaje) y métodos experimentales (las metodologías de enseñanza e instrumentos de evaluación) proveen un marco metodológico útil en la investigación en la enseñanza de la física.

III. GESTIÓN DE LOS RECURSOS DE APRENDIZAJE

Caracterizar los procesos de pensamiento en los estudiantes, permite reconocer la manera como el estudiante gestiona sus recursos de aprendizaje. En otras palabras, da elementos de análisis para entender la dinámica de su estructura cognitiva. En esta línea se pueden resaltar varios estudios como los de Bao y Redish (2006); Di Sessa (1993); Mintrel (1992); Redish (2014); Sabella y Redish (2007).

Por ejemplo, Bao y Redish (2006), hace una descripción de características propias de los procesos de pensamiento de los estudiantes. Su referente teórico es el concepto de memoria, entendida como una serie de recursos almacenados (por experiencia o por instrucción) a los cuales el individuo accede dependiendo del estímulo externo o lo que él denomina contexto. La forma en la que el estudiante accede a dichos recursos define conceptos como confusión, que tiene que ver con el hecho de que, en el proceso de pensamiento de los estudiantes, los conocimientos científicos entran en conflicto con la intuición del estudiante (desarrollada fundamentalmente desde la práctica o la interacción directa). En dicho modelo, la estructura mínima de conocimiento (irreductible) se define como un *elemento de conocimiento* (el equivalente a un bit de información en memoria).

Otros modelos también hacen referencia al *elemento de conocimiento* con conceptos como ideas previas, p-prims (Di Sessa, 1993) o facetas (Mintrel, 1992). Estos conceptos, en el contexto del presente trabajo, se consideran equivalentes a una *estructura cognitiva básica*, es decir, *son recursos de aprendizaje*.

Para entender la dinámica de la estructura cognitiva del estudiante, se plantea el siguiente principio: en el nivel más básico de desarrollo del pensamiento, los recursos de aprendizaje no se administran, sino que surgen de manera involuntaria (al azar) o de forma ineficiente.

Lo anterior implica que, en el nivel básico, los estudiantes generan descripciones incoherentes de un fenómeno, aplican razonamientos diferentes para fenómenos equivalentes o simplemente no enlazan sus conocimientos para generar un mejor nivel de comprensión. En otras palabras, el estudiante construye modelos mentales o formas de pensar⁴ con múltiples recursos (en términos de memoria) pero desconectados en los procesos de aprendizaje. En efecto, un estudiante puede tener un modelo mental de un fenómeno, construido a partir de malos entendidos o simplemente un conjunto de creencias populares.

Una aproximación cualitativa de *la forma como se administran o evolucionan los recursos de aprendizaje*, exige definir el estado inicial de aprendizaje del estudiante, en términos de qué tipo de recursos tiene. Por ejemplo, se puede establecer el estado de conocimiento de un estudiante, grupo o clase, en términos de los resultados obtenidos en un test diagnóstico⁵.

En ese orden de ideas, los modelos mentales explorables son los que la prueba estandarizada plantea: al contestar el test, el estado de aprendizaje del estudiante inevitablemente colapsará a las opciones (es decir los modelos brindados en el test). Aunque dicha metodología permitiría caracterizar si predomina el uso de recursos conceptuales o epistemológicos en un grupo de estudio, no sería suficiente para aclarar cómo el grupo accede a dichos recursos, o mejor, cómo optimizar el acceso a dichos recursos.

A manera de síntesis, es posible afirmar que existen fundamentos neurológicos (en términos de conexiones y redes) y cognitivos (en términos de procesos de memoria y procesos de pensamiento) que buscan caracterizar el proceso (o dinámica) de aprendizaje de los estudiantes. En lo cognitivo, se pueden definir bien los recursos de aprendizaje a los que los estudiantes pueden acceder: *los recursos conceptuales* y *los recursos epistemológicos* y ambos son influenciados por el contexto (cultural, académico, afectivo, cognitivo, etc.). Aunque el propósito es develar la dinámica del proceso de aprendizaje, parece ser más sencillo conocer el estado de aprendizaje en el sentido de establecer qué sabe el estudiante y cómo lo sabe, en otras palabras, identificar sus recursos de aprendizaje y cuáles usa de manera prioritaria.

IV. MODELO DE NIVELES DE PENSAMIENTO

Hasta aquí se ha expuesto referentes teóricos y de investigación alrededor de la enseñanza de la física. Se plantea como objetivo conocer el estado de aprendizaje en el sentido de establecer qué sabe el estudiante y cómo lo sabe, en otras palabras, identificar sus recursos de aprendizaje. En lo que sigue, se presenta un modelo denominado *niveles de pensamiento* que pretende aportar en esa dirección.

El modelo es una adaptación al escenario de la enseñanza de la física, de los elementos propuestos por Julián y Miguel De Zubiría (1992), en el texto *Biografía del pensamiento*.

El nivel nocional de pensamiento es descriptivo, lo que quiere decir que el estudiante explica los hechos experimentales o los fenómenos estudiados con base en su experiencia. Predomina el uso de recursos epistemológicos o construcciones colectivas (no científicas), lo que hace que el estudiante construya explicaciones con errores comunes o malos entendidos. Adicionalmente, surgen explicaciones diferentes para fenómenos equivalentes. Esta etapa indica un aprendizaje memorístico, que no perdura en el tiempo y, por lo tanto, poco significativo. Puede equipararse este nivel con el de un estudiante inexperto (Sabella y Redish, 2007).

En el *nivel conceptual de pensamiento* el estudiante puede utilizar el concepto físico en diferentes contextos, es capaz de ejemplificar o de establecer enunciados generales en torno al concepto, extrae información que inicialmente está implícita. Estas características en las descripciones del estudiante evidencian una estructura de pensamiento más elaborada que en la etapa nocional. Sin embargo, aunque se pueden identificar ideas causales en el discurso (un hecho es consecuencia de otro (Rosemary *et al.*, 2008)), pueden persistir explicaciones provisionales o primitivas (Di Sessa, 1993) basadas en la experiencia y alejadas de una descripción científica. En principio, puede decirse que el estudiante gestiona sus recursos conceptuales y los usa de manera prioritaria sobre los recursos epistemológicos.

El nivel formal de pensamiento es un nivel de mayor coherencia, que en los términos propuestos por Sabella y Redish, (2007), significa que existen un conjunto de recursos fuertemente relacionados que facilitan la resolución de problemas. Podría decirse incluso que el estudiante usa sus recursos conceptuales de una manera consciente para construir nuevos significados, es decir, se apropia de ideas del cuerpo de conocimientos de la física y los usa para

⁴ Los modelos mentales (Bao *et al.*, 2009) y las formas de pensar (Hammer, 2000) es lo que los autores definen como la forma en que se usan lo que en el presente trabajo son recursos de aprendizaje.

⁵ Según Bao *et al.* (2009), el estado de un estudiante es el resultado de la interacción entre el estudiante y un test (instrumento de medida).

explicar y para elaborar un discurso alrededor de la situación de estudio. Este nivel formal es indicio de aprendizaje significativo (Moreira, 2012). El estudiante no solo ejemplifica y generaliza el concepto a diferentes contextos o fenómenos, también es capaz de deducir o inferir, es decir, el estudiante adquiere la habilidad de predecir comportamientos físicos fundamentado en la comprensión de un concepto físico o de un hecho experimental. El nivel formal también puede asociarse con procesos de pensamiento de orden superior que redundan en los procesos de aprendizaje de la física (Ramos, Dolipas y Villamor, 2013).

Este modelo pretende dar elementos de juicio para caracterizar el estado de aprendizaje de un estudiante que aprende física, lo que a su vez podría dar indicios del éxito (o fracaso) de la metodología de enseñanza en términos de si persiste un nivel nocional o avanza a un nivel conceptual después de haber implementado una metodología específica.

A. Estudio de caso. Niveles de pensamiento en estudiantes de secundaria al abordar la idea de fuerza.

Con el ánimo de ilustrar las definiciones propuestas antes para los niveles de pensamiento⁶ (nocional, conceptual y formal), en esta sección se analizarán los resultados de un cuestionario relacionado con las ideas de fuerza, diagramas de fuerza y la tercera ley de Newton.

El cuestionario se implementó mediante un formulario de Google al que estudiantes de grado once⁷ (promoción 2020) de la Institución Educativa Oficial Fagua, del municipio de Chía, accedieron de manera voluntaria. En total 42 estudiantes respondieron (27 estudiantes de la sede principal denominada Fagua y 15 estudiantes de la segunda sede denominada Tíquiza).

Las preguntas surgieron de dinámicas observadas por el docente de física (autor del presente trabajo), a lo largo del desarrollo del curso, es decir, las preguntas y opciones de respuesta son inspiradas en razonamientos de los estudiantes y situaciones equivalentes estudiadas con anterioridad.

La solución del formulario no tenía efectos en las calificaciones de la asignatura de física, en su lugar, se les presentó el formulario como un instrumento con fines pedagógicos e investigativos en el que se indagarían algunas interpretaciones y aprendizajes obtenidos en el campo de la mecánica a lo largo del curso.

B. Instrumento. Preguntas e intencionalidad

El instrumento fue validado por colegas de la línea “Enseñanza de la Física: Enfoques didácticos” del Departamento de Física de la Universidad Pedagógica Nacional de Colombia. Adicionalmente, colegas docentes de física en nivel de secundaria y nivel universitario reconocen que las preguntas tienen en cuenta errores comunes o malas interpretaciones que han observado en sus estudiantes durante sus clases de física y que también son ampliamente identificados por la comunidad que investiga en enseñanza de la física (Clement *et al.*, 1989; Hestenes *et al.*, 1992; Hammer 1996; Hammer y Elby., 2002; Talero *et al.*, 2013). Dichas interpretaciones se expondrán en mayor detalle a continuación como complemento a la descripción de las opciones de respuesta de cada pregunta.

Pregunta 1. La siguiente imagen (figura 1), muestra la intensa batalla entre dos luchadores. Aparentemente uno de ellos tiene ventaja.

Si analizamos la fuerza con que interactúan los deportistas en la imagen, se puede afirmar que

- A) La fuerza que ejerce el niño al adulto es mayor que la fuerza que le ejerce el adulto al niño.
- B) La fuerza que ejerce el niño al adulto es menor que la fuerza que le ejerce el adulto al niño.
- C) Las fuerzas entre ellos son iguales a pesar de que tienen diferentes masas.
- D) Las masas son diferentes, pero no hay datos suficientes para establecer quién ejerce más fuerza sobre su contrincante.

Esta pregunta pretende indagar la interpretación del estudiante en torno a la tercera ley de Newton. Las opciones de respuesta plantean implícitamente dos ideas comunes en el estudio de las fuerzas

1. Suponer que el objeto de mayor masa (adulto) ejerce más fuerza; este error puede estar vinculado con la idea de inercia, en cuyo caso, es correcto afirmar que, dada una fuerza de magnitud constante, es más difícil cambiar el movimiento de un objeto cuando su masa es mayor.

⁶ En Pérez (2010) se hace una primera descripción, del modelo de niveles de pensamiento en el caso de la enseñanza del concepto de estado cuántico.

⁷ En Colombia, la educación secundaria se divide en dos niveles: nivel de básica secundaria conformada por los grados sexto, séptimo, octavo y noveno; nivel de educación media conforma por los grados décimo y once, los estudiantes que culminan grado once obtienen el título de bachilleres.

2. Al ser el niño un objeto animado (con vida), el estudiante tiende a identificarse con él y, por ello, supone que el niño hace más fuerza porque le es “*más difícil*” empujar al adulto. Este error puede estar relacionado con concepciones puramente epistemológicas que, por ejemplo, relacionan al niño con la idea de “*débil*” al compararlo con el adulto que, por su apariencia, se supondría “*más fuerte*”.

Pregunta 2. En la mecánica clásica, la dinámica del sistema solar se describe, con muy buenos resultados, con la Ley de Gravitación de Newton. Por ejemplo, la traslación de la Tierra alrededor del Sol o la interacción de la Tierra con la Luna, se describen a partir de una fuerza de atracción que se cuantifica conociendo las masas y la distancia de separación de los cuerpos implicados. ¿Cuál de las siguientes imágenes representa mejor las ideas expuestas anteriormente?



FIGURA 2. Ilustración de interacción gravitacional entre la Tierra y la Luna. De manera intencional, los vectores fuerza se hacen explícitamente diferentes en A y B. La presente descripción no aparece en la pregunta del cuestionario.

Al igual que en la primera pregunta, la aplicación de la tercera ley de Newton permitiría responder correctamente. Sin embargo, si persiste la idea de que las “*masas diferentes implican fuerzas de interacción diferentes*”, se proponen dos criterios de análisis

1. Si bien se ha establecido en el enunciado que la ley de gravitación depende de la masa de los objetos, el estudiante debe advertir que la dependencia es de ambas masas y que la fuerza, en virtud de la tercera ley, es igual en magnitud para ambos objetos, pero de sentido contrario. Un estudiante que selecciona la opción A, proyecta la misma interpretación de la primera pregunta (opción A: el niño al ser más débil debe esforzarse más) y, al seleccionar la opción B, de cierta manera, concluye su respuesta relacionando la dependencia de la ley de gravitación con la masa, lo cual es correcto, con el error conceptual de “*el objeto de mayor masa ejerce más fuerza*”.

2. Al persistir el error conceptual planteado en las opciones de la primera pregunta, el estudiante puede encontrar una “*aparente coherencia*” en su interpretación al comparar con su respuesta anterior.

Pregunta 3. En una clase de física, se estudian diagramas de fuerza para diferentes situaciones. La imagen muestra el diagrama de fuerzas propuesto por un estudiante para el caso de una caja en reposo sobre una rampa. Otros estudiantes afirman que el diagrama de su compañero tiene errores. A continuación, se muestran algunos de los argumentos expuestos por los estudiantes. Seleccione los que considera correctos.

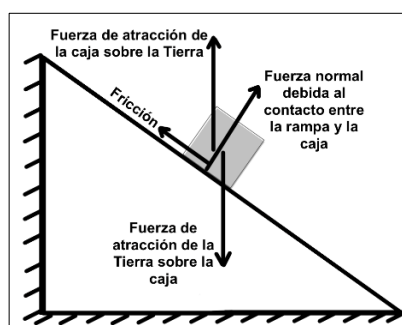


FIGURA 3. Ilustración para una caja en reposo sobre una rampa. Intencionalmente se describe la fricción sin indicar si es cinética o estática y no se menciona explícitamente la palabra peso. El diagrama indaga si se comete el error de representar fuerzas de acción y reacción sobre el mismo objeto. La presente descripción no aparece en la pregunta del cuestionario.

- A) El diagrama tiene errores porque si la caja está en reposo, entonces, no desliza y no debe haber fricción
- B) El diagrama tiene errores porque al estar la caja en reposo, las fuerzas deben equilibrarse y eso no sucede en el diagrama.

C) El diagrama tiene errores porque la fuerza de atracción de la caja sobre la Tierra debe ser más grande que la fuerza da la Tierra sobre la caja.

D) El diagrama tiene errores porque la fuerza de contacto es la misma fuerza normal y debería dirigirse hacia arriba, opuesta al peso.

E) El diagrama tiene errores porque no todas las fuerzas dibujadas actúan sobre la caja.

Aunque nuevamente es posible concluir una respuesta correcta a partir de la ley de acción y reacción; en esta situación se ponen de manera implícita varias ideas

1. Si se selecciona la opción A, se identifica la idea errónea de que solo hay fricción si hay deslizamiento, lo que dificultaría entender ideas como fricción estática o fricción por rodadura. De hecho, también daría indicios sobre la interpretación de la dirección de la fricción relacionada con el deslizamiento entre superficies (deslizamiento relativo más exactamente).

2. Aunque la opción B podría indicar que el estudiante razona aplicando la segunda ley de Newton correctamente, no reconoce que es un error dibujar las fuerzas de acción y reacción en el mismo diagrama. Adicionalmente, el lector puede advertir que este error implicaría la creencia de que un objeto puede hacerse fuerza a sí mismo (la caja se ejerce fuerza a sí misma).

3. En la opción C persiste la idea de asociar “masa-fuerza” de manera incorrecta.

4. La opción D supone que la fuerza normal siempre es contraria al peso del objeto, lo cual es incorrecto.

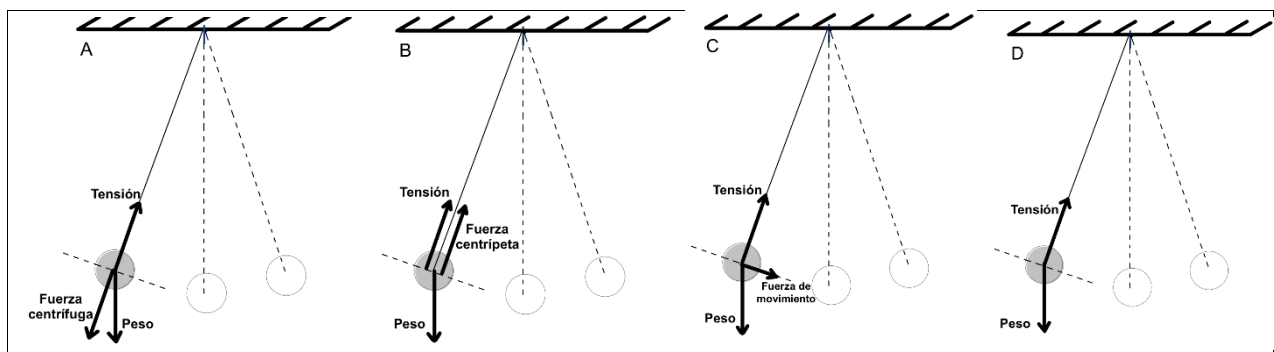


FIGURA 4. Ilustración para el péndulo que oscila. En las opciones A, B y C, se incluyen errores conceptuales identificados que se relacionan con fuerzas ficticias (A y C) o con un error de interpretación de la fuerza centrípeta como una fuerza más y no como una fuerza neta. La presente descripción no aparece en la pregunta del cuestionario.

Pregunta 4. En la clase de física de grado décimo, se estudia el diagrama de fuerzas para describir la dinámica del movimiento de un péndulo simple. Cuatro estudiantes proponen, cada uno, un diagrama. Seleccione el diagrama que considera correcto.

Con esta pregunta se tienen dos objetivos: por un lado, plantear una situación desconectada con las tres preguntas anteriores, en el sentido que no se relacionan de manera directa con la tercera ley de Newton; por otro lado, identificar interpretaciones relacionadas con fuerzas ficticias. Esto es

1. En la opción A, la idea de fuerza centrífuga, está relacionada con, por ejemplo, la manera como el estudiante analiza situaciones como las planteadas en las preguntas (5, 6 y 7) del FCI (Hestenes *et al.*, 1992), en las que un objeto deja de moverse en presencia de fuerzas centrales.

2. La opción B plantea la idea de que la fuerza centrípeta es una fuerza más que se ejerce sobre el objeto, en lugar de identificarla como la fuerza neta en la dirección radial, que sería lo correcto.

3. La opción C plantea la idea de que debe existir una fuerza en la dirección del movimiento y que “*gracias a esa fuerza el objeto se mueve*”, lo que evidentemente va en contra de la Ley de la Inercia. Este error se traslada a diferentes escenarios como el movimiento parabólico, sistemas oscilantes y, en general, situaciones en las que el estudiante se ve en la necesidad de explicar el movimiento; de hecho, en muchas ocasiones, aunque el objeto se mueva con rapidez constante, el estudiante suele incluir una “*fuerza de movimiento*”. De hecho, es posible vincular este error con la opción B de la pregunta del plano inclinado, es decir, el estudiante razona: si es posible que la caja se ejerza fuerza a sí misma, es coherente pensar que la masa del péndulo se ejerza a sí misma la fuerza de movimiento.

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL ESTUDIO DE CASO

Las preguntas descritas anteriormente buscan ilustrar las etapas del pensamiento o interpretaciones que los estudiantes generan al enfrentarse a ejercicios, experimentos o situaciones de estudio del concepto de fuerza.

Un nivel nocional de pensamiento, en el que predominan recursos epistemológicos estaría caracterizado por la secuencia de respuestas (1A o 1B o 1D) +(2A o 2B) +(3A o 3C o 3D) +(4A o 4B o 4C). Es decir, cualquier combinación de respuestas incorrectas.

Vale resaltar que el valor de este resultado no radica en la “*calificación*” que obtienen los estudiantes sino en la cantidad de información que este tipo de instrumentos puede aportar para implementar procesos de mejoramiento en metodologías y en aprendizajes, además del hecho que caracterizar la etapa como nocional, da indicios de en qué dirección orientar nuevas estrategias.

Un nivel conceptual de pensamiento, en el que empiezan a identificarse recursos conceptuales, generalizaciones o reconocimiento de situaciones equivalentes (como en la pregunta 1 y 2) podría estar caracterizado por la secuencia de respuestas (1C) +(2C) +(3E). Es decir, encontrar consistencia en las primeras tres preguntas indicaría que, por ejemplo, se aplica la tercera ley de Newton de manera correcta, en tres situaciones distintas. Incluso, dos respuestas correctas (de las primeras tres preguntas) también podría indicar un nivel conceptual.

Finalmente, *un nivel formal de pensamiento* estaría caracterizado por todas las respuestas correctas.

Sin duda, un mayor número de preguntas podría dar más información. En este trabajo, se pretende dar una primera aproximación a lo que es el *modelo de niveles de comprensión*. Un instrumento más estandarizado no implica desestimar el modelo, por el contrario, convierte el modelo en una categoría de análisis de dicho instrumento.

El lector podrá hacer un análisis propio y encontrar más combinaciones que indiquen los diferentes niveles de pensamiento. En ese caso, advierta que el valor del modelo está en la sencillez de las definiciones de cada nivel de pensamiento.

En lo que sigue, se presentaran las respuestas de los 42 estudiantes y se buscará argumentar los niveles de pensamiento que se identifican.

TABLA I. Resumen de resultados globales de los 42 estudiantes de las sedes Tíquiza (T) y Fagua (F). Para cada caso se presenta la opción seleccionada en cada una de las cuatro preguntas (P1, P2, P3 y P4); adicionalmente se asigna una columna de valor (V1, V2, V3 y V4) igual a 1 cuando la respuesta es correcta.

ESTUDIANTE	P1	V1	P2	V2	P3	V3	P4	V4
Estudiante 1 T	C	1	C	1	A		C	
Estudiante 2 T	B		C	1	B		A	
Estudiante 3 T	D		A		E	1	A	
Estudiante 4 T	A		B		E	1	A	
Estudiante 5 T	C	1	B		B		C	
Estudiante 6 T	D		C	1	B		C	
Estudiante 7 T	C	1	B		C		C	
Estudiante 8 T	D		B		B		D	1
Estudiante 9 T	D		B		A		A	
Estudiante 10 T	D		A		B		B	
Estudiante 11 T	A		B		D		B	
Estudiante 12 T	B		A		A		C	
Estudiante 13 T	D		A		A		C	
Estudiante 14 T	A		B		C		C	
Estudiante 15 T	B		A		D		C	
Estudiante 16 F	C	1	C	1	D		B	
Estudiante 17 F	C	1	B		E	1	B	
Estudiante 18 F	B		B		E	1	D	1
Estudiante 19 F	C	1	B		B		A	
Estudiante 20 F	A		B		E	1	A	
Estudiante 21 F	B		B		E	1	B	

ESTUDIANTE	P1	V1	P2	V2	P3	V3	P4	V4
Estudiante 22 F	C	1	A		A		C	
Estudiante 23 F	A		C	1	A		C	
Estudiante 24 F	D		C	1	A		C	
Estudiante 25 F	C	1	A		D		C	
Estudiante 26 F	B		A		E	1	C	
Estudiante 27 F	A		B		E	1	C	
Estudiante 28 F	B		B		E	1	C	
Estudiante 29 F	D		B		E	1	C	
Estudiante 30 F	D		B		E	1	C	
Estudiante 31 F	D		B		E	1	C	
Estudiante 32 F	A		B		C		D	1
Estudiante 33 F	A		B		C		A	
Estudiante 34 F	B		A		A		B	
Estudiante 35 F	A		B		A		B	
Estudiante 36 F	A		B		A		B	
Estudiante 37 F	D		B		A		B	
Estudiante 38 F	A		A		A		C	
Estudiante 39 F	A		A		A		C	
Estudiante 40 F	A		B		A		C	
Estudiante 41 F	A		B		D		C	
Estudiante 42 F	A		B		D		C	

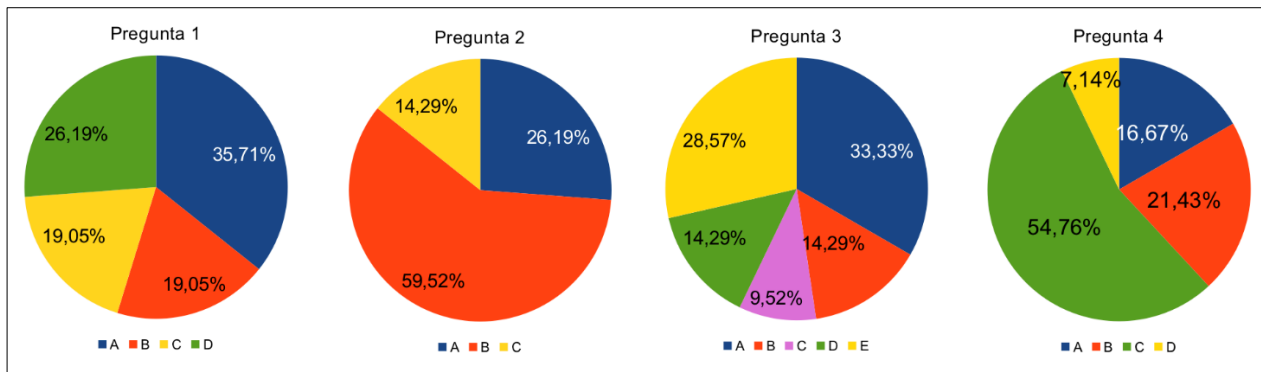


FIGURA 5. Porcentajes globales de respuesta (42 estudiantes). En amarillo se presentan las opciones correctas de cada pregunta.

En términos de los resultados globales, llama la atención que las respuestas se reparten para las diferentes opciones. Aunque las preguntas 2 y 4 tienen una opción más popular (B y C respectivamente) incluso al analizar las sedes por separado, no corresponden a la opción correcta y ponen en evidencia dos ideas fuertemente arraigadas. Una es que “*mayor masa está relacionado con mayor fuerza*” lo que puede ser indicio de un error de interpretación de la idea de inercia; la otra idea es “*debe haber una fuerza en la dirección del movimiento*”, que es una idea que se tiende a generalizar a casos de movimiento uniforme (rectilíneo o circular), lo que es un error.

También se encuentra que 17 estudiantes (40 %) no acertaron ninguna respuesta correcta. Se han señalado en amarillo las opciones correctas y en ningún caso son las respuestas más populares. Un comportamiento similar se encuentra al analizar las sedes por separado.

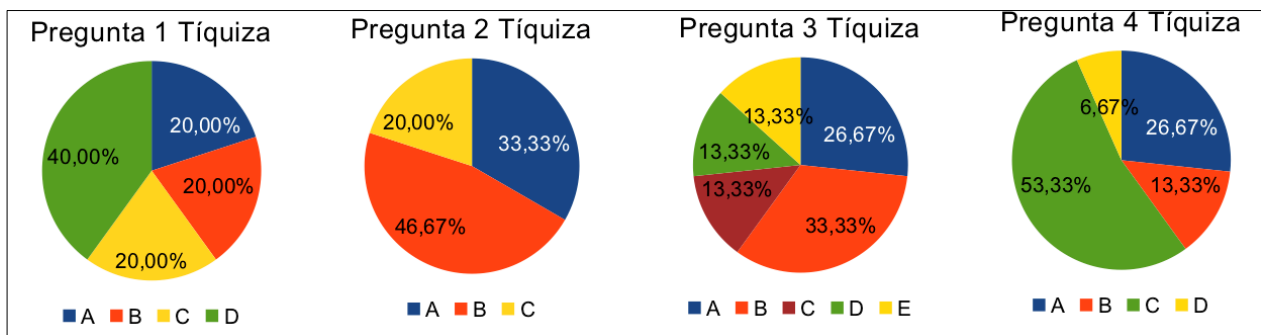


FIGURA 6. Porcentajes de respuesta de los 15 estudiantes de la sede Tiquiza. En amarillo se presentan las opciones correctas de cada pregunta.

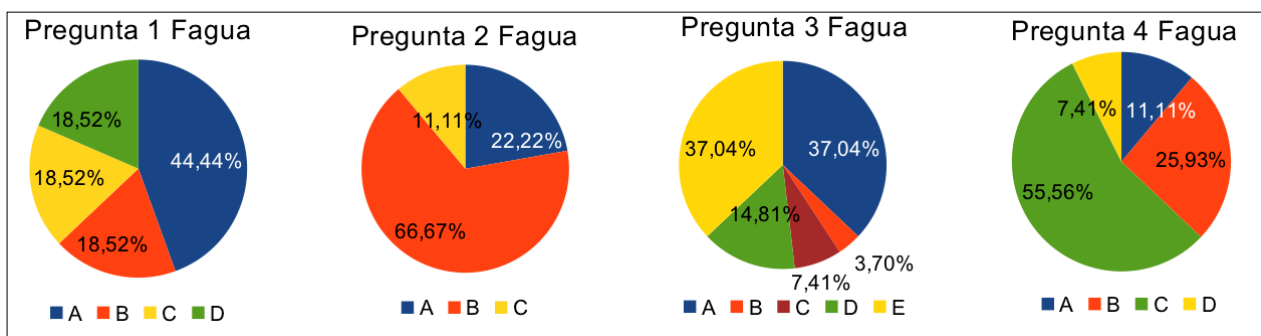


FIGURA 7. Porcentajes de respuesta de los 27 estudiantes de la sede Fagua. En amarillo se presentan las opciones correctas de cada pregunta.

Los resultados muestran lo que podría considerarse un grupo de estudiantes en un *nivel nocional de pensamiento* en torno al concepto de fuerza (específicamente en aspectos como leyes de Newton y diagramas de fuerza).

Al revisar resultados individuales se encuentra que ninguno de los estudiantes responde bien las cuatro preguntas, de hecho, solo 4 estudiantes (12 %) lograron responder dos preguntas correctamente, de ellos, solo dos, respondieron bien dos de las tres primeras preguntas. Este resultado individual se consideraría nuevamente un *nivel nocional de pensamiento* en torno al concepto de fuerza.

Las ideas más populares identificadas son:

1. La fuerza que ejerce el niño al adulto es mayor que la fuerza que le ejerce el adulto al niño, asociada a un error de interpretación de la inercia.
2. La fuerza que ejerce la Tierra sobre la Luna es mayor que la fuerza que ejerce la Luna sobre la Tierra, asociada a un error de interpretación de la inercia.
3. El diagrama tiene errores porque si la caja está en reposo, entonces, no desliza y no debe haber fricción, asociados a la idea de que la fricción “*siempre se opone al movimiento*”.
4. Siempre existe una fuerza en la dirección del movimiento, asociado a la idea de que “*la fuerza causa el movimiento por lo tanto solo hay movimiento si hay fuerza*”.

Los resultados anteriores indicarían que los estudiantes privilegian el uso de recursos epistemológicos sobre los conceptuales. Los estudiantes respaldan esas ideas populares con razonamientos basados en situaciones de la vida cotidiana:

1. A un niño le cuesta más levantar una caja pesada que a un adulto o, mover un sillón es más difícil que mover una silla pequeña.
2. La tierra al ser más grande, ejerce más fuerza, como un adulto al ser más grande, tiene más fuerza que un niño.
3. Los objetos que se deslizan, se detienen por causa de la fricción, la fricción es “*antagónica*”, esto es “*siempre se opone al movimiento*”.
4. Un objeto en reposo sigue en reposo a menos que “*alguien*” le ejerza fuerza, por ejemplo, la silla esta quieta y “*solo se moverá si alguien la mueve*”.

Estos resultados dan indicios de estrategias para mejorar los aprendizajes de los estudiantes o, en otras palabras, lograr que los estudiantes pasen de un *nivel nocional de pensamiento* a un *nivel conceptual de pensamiento*.

VI. CONCLUSIONES

La enseñanza de la física es un campo de investigación activo y uno de sus objetivos es caracterizar procesos de aprendizaje de manera cualitativa a partir de descripciones detalladas de las dinámicas de aula. Las metodologías de trabajo basadas en observación, recolección de información, evaluación y re diseño continuo de secuencias de enseñanza, a la luz de los resultados, permiten identificar la enseñanza de la física como una ciencia experimental.

Uno de los elementos clave son los instrumentos de evaluación destinados a dar cuenta del conocimiento del estudiante y del éxito (o no) de la metodología de enseñanza. Son populares instrumentos que tienen en cuenta conocimientos o ideas previas de los estudiantes entorno a conceptos físicos. Se resignifican los errores conceptuales y las creencias populares para dejar de considerarlas obstáculos y convertirlos en insumos del proceso evaluativo que además dan indicios del estado de aprendizaje del estudiante.

Se identifica un marco teórico que define *estructuras cognitivas básicas* denominadas *recursos conceptuales*, entendidos como conocimientos formales, acordes con las teorías de la física y aprendidas mediante instrucción y *recursos epistemológicos*, entendidos como conocimientos informales o creencias populares, fuertemente arraigadas, aprendidas principalmente por la experiencia cotidiana del estudiante.

La comunidad académica reconoce el reto de develar los mecanismos o criterios mediante los cuales el estudiante administra sus recursos de aprendizaje, por lo que propone modelos con fundamentos neurológicos (en términos de conexiones y redes neuronales) y cognitivos (en términos de procesos de memoria y procesos de pensamiento). No obstante, las dinámicas o reglas mediante las que los estudiantes gestionan sus recursos de aprendizaje son complejas en la medida que, por ejemplo, pequeñas diferencias en el contexto de los estudiantes pueden significar dinámicas muy diferentes en su proceso de pensamiento y, consecuentemente, de aprendizaje.

La presente propuesta afronta el reto aplicando un *modelo de niveles de pensamiento* en la enseñanza de la física. El modelo no pretende describir dinámicas de aprendizaje en detalle, en su lugar, busca reconocer qué sabe el estudiante de determinado tema y cómo lo sabe. El modelo define tres posibles niveles (nocional, conceptual, y formal) que, en primera aproximación, permiten identificar los recursos conceptuales y epistemológicos con los que cuenta el estudiante en determinado tema de estudio (por ejemplo, los conceptos de fuerza y movimiento) y cuáles de ellos usa de manera prioritaria. En ese sentido, el modelo permite caracterizar un estado de aprendizaje.

En el *nivel nocional*, los recursos de aprendizaje no se administran, sino que surgen de manera involuntaria (al azar) o de forma ineficiente; predomina el uso de recursos epistemológicos y el estudiante describe los fenómenos a partir de sus creencias más arraigadas. En el *nivel conceptual*, el estudiante gestiona sus recursos conceptuales y los

usa de manera prioritaria sobre los recursos epistemológicos, es decir, aparecen con más frecuencia explicaciones basadas en conocimientos formales del tema; sin embargo, persisten explicaciones provisionales o errores conceptuales, basados en creencias populares o experiencia cotidiana. En el *nivel formal*, los estudiantes usan sus recursos conceptuales de una manera consciente para construir nuevos significados, es decir, se apropia de ideas del cuerpo de conocimientos de la física y los usa para explicar y para elaborar un discurso alrededor de la situación de estudio.

El estudio de caso estudiantes de último grado escolar de educación secundaria, ilustra la manera como el *modelo de niveles de pensamiento* ofrece categorías de análisis a la hora de identificar o diagnosticar el estado de aprendizaje de los estudiantes entorno al concepto de fuerza. Aunque el instrumento utilizado (el cuestionario) no es estandarizado, es una muestra de cómo es posible desarrollar instrumentos de evaluación que son bien valorados en la comunidad académica por tener en cuenta ideas y conocimientos previos de los estudiantes.

Las definiciones de los niveles nocional, conceptual y formal son generales y pueden aplicarse en temáticas diversas (termodinámica, electromagnetismo, mecánica, etc.) propias de los currículos de física en educación básica y media o incluso en educación superior. La generalidad (o versatilidad) del modelo se puede considerar una ventaja adicional en la medida que permite que el docente de física establezca, a partir de la observación en el aula (y por supuesto de su experiencia), cuáles son los recursos epistemológicos específicos con los que cuentan sus estudiantes y cuáles son los recursos conceptuales que quiere desarrollar en clase.

Esta primera aproximación al modelo de niveles de pensamiento aplicado en enseñanza de la física (MNP+Física) deja abierta la invitación para que se amplíe su aplicación a más temáticas de la física e incluso a otras ciencias como la química (MNP+Química), la biología (MNP+Biología) o las matemáticas (MNP+Matemáticas).

REFERENCIAS

Bao, L., & Redish, E. F. (2006). Model analysis: Representing and assessing the dynamics of student learning. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 2(1), 010103.

Bao, L., Cai, T., Koenig, K., Fang, K., Han, J., Wang, J., ... & Wang, Y. (2009). Learning and scientific reasoning. *Science*, 323(5914), 586-587.

Barbosa, L. H. (2008). Los experimentos discrepantes en el aprendizaje activo de la física. *Latin-American Journal of physics Education*, 2(3), 24.

Caballero, M. D., Greco, E. F., Murray, E. R., Bujak, K. R., Jackson Marr, M., Catrambone, R. & Schatz, M. F. (2012). Comparing large lecture mechanics curricula using the Force Concept Inventory: A five thousand student study. *American Journal of Physics*, 80(7), 638-644.

Clement, J., Brown, D. E., & Zietsman, A. (1989). Not all preconceptions are misconceptions: finding 'anchoring conceptions' for grounding instruction on students' intuitions. *International journal of science education*, 11(5), 554-565.

De Zubiría, M., & De Zubiría, J. (1992). *Biografía del pensamiento*. Cooperativa Editorial Magisterio.

Ding, L., Chabay, R., Sherwood, B., & Beichner, R. (2006). Evaluating an electricity and magnetism assessment tool: Brief electricity and magnetism assessment. *Physical review special Topics-Physics education research*, 2(1), 010105.

di Sessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and instruction*, 10(2-3), 105-225.

Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., & Wenderoth, M. P. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(23), 8410-8415.

Guisasola, J., Furió, C., & Ceberio, M. (2008). Science education based on developing guided research. *Science education in focus*, 173-201.

Guisasola, J., Hartlapp, M., Hazelton, R., Heron, P., Lawrence, I., Michelini, M. & Zuza, K. (2016). Content-Focused Research for Innovation in Teaching/Learning Electromagnetism: Approaches from GIREP Community. In *Insights from Research in Science Teaching and Learning* (pp. 89-105). Springer, Cham.

- Guisasola, J., Zuza, K., & Sagastibeltza, M. (2019). Una propuesta de diseño y evaluación de secuencias de enseñanza-aprendizaje en Física: el caso de las leyes de Newton. *Revista de Enseñanza de la Física*, 31(2), 57-69.
- Hammer, D. (1996). Misconceptions or p-prims: How may alternative perspectives of cognitive structure influence instructional perceptions and intentions. *The journal of the learning sciences*, 5(2), 97-127.
- Hammer, D. (2000). Student resources for learning introductory physics. *American Journal of Physics*, 68(S1), S52-S59.
- Hammer, D., & Elby, A. (2002). On the form of a personal epistemology. *Personal epistemology: The psychology of beliefs about knowledge and knowing*, 169190.
- Hammer, D., Elby, A., Scherr, R. E., & Redish, E. F. (2005). Resources, framing, and transfer. *Transfer of learning from a modern multidisciplinary perspective*, 89.
- Heckler, A. F., & Sayre, E. C. (2010). What happens between pre-and post-tests: Multiple measurements of student understanding during an introductory physics course. *American Journal of Physics*, 78(7), 768-777.
- Hestenes, D., Wells, M., & Swackhamer, G. (1992). Force concept inventory. *The physics teacher*, 30(3), 141-158.
- Hogan, K. (1999). Relating students' personal frameworks for science learning to their cognition in collaborative contexts. *Science education*, 83(1), 1-32.
- Mazur, E. (1997, March). Peer instruction: getting students to think in class. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 399, No. 1, pp. 981-988). American Institute of Physics.
- McDermott, L. C., & Redish, E. F. (1999). Resource letter: PER-1: Physics education research. *American journal of physics* 67(9), 755-767.
- Minstrell, J. (1992). Facets of students' knowledge and relevant instruction. *Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies*, 110-128.
- Moreira, M. A. (2012). ¿Al final, qué es el aprendizaje significativo? *Qurrículum: Revista de Teoría, Investigación y Práctica Educativa* 25, 29-56. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3943478>
- Moreira, M. A., & Greca, I. M. (2003). Cambio conceptual: análisis crítico y propuestas a la luz de la teoría del aprendizaje significativo. *Ciência & Educação (Bauru)*, 9(2), 301-315.
- Notaros, B. M. (2002). Concept inventory assessment instruments for electromagnetics education. In *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (IEEE Cat. No. 02CH37313)* (Vol. 1, pp. 684-687). IEEE.
- Pérez, J. (2010). Caracterización de los Procesos de Comprensión: Descripciones de un Grupo de Estudiantes sobre un Experimento con Fotones. (Tesis de Pregrado). Universidad Pedagógica Nacional. Bogotá, Colombia.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1948). *La représentation de l'espace chez l'enfant*.
- Pozo, J. I. (1989). *Teorías cognitivas del aprendizaje*. Ediciones Morata.
- Ramos, J. L. S., Dolipas, B. B., & Villamor, B. B. (2013). Higher order thinking skills and academic performance in physics of college students: A regression analysis. *International Journal of Innovative Interdisciplinary Research*, 4(48-60).
- Redish, E. F. (2014). Oersted Lecture 2013: How should we think about how our students think?
- Rosemary Russ *et al.* (2008) Recognizing Mechanistic Reasoning in Student Scientific Inquiry: A Framework for Discourse Analysis Developed from Philosophy of Science.
- Sabella, M. S., & Redish, E. F. (2007). Knowledge organization and activation in physics problem solving. *American Journal of Physics*, 75(11), 1017-1029.

Skinner, B. F. (1965). Review Lecture-The technology of teaching. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, 162(989), 427-443.

Strike, K. A., & Posner, G. J. (1982). Conceptual change and science teaching. *European Journal of Science Education*, 4(3), 231-240.

Talero, P., Mora, C., Organista, O., & Barbosa, L. H. (2013). Diagrama semi-cuantitativo sobre la evolución del aprendizaje de un micro-contenido físico. *Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol*, 7(3), 418.

Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and instruction*, 4(1), 45-69.

Vygotsky, L. S. (1980). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Harvard university press.

Zembylas, M. (2005). Three perspectives on linking the cognitive and the emotional in science learning: Conceptual change, socio-constructivism and poststructuralism.